

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

Les numéros entre parenthèses qui se trouvent dans le texte renvoient aux articles à consulter. Quand l'article se trouve dans un autre volume que le numéro de renvoi, ce volume est indiqué en chiffres romains.

La fraction placée à côté du numéro d'ordre de certaines figures indique le rapport entre les dimensions linéaires du dessin et de l'appareil figuré.

*Droits de reproduction et de traduction réservés, en vertu des lois  
et des traités internationaux.*

TRAITÉ  
ÉLÉMENTAIRE  
DE PHYSIQUE

THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

AVEC LES APPLICATIONS

A LA MÉTÉOROLOGIE ET AUX ARTS INDUSTRIELS

A L'USAGE

DES FACULTÉS, DES ÉTABLISSEMENTS D'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE  
ET DES ÉCOLES SPÉCIALES DU GOUVERNEMENT

PAR

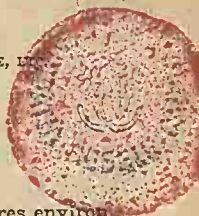
P. A. DAGUIN

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE  
PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE, ETC.

*Donation de prof.  
Proescu*

QUATRIÈME ÉDITION

Refondue et considérablement augmentée, avec 2000 figures environ  
intercalées dans le texte.



TOME TROISIÈME

PARIS  
LIBRAIRIE CH. DELAGRAVE  
RUE SOUFFLOT, 15

TOULOUSE  
LIBRAIRIE PAUL PRIVAT  
RUE DES TOURNEURS, 45

1878

Droits de reproduction et de traduction réservés.

1957

1961

BIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITARĂ  
BUCUREȘTI  
COTA 22 190

PC 203/00

—  
*Voir l'Erratum à la fin du volume.*  
—

**B.C.U. Bucuresti**



**C27022**

# LIVRE V

## ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

---

1486. — La chaleur et la lumière sont universellement connues, et c'est, pour ainsi dire, en naissant, que nous apprenons à en distinguer les effets. Nous allons, dans ce livre, étudier un autre agent naturel, ignoré pendant un grand nombre de siècles, et aujourd'hui encore peu connu du vulgaire, même chez les peuples les plus avancés. Cet agent a reçu le nom d'*électricité* ; il est, comme la chaleur et la lumière, nécessaire à la vie, et si l'homme est resté si longtemps avant de le distinguer, c'est qu'il ne possède pas d'organe spécial susceptible d'en ressentir les effets ; ces effets se manifestent bien dans diverses circonstances, mais d'une manière tellement vague, et ils sont si faciles à confondre avec d'autres impressions, qu'on n'avait pas eu l'idée de les rapporter à une cause particulière. Si le *tonnerre* est, comme nous le verrons, une manifestation grandiose de l'électricité, on avait toujours cherché à l'expliquer en le rapportant à des causes connues.

Pendant longtemps, on a admis l'existence d'un autre agent, nommé *magnétisme*, qui servait à rendre compte de toute une classe de phénomènes ; mais nous verrons que le magnétisme doit être considéré comme une manière d'être particulière de l'électricité ; c'est pourquoi nous en avons réuni l'étude dans le même livre que l'électricité.

Les faits primitifs les plus anciennement connus dans ces deux ordres de phénomènes sont l'attraction de l'aimant pour le fer, et celle que l'ambre exerce sur les corps après qu'il a été frotté. Nous trouvons là une nouvelle preuve de l'importance scientifique des faits en apparence les plus futiles ; ces expériences, qui semblent n'être que des jeux d'enfant, ayant excité l'attention de quelques esprits curieux, des phénomènes nouveaux ont été constatés, puis généralisés ; leurs lois ont été découvertes à la suite de recherches persévérantes, et aujourd'hui le magnétisme et l'électricité donnent lieu à des applications merveilleuses,

parmi lesquelles nous citerons la boussole, le paratonnerre, la galvanoplastie, la télégraphie électrique...; applications que nous ne manquerons pas de faire connaître quand il en sera temps.

Nous allons d'abord nous occuper des phénomènes du *magnétisme*, tels qu'on les observe dans le fer et quelques autres substances où ses effets sont très-intenses; tandis que dans la plupart des autres corps, ils ne se manifestent qu'au moyen d'appareils d'une grande puissance, que nous ne décrirons que plus tard, après avoir étudié les propriétés de l'*électricité*. C'est alors que nous démontrons la généralité du *magnétisme*, et que nous ferons voir comment les phénomènes qu'il produit dépendent de l'agent électrique.

## CHAPITRE PREMIER

### MAGNÉTISME DANS LE FER

Magnus magnes ipse est globus terrestris.

(G. GILBERT, *de magnete physiologia nova*,  
Lond., 1600.)

#### § 1. — PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES AIMANTS

**1137. Aimants naturels.** — On trouve, dans certaines mines de fer, une matière nommée *Pierre d'aimant*, qui a la propriété d'attirer le fer et quelques autres substances. Cette propriété a d'abord été attribuée à un agent particulier auquel on a donné le nom de *fluide magnétique* ou de *magnétisme*; ce dernier nom sert aussi à désigner la partie de la physique qui s'occupe des phénomènes que produit cet agent.

La pierre d'aimant est un oxyde de fer ( $\text{Fe}^3\text{O}^2$ ), nommé par les minéralogistes *fer oxydulé* ou *fer magnétique*; c'est un des oxydes du fer les moins oxygénés, et un des nombreux minerais d'où l'on extrait ce métal. Il ne faudrait pas croire cependant que tous les échantillons de fer oxydulé fussent des aimants. Les pierres d'aimant sont noires ou brunes; on en trouve cependant de grises. Elles sont quelquefois cristallisées en octaèdres plus ou moins modifiés, ou en dodécèdres rhomboïdaux. Les meilleures sont homogènes, à cassure fine, susceptibles d'un beau poli. Leur densité, assez variable, est environ 1,24. On en trouve dans toutes les parties du monde; les meilleures viennent des Indes, de Norwège, de Suède et d'Allemagne. L'île d'Elbe en renferme beaucoup dans ses

mines de fer ; on en tire aussi des Etats-Unis d'Amérique. En France, principalement dans l'Auvergne, on n'en trouve que peu et de mauvaise qualité.

Suivant Aristote, l'aimant était connu de Thalès de Milet, 600 ans avant notre ère. Son nom, en grec  $\mu\alpha\gamma\eta\eta\tau\eta\varsigma$ , vient de celui de la ville de Magnésie, en Lydie, près du mont Sipyle, sur lequel furent trouvés les premiers aimants. Une autre ville du nom de Magnésie, située près du Méandre, en fournissait également, ainsi que les environs de la ville d'Héraclée; aussi Platon, dans le *Timée*, désigne-t-il l'aimant sous le nom de *Pierre d'Héraclée*, et Sophocle, sous celui de *Pierre de Lydie*. Du nom grec de l'aimant on a fait le mot *magnétisme* et ses différents dérivés.

L'histoire de la découverte de l'aimant est mêlée de fables invraisemblables. D'après Pline, un berger ayant remarqué que le fer de sa houlette, ou ses souliers garnis de clous, adhéraient au sol, en chercha la cause et découvrit l'aimant. Isidore de Séville prétend que les Indiens l'ont connu les premiers, et c'est d'après lui que les auteurs du moyen âge l'ont appelé *Lapis Indicus*. Il est certain que les prêtres de l'ancienne Egypte le connaissaient; et les Hébreux en trouvaient dans les centres habités par les tribus de Gad, d'Azer et d'Issachar; ils le nommaient *schabol*.

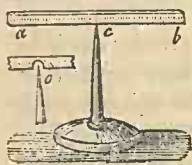


Fig. 1026.

**Aimants artificiels.**

— On fabrique par divers procédés des *aimants artificiels*, qui consistent en barreaux d'acier possédant toutes les propriétés des aimants naturels. Tout ce que nous allons exposer s'applique également à ces deux espèces d'aimants.



Fig. 1027.

— On fabrique par divers procédés des *aimants artificiels*, qui consistent en barreaux d'acier possédant toutes les propriétés des aimants naturels. Tout ce que nous allons exposer s'applique également à ces deux espèces d'aimants.

**1488. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES AIMANTS.** — Les anciens n'ont guère connu que l'attraction que les aimants exercent sur le fer. Pour constater cette propriété, il suffit de rouler un aimant dans la limaille de fer; on la voit s'attacher à sa surface en formant des houppes hérissées. On emploie encore le *pendule magnétique*, balle de fer suspendue à un fil, avec lequel on voit que l'attraction magnétique diminue d'intensité quand la distance augmente.

Si l'on approche un morceau de fer de l'extrémité d'un aimant mobile, on voit cette extrémité s'approcher du morceau de fer, l'action étant égale à la réaction. — Pour obtenir un barreau mobile, on y creuse une petite cavité *o* (fig. 1026), par laquelle on l'appuie sur une pointe *c*. Les gros barreaux, *ns* (fig. 1027), se suspendent à un fil sans torsion *f*, au moyen d'un étrier de carton ou de cuivre, *o*, dont on voit la disposition en *a*.

**Attraction magnétique à travers les corps.** — L'attraction magnétique s'exerce à travers les corps, qui, même, ne modifient pas sensiblement l'intensité de l'effet produit; pourvu toutefois que ces corps ne soient pas *magnétiques*, c'est-à-dire attirables à l'aimant. Ainsi, une baguette de fer suspendue sur une pointe, plongée dans l'eau, entourée d'un cercle de flammes, placée dans le

vide... se met en mouvement dès qu'on en approche un aimant. Lucrèce avait vu la limaille de fer être attirée par un aimant, à travers le fond d'un vase d'airain. Un brin de fil de fer suit, sur une lame de bois, de verre, de carton..., un aimant placé du côté opposé.

On a fait des horloges dont l'aiguille était remplacée par une balle d'acier roulant sur un cadran de clinquant, derrière lequel tournait un barreau aimanté mené par l'horloge. Un effet analogue est produit dans l'indicateur à niveau des chaudières, de M. Lethuillier-Pinel (II, 1225).

**1489. Corps magnétiques.** — On nomme *substances magnétiques* celles qui sont attirées par les aimants. Ce sont le *fer*, la *fonte*, l'*acier*, les *oxydes de fer*, et certaines combinaisons et alliages de fer, par exemple, son alliage avec le platine (1524), le *cobalt*, le *chrome*, le *nickel*, et enfin le *manganèse*; mais ce dernier métal ne donne de signes de magnétisme qu'après qu'on l'a refroidi à 20° ou 25° au-dessous de zéro. Le *palladium*, d'après Faraday et Graham, est un peu magnétique, et quand il occult 600 fois son volume d'hydrogène, il l'est davantage; d'où l'on conclut que l'hydrogène est magnétique, ce qui confirme l'opinion qu'il est un métal gazeux.

**Influence de la température.** — Newton a annoncé le premier que le fer rougi au feu n'est plus magnétique. Ce résultat, contredit d'abord par Kircher, fut ensuite confirmé par Cavallo, qui montra que la température doit être portée au moins jusqu'au rouge cerise pour que tout signe de magnétisme disparaisse. D'après Barlow, la fonte de fer perd ses propriétés magnétiques au rouge blanc; mais M. Trève a vu un cylindre de fonte en fusion s'aimanter fortement à 1300°, puis à l'état solide et pâteux, quand il était enveloppé d'un fil métallique enroulé comme celui des électro-aimants et parcouru par un courant (I, 592). Il y a là une contradiction qui appelle de nouvelles recherches. — Pouillet a reconnu que 1° le *cobalt* reste magnétique aux plus hautes températures; 2° le *chrome* cesse de l'être un peu au-dessous du rouge sombre, et le *nickel*, vers 350°; 3° le *manganèse* ne commence à devenir magnétique que vers — 20°. On a conclu de là que tous les corps deviendraient magnétiques si l'on pouvait les refroidir suffisamment. Pouillet pense que la chaleur agit en écartant les molécules, et que si l'on parvenait à les rapprocher convenablement par un moyen quelconque, les propriétés magnétiques apparaîtraient dans tous les corps. Cette manière de voir est corroborée par cette remarque, que les métaux les plus magnétiques sont aussi ceux dans lesquels les atomes sont le plus rapprochés; car, si l'on divise leur poids spécifique par leur poids atomique, on trouve qu'ils donnent à peu d'exceptions près les quotients les plus petits. Le *manganèse* vient après le *fer*, le *cobalt* et le *nickel*, comme cela devait être. Cependant, les substances qui ne contiennent que peu de fer en combinaison donnent des signes de magnétisme. La question a donc besoin d'être de nouveau étudiée. — Nous verrons plus tard que le plus grand nombre des corps sont influencés de diverses manières par des aimants très-puissants.

**1490. Pôles des aimants.** — Les différents points de la surface d'un



aimant ne jouissent pas au même degré de la vertu attractive. Gilbert a reconnu qu'il y a toujours deux régions opposées où l'attraction est le plus prononcée; on nomme ces régions les *pôles* de l'aimant. Entre les deux pôles se trouve une ligne, sur laquelle il n'y a pas d'attraction; on l'appelle *ligne neutre* ou *ligne*

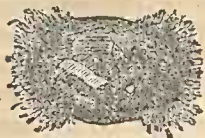


Fig. 1028.



Fig. 1029.

*moyenne*. Quand l'aimant est très allongé, les pôles sont *ordinairement* placés aux extrémités, et il y a au milieu un *espace neutre* plus ou moins long. Pour montrer l'existence des pôles, il suffit de rouler l'aimant dans la limaille de fer; on la voit s'attacher aux pôles, tandis que la ligne neutre n'en retient pas; (fig. 1028 et 1029), la première figure représente un aimant naturel, et la seconde un aimant artificiel, dont *mn* est la ligne neutre. On remarque que les parcelles de fer forment des filaments perpendiculaires à la surface de l'aimant, et d'autant plus longs qu'ils sont plus près des pôles. Nous verrons plus loin la cause de cette disposition (1495).

**Fantôme magnétique.** — Pour montrer les pôles et la ligne neutre des aimants, Gilbert a imaginé l'expérience suivante : on met sur un barreau aimanté horizontal, une feuille de carton sur laquelle on projette, au moyen d'un petit tamis,

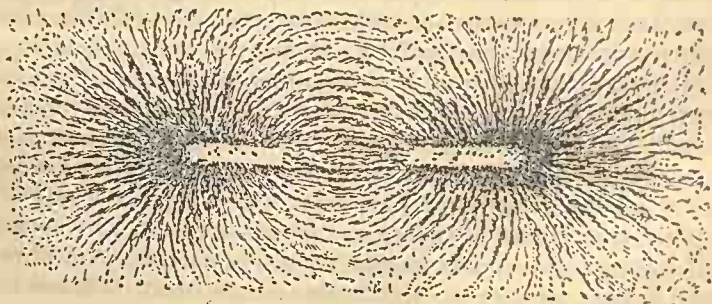


Fig. 1030.

de la fine limaille de fer. Les parcelles prennent alors un arrangement régulier en obéissant à l'attraction magnétique, comme on le voit dans la figure 1030. La tendance à se porter vers les pôles, et l'absence d'action sur la ligne moyenne, sont nettement indiquées par la forme des courbes dessinées par les parcelles de limaille. Ces dessins constituent le *spectre* ou *fantôme magnétique*.

De Haldat a trouvé moyen de les conserver en appliquant dessus une feuille de papier enduite de colle d'amidon sur laquelle la limaille s'attache et reste adhérente. Comme on peut ainsi déranger les parcelles de fer, M. Mayer forme le spectre sur une lame de verre vernie à la cire d'Espagne, qu'il chauffe ensuite par dessus, sans la déplacer, pour faire adhérer les parcelles.

**1491. Pôles de même nom et de nom contraire.** — Supposons maintenant que, au lieu de faire agir un aimant sur du fer, on fasse agir divers aimants les uns sur les autres, et considérons en plusieurs suspendus par leur centre de gravité, et auxquels on présente une même extrémité d'un autre aimant; on verra que certains pôles seront attirés, tandis que d'autres seront repoussés. Les pôles sur lesquels l'action est la même sont appelés *pôles de même nom*; ceux sur lesquels elle est différente, sont dits *de nom contraire*.

**Actions mutuelles des pôles.** — Une fois qu'on a distingué les pôles des deux espèces, on reconnaît que les *pôles de même nom se repoussent*, et les *pôles de nom contraire s'attirent*.

On remarque que les deux pôles opposés d'un même aimant sont de nom contraire; car l'un d'eux est attiré par le pôle de l'aimant pris pour terme de comparaison, tandis que l'autre est repoussé. Il en résulte que si l'on retourne bout à bout l'aimant que l'on fait agir sur les autres, les pôles qui étaient attirés seront repoussés, et réciproquement.

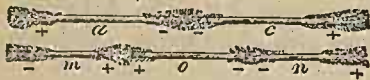


Fig. 1031.

On désigne les deux pôles opposés d'un aimant, par les noms de *pôle positif* et *pôle négatif*, et on les indique par les signes  $+$  et  $-$  de l'algèbre. Ces dénominations sont relatives; cependant, on peut désigner les pôles, d'une manière absolue en se fondant sur la direction à peu près parallèle au méridien que prennent les aimants mobiles (1501), et en convenant d'appeler pôle *positif* celui qui se tourne vers le nord, et pôle *négatif* celui qui regarde le sud.

**1492. Points conséquents.** — Les pôles situés aux extrémités d'un même aimant sont ordinairement de nom contraire; mais il peut en être autrement, et alors il y a des pôles intermédiaires, auxquels on donne le nom de *points conséquents*, et que l'on reconnaît en roulant les aimants dans la limaille de fer (fig. 1031), ou en formant un spectre magnétique, dans lequel on voit comment la limaille se porte vers ces pôles intermédiaires comme vers les pôles extrêmes. En faisant agir ces pôles sur une aiguille aimantée, on trouve qu'ils sont alternativement positifs et négatifs. Il en résulte que, s'ils sont en nombre *pair*, les pôles extrêmes sont de nom contraire, *mn*, et qu'ils sont de même nom, *ac*, si les points conséquents sont en nombre *impair*. On voit aussi qu'un aimant qui possède des points conséquents peut être considéré comme formé de plusieurs aimants placés les uns au bout des autres, et réunis par des pôles de même nom. Par exemple, l'aimant *mn* (fig. 1031) serait formé de trois aimants, *m*, *o* et *n*, les deux premiers réunis par le pôle positif, et les deux autres, par le pôle négatif.

**Aimants et corps magnétiques.** — L'existence des pôles d'espèce différente dans les aimants, les distingue nettement des corps simplement magnétiques; ceux-ci attirent également, et par tous leurs points, les deux pôles d'un même aimant.

**1493. De la cause des propriétés des aimants.** — Les anciens, voulant toujours deviner les causes avant d'étudier les effets, n'ont créé sur l'aimant que des systèmes chimériques. Quelques-uns se contentaient de dire que les propriétés de l'aimant « cette pierre par excellence, ce chef-d'œuvre divin », était un secret réservé par les dieux. Thalès et Anaxagore supposaient que l'aimant était animé. Claudien prétendait que le fer était la nourriture de l'aimant, opinion reprise plus tard par le médecin Costeo de Lodi et par Maurolycus. Suivant d'autres, il y avait sympathie entre le fer et l'aimant. Diogène Laërce disait que l'aimant lance des émanations qui s'enfoncent dans les interstices du fer et l'entraînent; il remarque que l'attraction est réciproque. Lucrèce et Plutarque pensaient que ces émanations faisaient le vide entre l'aimant et le fer, qui se précipitait dans ce vide. Tous ces systèmes ne sont que l'expression même du fait à expliquer, déguisée sous différentes formes. G. Gilbert, que Galilée qualifie de « grand jusqu'à faire naître l'envie, » rejette toutes ces rêveries, et, faisant appel à l'expérience, rectifie les faits connus, et en découvre un grand nombre d'autres, qu'il publie dans son livre *De magnete*, se contentant d'essayer l'explication de quelques phénomènes particuliers, sans chercher à créer une théorie générale. Gassendi supposait que l'aimant lançait sur le fer des atomes en forme d'hameçon, pour l'accrocher et le tirer. Descartes avait recours à ses tourbillons. Porta regardait l'aimant comme formé de fer et de pierre en lutte perpétuelle, et l'aimant empruntait le secours du fer situé à proximité, pour empêcher la pierre d'être la plus forte. On voit que les inventeurs de tous ces systèmes n'ont fait faire aucun pas à la science. Gilbert seul, qu'on peut regarder comme le créateur de la science du magnétisme, l'a fait sortir d'une enfance prolongée pendant un grand nombre de siècles. Enfin, Æpinus, tenant compte de tous les phénomènes constatés par Gilbert et par lui-même, chercha à rattacher les propriétés des aimants à l'existence d'un fluide particulier renfermé dans les corps magnétiques. On a ensuite admis deux fluides, puis Coulomb a imaginé l'hypothèse suivante :

**1494. HYPOTHÈSE DE COULOMB.** — L'expérience prouve qu'on peut enlever ses propriétés à un aimant en le frottant convenablement avec un autre aimant, ou en le chauffant fortement, ou enfin en le frappant avec un marteau. Dans ces diverses opérations, la matière de l'aimant n'est pas modifiée, et son poids n'est pas changé. On a conclu de là que les propriétés magnétiques n'appartiennent pas en propre à la matière pondérable, et on les a attribuées à un fluide particulier. Coulomb a ensuite avancé l'hypothèse suivante, qui se plie de la manière la plus heureuse à l'explication de tous les phénomènes connus de son temps. Il admet, comme Dufay l'avait déjà fait pour l'électricité, qu'il existe dans les aimants deux fluides impondérables qu'il nomme *fluides magnétiques*, exerçant

leur action, l'un au pôle positif, l'autre au pôle négatif. Chacun de ces fluides agit par répulsion sur le fluide de la même espèce, et par attraction sur le fluide de nom contraire; ce qui explique les actions mutuelles des pôles. Ces fluides n'ont pu être isolés, et ne peuvent se manifester sans l'intervention de la matière pondérable.

**1495. Décomposition du fluide neutre du fer.** — Dans cette théorie, on explique les actions mutuelles des pôles par celles qu'exercent les fluides qu'ils contiennent. On est donc conduit naturellement à attribuer l'attraction des aimants sur le fer et les autres substances magnétiques, à une action exercée par le fluide attirant, sur un fluide de nom contraire qui existerait dans le corps attiré. C'est, en effet, ce qui paraît avoir lieu; car, si l'on appuie

l'extrémité d'un barreau de fer sur le pôle d'un aimant, ce barreau devient lui-même un aimant, et peut attirer

de la limaille ou un autre barreau de fer. Ce dernier se trouve aussi aimanté, et peut

de même attirer de la limaille. On peut ainsi suspendre à un aimant une série de mor-

ceaux de fer, qui se soutiennent les uns les autres (*fig. 1032*); c'est ce qu'on nomme

la *chaîne magnétique*. Mais aussitôt qu'on éloigne l'aimant du morceau de fer supé-

rieur, tous les autres tombent. Cette expérience, décrite par Lucrèce, était connue

de Platon. On voit que ce n'est que sous l'influence de l'aimant que les morceaux de

fer sont momentanément aimantés. On comprend maintenant pourquoi la limaille de fer

s'arrange en filaments (1490); c'est que chaque parcelle en attire une autre, de ma-

nière qu'il se forme une multitude de petites chaînes magnétiques.

L'état d'aimantation d'un barreau de fer soumis à distance à l'action d'un

aimant peut aussi se reconnaître en formant le spectre magnétique (*fig. 1034*); on y distingue les pôles de l'aimant temporaire que forme le fer, et sa ligne

neutre *ab*.



Fig. 1032.

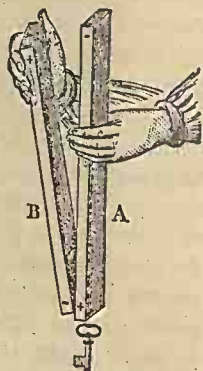


Fig. 1033.

Pour expliquer ces résultats, Coulomb suppose que tous les corps magnétiques contiennent les deux fluides, combinés de manière à ne produire aucun effet, et formant par leur réunion ce qu'il nomme le *fluide magnétique neutre*. Quand on approche le pôle positif d'un aimant, le fluide neutre du fer est décomposé; le fluide négatif provenant de la décomposition est attiré vers le pôle positif de l'aimant, et le fluide positif est repoussé. Le fer constitue alors un aimant, dont le pôle négatif est attiré par le pôle positif de l'aimant proprement dit, plus que n'est repoussé le pôle opposé, à cause de la plus grande distance. Quand on éloigne l'aimant proprement dit, les fluides, séparés dans le fer par son influence,

se recombinent, parce qu'ils s'attirent, ils reforment du fluide neutre, et tout signe d'aimantation disparaît.

Cette explication est confirmée par l'expérience du *paradoxe magnétique* : Après avoir suspendu un morceau de fer à l'un des pôles d'un aimant A (fig. 1033), on en approche peu à peu le pôle contraire d'un autre aimant B. On voit bientôt le morceau de fer se détacher et tomber ; c'est que l'action du pôle de l'aimant B détruit la décomposition de fluides qu'avait produite le pôle de nom contraire de l'aimant A. — On suspend encore horizontalement, par des cordons verticaux, deux morceaux égaux de fil de fer, de manière qu'ils se touchent latéralement et l'on approche de l'une de leurs extrémités le pôle d'un aimant ; on les voit aussitôt s'écarter l'un de l'autre, parce qu'ils sont aimantés par influence, les pôles de même nom étant du même côté.

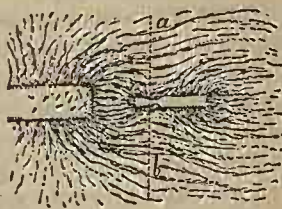


Fig. 1034.

**1496. Des éléments magnétiques.** — On a cru d'abord que les fluides magnétiques occupaient chacun une des moitiés de l'aimant. Mais Gilbert a montré que, si l'on brise deux une aiguille aimantée (fig. 1035), chaque moitié devient un aimant complet ayant ses pôles et sa ligne moyenne. Chaque moitié, brisée de même, donne deux nouveaux aimants complets. En un mot, quelque petite que soit la parcelle que l'on sépare d'un aimant, elle présente deux pôles et une ligne moyenne. Pour expliquer ces résultats, on est forcé d'admettre, avec Coulomb, que les fluides magnétiques résident dans des espaces insensibles, nommés *éléments magnétiques*, et qui sont disposés comme des aimants excessivement petits, ayant tous leurs pôles de même nom tournés du même côté, et leurs axes dirigés parallèlement à l'axe de l'aimant. Les fluides ne résident donc pas séparément dans chaque moitié de l'aimant, mais on les y trouve l'un et l'autre, et l'aimant est constitué comme une réunion de petits aimants élémentaires tous orientés de la même manière.

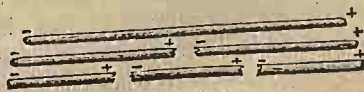


Fig. 1035.

On imite cet état des aimants, en remplissant un tube de carton, avec de très-petits aimants obtenus en brisant des fils d'acier aimantés, et dont tous les pôles de même nom sont tournés vers la même extrémité du tube. L'ensemble se comporte comme un aimant unique. — On peut encore, comme l'a fait de Haldat, remplir de limaille de fer ou de battitures de fer pulvérisées, un tube de laiton fermé à ses extrémités par des tampons à vis en laiton. Si l'on aimante ce système, il forme un aimant ayant ses deux pôles et sa ligne neutre, quelle que soit la pression exercée par les tampons à vis. Mais si l'on vient à déranger les parcelles de limaille par des secousses, la force de l'aimant diminue, et tout signe d'aimantation finit par disparaître. En mêlant du sable à la limaille, on

peut encore aimanter le cylindre, même quand le volume du sable forme les  $\frac{5}{8}$  du volume total. — On obtient des résultats semblables au moyen des *aimants factices* de Knight et de Ingenhousz, composés de diverses poudres ferrugineuses, dont on forme une pâte au moyen de quelque substance liante, comme une huile siccativ, et que l'on aimante quand elle s'est durcie.

**1497. Formation des pôles.** — Il reste à expliquer comment les *éléments magnétiques* donnent lieu à deux pôles et à une ligne neutre. Considérons une seule file de ces éléments, AB (fig. 1036). S'ils ne modifiaient pas mutuellement leur état magnétique, leurs effets sur un point extérieur se neutraliseraient dans toute la longueur de la file, excepté aux extrémités, où le fluide positif de A et le fluide négatif de B agiraient isolément. Mais les éléments magnétiques exercent les uns sur les autres des actions dont dépend l'état final. Soit un élément *a*; les pôles positifs des éléments qui sont du côté B agiront plus fortement sur *a* que leurs pôles négatifs, qui en sont plus éloignés. De même, les pôles négatifs de tous les éléments qui sont du côté A auront sur *a* une action

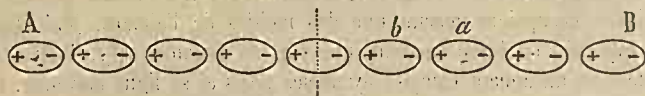


Fig. 1036.

plus forte que les pôles positifs. Les deux parties Ba, aA de la série tendront donc à augmenter la force magnétique de l'élément *a*, en y décomposant du fluide neutre.

On voit que la force magnétique des éléments augmente des extrémités au milieu; car l'élément *b*, situé à la gauche d'un autre; *a*, pris dans la moitié B de l'aimant, est soumis à l'action d'un élément de moins situé en A, mais il reçoit celle d'un élément de plus placé en B, et, comme ce dernier est plus rapproché de l'élément considéré que celui de gauche, on voit que l'effet total est plus grand que celui que subit l'élément *a*, qui est plus près de l'extrémité B. La force magnétique d'un élément *diminue* donc du milieu aux extrémités.

Il résulte de là que les actions des pôles en regard, de deux éléments consécutifs, sont différentes. Ainsi, dans la moitié B, l'intensité du fluide négatif d'un élément l'emporte sur celle du fluide positif de l'élément situé à sa droite, de manière que les actions du fluide négatif dominent dans la moitié B. De même, les actions du fluide positif dominent dans la moitié A. Une autre conséquence, c'est que, si l'on place bout à bout deux aimants égaux se touchant par les pôles contraires, ils devraient n'en former qu'un ayant sa ligne neutre au point de jonction. C'est, en effet, ce que montre le fantôme magnétique, dont les courbes enveloppent ce point; elles sont seulement un peu déformées, à cause de l'imperfection du contact.

M. Dumonceau a reconnu aussi qu'un barreau de fer  $PP'$  (fig. 1037), en contact avec un aimant  $SN$  et sur son prolongement, en devient la continuation, de manière que l'ensemble forme un aimant unique. Au moyen du spectre magnétique, on voit que le fer attire la limaille par tous les points de sa surface, qui ne présente pas d'espace neutre, et forme comme un épanouissement du pôle de l'aimant. En même temps, la ligne neutre de celui-ci s'est rapprochée du fer, en  $m$ . On reconnaît aussi, au moyen d'une aiguille aimantée, que tous les points de la surface du fer sont de même nom.

**Résultats du calcul.** — En étudiant par le calcul les effets des divers éléments les uns sur les autres, et admettant que les intensités des forces magnétiques varient en raison inverse des carrés des distances, comme nous le verrons (1508), Poisson a démontré que la somme des actions que reçoit un élément, de la part de tous les autres diminue du milieu aux extrémités, d'abord lentement, puis très-rapidement. Il en résulte que la *différence* entre les forces magnétiques de deux éléments voisins, et par conséquent entre leurs pôles les plus rapprochés, augmente à mesure qu'on s'avance vers les extrémités. Or c'est cette différence qui agit à l'extérieur; la force magnétique augmente donc rapidement du milieu aux extrémités. Vers le milieu, les différences de force magnétique sont à peine sensibles, et les effets extérieurs peu prononcés, quoique les éléments soient plus aimantés que près des extrémités. Nous verrons que l'expérience confirme ces divers résultats (1514).



Fig. 1037.

#### 1498. Pôles mathématiques. —

Considérons un centre magnétique contenant, par exemple, du fluide positif, et situé à une distance assez grande d'un aimant pour que les droites menées de ce centre aux différents points de l'aimant puissent être regardées comme parallèles. Chacun des points de la moitié négative de l'aimant est attiré, et d'autant plus fortement qu'il est plus rapproché de l'extrémité. Toutes les attractions parallèles ont une résultante, dont le point d'application est situé dans l'intérieur de l'aimant, à une certaine distance de l'extrémité. Ce point d'application se nomme *pôle mathématique* de l'aimant. Il existe un pôle semblable dans l'autre moitié, qui est le point d'application de la résultante des forces répulsives exercées par le centre magnétique considéré. On voit que le mot *pôle* reçoit ici un sens plus précis que celui que nous lui avons donné jusqu'à présent (1490). Si le centre magnétique était peu éloigné, les forces ne seraient plus parallèles, et les points d'application des résultantes n'auraient plus les mêmes positions, qui dépendraient alors de la situation et de la distance du centre magnétique. En outre, ce dernier pourrait modifier l'état de l'aimant en en augmentant la force, et rapprochant la ligne neutre de son côté. — Quand on parle des pôles d'un aimant, on suppose toujours que le corps magnétique sur

lequel il agit, ou qui agit sur lui, est assez éloigné pour que les actions sur ses différents points puissent être supposées parallèles.

**1499. Les fluides magnétiques ne se transportent pas.** — Quand le fer est soumis à l'action d'un aimant, les fluides positif et négatif provenant de la décomposition du fluide neutre ne se transportent pas aux extrémités, mais restent confinés dans chaque élément magnétique. En effet, si l'on sépare avec des cisailles une partie d'un brin de fil de fer suspendu à un aimant, le fragment qui se détache se trouve à l'état neutre; ce qui prouve que ce fragment contenait des quantités égales des deux fluides, quoique l'action du fluide repoussé par l'aimant y prèdominât. — En outre, le fluide magnétique ne peut non plus sortir des aimants, car ils peuvent, sans perdre de leur force, communiquer leurs propriétés aux barreaux qu'ils servent à aimanter.

Dans la théorie de Coulomb, on admet que la quantité de *fluide neutre* que contiennent les corps magnétiques est indéfinie. Mais nous verrons qu'il y a, dans certains cas, une limite maximum, et nous ferons connaître une autre théorie, imaginée par Ampère, dans laquelle les actions des éléments magnétiques sont attribuées à l'électricité, disposée d'une manière particulière.

**1500. Force coërcitive.** — Les fluides magnétiques, séparés dans les éléments d'un barreau de fer par l'influence d'un aimant, se recombinaient par leur attraction mutuelle dès que cet aimant s'éloigne. Comme il n'en est pas de même dans les aimants, il faut nécessairement qu'il existe dans ceux-ci une cause particulière qui s'oppose à la recomposition des fluides. Cette cause inconnue a reçu le nom de *force coërcitive*. Le caractère de cette force est de s'opposer, dans les éléments magnétiques, au mouvement des fluides tendant soit à se séparer, soit à se réunir après la séparation.

La force coërcitive dépend de la nature du corps magnétique et de l'arrangement de ses molécules; elle est augmentée, en général, par toutes les causes qui diminuent la ductilité. Ainsi, l'acier, le fer pur et recuits, ne possèdent pas de force coërcitive; mais la trempe ou l'écrouissage leur en donnent d'autant plus que la ductilité a été plus diminuée. Le fer doux acquiert encore de la force coërcitive quand on le rend cassant par le mélange d'un peu de soufre, de phosphore, d'arsenic, de charbon. Le palladium prend de la force coërcitive quand il occlut l'hydrogène (1489).

La force coërcitive peut être modifiée par l'ébranlement des molécules; ainsi, il suffit de laisser tomber un aimant pour lui faire perdre une notable partie de sa force, et l'on peut lui enlever toute son aimantation par des coups de marteau. D'un autre côté, si l'on soumet une barre de fer à l'action d'un aimant, et qu'on la frappe par le bout, d'un coup sec, elle reste aimantée; le choc a développé, au moins pour quelque temps, de la force coërcitive. — Enfin, la chaleur fait céder cette force; elle affaiblit les aimants, et l'on peut le plus souvent leur enlever toute trace d'aimantation, en les chauffant jusqu'au rouge.

L'attraction d'un aimant sur un corps simplement magnétique, devant être précédée d'une décomposition de fluide neutre, un aimant doit être sans action



sur un corps dans lequel la force coercitive s'oppose à cette décomposition. C'est, en effet, ce qui a lieu, et un morceau d'acier fortement trempé n'est pas attiré par un aimant. Cependant, si l'aimant est très-puissant, la force coercitive cède, car elle est limitée, comme toutes les forces de la nature, et le fer se décompose plus ou moins lentement. Mais quand on éloigne l'aimant, la décomposition persiste et l'acier reste aimanté.

Si l'on fait agir un pôle d'un aimant puissant sur le pôle de même sens d'un faible aimant, il peut se faire que ce dernier, au lieu d'être repoussé, soit attiré. Ce résultat s'explique par la décomposition qui se fait dans le fer au voisin du pôle du fort aimant, dont la force coercitive est vaincue, de manière qu'il y a, de côté du pôle du fort aimant, dans chaque élément magnétique, plus de ferbe contrainte provenant de cette décomposition, qu'il n'y avait d'avance de ferbe libre au même nom. Tantôt le petit aimant reste aimanté dans le même sens, après qu'on a enlevé le fort aimant; seulement le pôle sur lequel on a agi se trouve affaibli; tantôt le sens de l'aimantation est renversé. D'autres fois enfin, quand le petit aimant est très-mince, il se forme un point consécutif, à une petite distance. M. Woestyn, qui a étudié particulièrement ces phénomènes<sup>1</sup>, les explique en admettant que la force coercitive n'existe pas dans tous les éléments; ce qui se conçoit, puisque la trempe se fait sentir autrement à la surface et dans l'intérieur des barreaux, et que l'acier n'est pas homogène, des parcelles étant plus ou moins

## § 2. — ACTION DE LA TERRE SUR LES AIMANTS

**1501. Déclinaison.** — Un aimant suspendu horizontalement sur une pointe ou dans un étrier de papier, se dirige spontanément à peu près du nord au sud, et c'est toujours la même extrémité qui se tourne vers le nord; on la nomme *pôle nord* de l'aimant; l'extrémité opposée se nomme *pôle sud*. Ce résultat se vérifie en tout lieu, excepté, en quelques points voisins des pôles terrestres. Pour ces sortes d'observations, on emploie de préférence de petits aimants minces en forme de losange très-allongé, désignés sous le nom d'*aiguilles aimantées*. On a cru pendant longtemps que l'axe de l'aiguille aimantée se placait exactement dans le méridien géographique; mais il n'en est pas ainsi, et l'on a donné le nom de *déclinaison* à l'angle que fait avec le méridien du lieu, le plan vertical qui passe par l'axe de l'aiguille; ce plan se nomme le *méridien magnétique*. La déclinaison n'est pas la même en tous les points de la surface du globe. L'extrémité nord de l'aiguille se trouve tantôt à l'est, tantôt à l'ouest du méridien du lieu, ce que l'on indique en disant que la déclinaison est *orientale* ou *occidentale*. Il y a aussi des points pour lesquels la déclinaison est nulle; ils forment des lignes continues nommées *lignes sans déclinaison*, que nous étudierons plus loin.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXVI, p. 520.

que diverses variations et perturbations que la déclinaison éprouve en un même lieu.

La déclinaison a été découverte par Christophe Colomb, en 1492, lors de son voyage à la découverte de l'Amérique, et ce phénomène inattendu ne contribua pas peu à effrayer ses compagnons, qui voyaient leur guide habituel sur les mers manquer à son rôle accoutumé. Cependant, Thévenot assure avoir vu une lettre écrite en 1269 par Pierre Adsiger, disant que l'aiguille fait un angle de  $5^{\circ}$  avec le méridien. Le géographe Delisle possédait un manuscrit dédié à Sébastien Cabot, par un pilote de Dieppe nommé Crignon, dans lequel il était question de la déclinaison. C'est pourquoi Cabot passe souvent pour l'avoir découverte, vers 1500.



Fig. 1038.

**1502. Inclinasion.** — Supposons qu'on suspende, par son centre de gravité, une aiguille d'acier non aimantée, mobile dans tous les sens autour de ce point, elle restera en équilibre dans quelque position qu'on la mette. Si ensuite on l'aimante, on la verra se placer dans le méridien magnétique, en s'inclinant fortement sur l'horizon. On nomme *angle d'inclinasion* le plus petit des angles que fait avec l'horizon l'axe magnétique

de l'aiguille mobile, dans le méridien magnétique, autour d'un axe qui passe par son centre de gravité. Ce résultat peut être facilement observé au moyen de notre *aiguille libre* (fig. 1038). Cette aiguille peut tourner autour d'un axe horizontal *oo'*, passant par son centre de gravité, et appuyé sur les branches d'une fourchette renversée suspendue à un fil de soie sans torsion *c*, de manière qu'elle peut prendre toutes les positions sans jamais rencontrer d'obstacle. La figure 1039 représente une autre forme de cet appareil, permettant de mesurer l'angle d'inclinasion. L'axe de rotation de l'aiguille *sn* tourne au centre d'un cercle gradué *cc*, suspendu en *c* sur une pointe de bronze par l'intermédiaire d'une chape en agate. Le plan de ce cercle se tourne spontanément dans le méridien magnétique, et l'aiguille, qui peut passer entre les lames de cuivre *ll*, indique l'inclinasion.

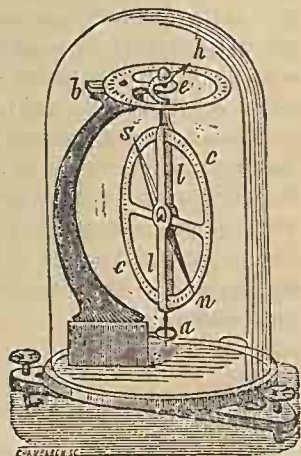


Fig. 1039.

L'inclinasion a été découverte, à Londres en 1576, par Robert Norman, fabricant d'instruments de marine. Il reconnut qu'une aiguille qui se tenait horizontale sur son pivot avant d'être aimantée, prenait une position inclinée, après l'aimantation. Ce fait, remarqué antérieurement, avait toujours été attribué à un déplacement du centre de gravité produit pendant l'aimantation. C'est après

avoir reconnu que le poids nécessaire pour ramener l'aiguille à la position horizontale devait être d'autant plus fort que la latitude était plus élevée, que Norman découvrit l'inclinaison.

L'inclinaison éprouve, comme la déclinaison, des *variations* et des *perturbations*, mais moins prononcées.

L'inclinaison n'est pas la même, à une même époque, aux différents points de la surface du globe. Dans notre hémisphère, c'est l'extrémité nord de l'aiguille aimantée qui plonge vers la terre; à Paris, son axe fait avec l'horizon un angle de 65° environ. On voit cet angle augmenter à mesure qu'on se rapproche du pôle, et diminuer quand, au contraire, on marche vers l'équateur; et près de cette ligne, on trouve sur chaque méridien un point où l'aiguille se tient horizontale. Si l'on dépasse ce point, en marchant vers le sud, l'inclinaison reparaît; mais c'est alors l'extrémité *sud* de l'aiguille qui s'abaisse vers le sol, et de plus en plus à mesure qu'on approche du pôle austral de la terre.

**Équateur magnétique. Pôles magnétiques.** — Tous les points voisins de l'équateur où l'inclinaison est nulle, forment une courbe continue, s'écartant peu de la ligne équinoxiale qu'elle coupe en plusieurs points; on nomme cette courbe *ligne sans inclinaison* ou *équateur magnétique*. — Près des pôles terrestres, il y a des points où l'aiguille se place verticalement; on les nomme *pôles magnétiques* du globe.

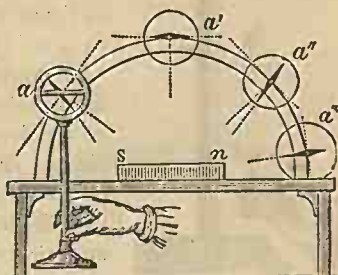


Fig. 1040.

Nous étudierons en détail la *déclinaison* et l'*inclinaison*, quand nous nous occuperons de la distribution du magnétisme terrestre, et nous décrirons alors les instruments destinés à mesurer ces angles avec précision.

**1503. La terre agit comme un aimant.** — Pour expliquer la direction que prend spontanément l'aiguille aimantée, on supposa d'abord un centre d'attraction situé au delà des étoiles, dans la direction du pôle de la sphère céleste, ou du pôle de l'écliptique. Cardan croyait que la force directrice émanait d'une petite étoile de la queue de la Grande-Ourse. Descartes imaginait un tourbillon de matière subtile allant du sud au nord et passant à travers les pores de l'aimant, dont les molécules étaient branchues et résistaient plus dans une direction que dans l'autre. Cependant longtemps auparavant, en 1600, Gilbert avait donné une explication rationnelle, qui consiste à considérer la terre comme un aimant gigantesque dont la ligne neutre est à l'équateur magnétique, et dont les pôles sont situés dans les zones glaciales. Voici les expériences sur lesquelles il s'appuyait :

1° Une aiguille aimantée placée sur un aimant se dirige suivant la ligne des pôles de ce dernier, de manière que les pôles de nom contraire soient en regard ;

de même qu'elle se dirige du nord au sud quand elle est abandonnée à elle-même.

2° On place un aimant  $sn$  (fig. 1040) au centre et dans le plan d'un demi-cercle qui représente un méridien terrestre, et l'on porte une aiguille aimantée,  $a$ , aux différents points de ce demi-cercle, dans le plan duquel elle est mobile; on la voit faire des angles de plus en plus petits avec la tangente à la circonférence, quand, partant de  $a$ , on l'approche de la position  $a'$ , où elle se confond avec la tangente; puis elle s'incline de plus en plus par le pôle de nom contraire au pôle  $n$ , comme on le voit en  $a''$ , et finit par se placer en  $a'''$ , normalement à la circonférence. En assimilant la tangente, au plan de l'horizon terrestre, on voit qu'on a une imitation des variations qu'éprouve l'inclinaison sur un même méridien.

3° La force magnétique du globe, déduite de la rapidité des oscillations de l'aiguille aimantée, va en augmentant, comme nous le verrons (1560), quand, en partant de l'équateur magnétique, on s'avance vers l'un ou l'autre pôle, comme lorsqu'on la transporte de  $a'$  en  $a$  ou en  $a'''$  (fig. 1040).

4° Action de la terre sur le fer. — Les aimants ont la propriété de décomposer le magnétisme neutre du fer doux; si donc la terre se comporte comme un aimant, elle doit aussi agir sur le fer. C'est, en effet, ce qui a lieu: Si l'on dresse verticalement une barre de fer,  $AB$  (fig. 1041), elle devient un aimant, dont le pôle nord se trouve en bas. On le reconnaît en approchant une aiguille aimantée  $ab$ ; on voit son pôle nord attiré par les parties supérieures de la barre, et repoussé par les parties inférieures, tandis que en  $M$ , devant la ligne neutre, elle reste indifférente. Cet état magnétique de la

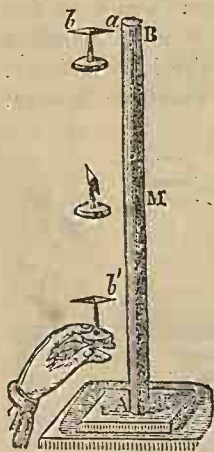


Fig. 1041.

barre ne provient pas d'une aimantation permanente qu'elle pourrait posséder accidentellement; car, si on la retourne bout à bout, elle présente encore un pôle nord à sa partie inférieure. Dans l'hémisphère austral, elle prendrait un pôle sud en bas. Si l'on frappe d'un coup de marteau l'extrémité de la barre pendant qu'elle est verticale, elle conserve pendant quelque temps son état d'aimantation, le choc développant de la force coercitive (1500). Pour avoir le maximum d'effet, il faudrait placer la barre dans le méridien magnétique, parallèlement à l'aiguille d'inclinaison qui indique, comme nous allons le voir, la direction du magnétisme terrestre.

Les barres de fer verticales, tiges de paratonnerres, espagnolettes, tuyaux de poêle sont aussi aimantées par l'influence terrestre. L'acier trempé lui-même peut prendre ainsi un état d'aimantation temporaire, comme l'a remarqué Barlow; ce qui s'explique dans l'hypothèse de M. Woestyn (1500). Les outils d'acier, suspendus verticalement dans les ateliers, sont souvent aimantés, et d'une manière permanente.

Suivant Gilbert, auquel sont dues les expériences précédentes, l'aimantation des barres de fer verticales a été découverte, à Mantoue, sur la tige de la girouette du couvent des Augustins. L'aimantation permanente a été observée pour la première fois, à Rimini, sur une barre de fer placée au sommet d'une tour de l'église Saint-Augustin, par le chirurgien J. César. En 1630, Gassendi constata qu'une croix tombée de vétusté du haut du clocher de l'église Saint-Jean, à Aix, était aimantée; la rouille qui en recouvrait le pied l'était surtout fortement. Les aimants naturels sont probablement produits par l'action prolongée du globe, et, dans notre hémisphère, leur pôle nord doit se trouver en bas avant qu'on ne les déplace, et en haut, dans l'hémisphère austral.

**1504. Pôle austral et pôle boréal des aimants.** — La terre se comportant comme un aimant, on a donné le nom de *fluide boréal* au fluide qui domine au pôle boréal, et le nom de *fluide austral* à celui qui domine à l'autre pôle. Comme les fluides de nom contraire s'attirent, il faut que le fluide qui agit au pôle nord d'un aimant soit du fluide *austral*, et celui qui agit au pôle sud, du

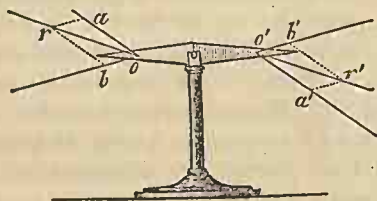


Fig. 1042.

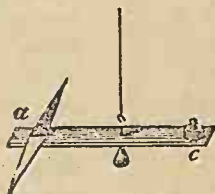


Fig. 1043.

fluide *boréal*. De là l'usage où l'on est, principalement en France, d'appeler le pôle nord d'un aimant pôle austral, et le pôle sud, pôle boréal. Ces expressions sont en apparence contradictoires; mais les mots pôle nord et pôle sud expriment simplement le fait, et sont indépendants de toute théorie, tandis que les termes pôle austral et pôle boréal désignent la nature des fluides qui sont censés dominer dans les pôles de l'aimant d'après la théorie de Coulomb. Comme cette théorie n'est plus admise, et pour éviter toute confusion, nous continuerons de désigner par les mots nord et sud ou par les signes  $+$  et  $-$ , les pôles qui se tournent vers le nord et vers le sud.

**1505. L'ACTION DE LA TERRE EST SEULEMENT DIRECTRICE.** — Soit  $o, o'$  (fig. 1044) les pôles mathématiques d'une aiguille aimantée mobile dans le méridien magnétique. En  $o$  est appliquée une force attractive  $ob$ , et en  $o'$  une force répulsive  $o'b'$ , provenant des actions magnétiques de l'hémisphère terrestre qui se trouve du côté du pôle  $o$ . Ces deux forces sont égales et parallèles, car la longueur  $oo'$  est insensible par rapport à la distance au point d'où elles émanent, et les deux moitiés de l'aiguille aimantée renferment les mêmes quantités de fluides libres, puisque ces fluides formeraient du magnétisme neutre en se combinant. De même l'hémisphère qui se trouve du côté de  $o'$  donne deux

forces  $o'd'$ ,  $oa$  égales, parallèles et de sens contraire. Les forces appliquées aux pôles  $o$  et  $o'$  peuvent être remplacées par les résultantes  $or$ ,  $o'r'$ , qui sont évidemment égales, parallèles et de sens contraire, et forment par conséquent un couple. Ce couple a pour effet de faire tourner l'aiguille dans le plan qu'elle peut parcourir jusqu'à ce que la ligne  $oo'$  ait pris la direction, invariable pendant le mouvement, des forces  $or$ ,  $o'r'$ .

Un couple ne pouvant que faire tourner le système auquel il est appliqué, l'action magnétique de la terre ne peut imprimer à un aimant de mouvement de translation. Cette conséquence se vérifie par l'expérience. D'abord, pour montrer qu'il n'y a pas de composante verticale, on suspend un barreau d'acier au bassin d'une balance, et l'on établit l'équilibre. On aimante ensuite ce barreau, et l'on constate que l'équilibre a toujours lieu, dans quelque position qu'on le place. — Il n'y a pas non plus de composante horizontale; car un aimant posé sur un morceau de liège flottant sur l'eau, tourne pour se placer dans le méridien magnétique, mais ne se transporte pas. Une aiguille aimantée  $a$  (fig. 1043), posée dans une position quelconque sur une bande de bois  $ac$  suspendue à un fil sans torsion, se place exactement dans le méridien magnétique. Enfin, si l'on suspend une aiguille aimantée à un long fil, ce fil reste exactement vertical.



Fig. 1044.

On conclut de là qu'il ne peut pas y avoir de résultante oblique; car cette force pourrait être décomposée en deux autres, l'une horizontale, l'autre verticale; et nous venons de voir que de semblables composantes n'existent pas.

#### 1506. Aiguille d'inclinaison dans divers azimuts.

— L'aiguille d'inclinaison mobile dans le méridien magnétique, indique la direction de l'action magnétique du globe.

L'angle qu'elle fait alors avec l'horizon est le plus petit possible; car si l'on fait tourner autour de la verticale le plan dans lequel elle se meut, on la voit s'incliner de plus en plus, et devenir verticale quand ce plan est perpendiculaire au méridien magnétique. Pour expliquer ces résultats, soit  $oab$  (fig. 1044), le méridien magnétique,  $ob$  l'axe de l'aiguille aimantée dans ce plan, et  $acb$  un plan horizontal. Décrivons une circonférence horizontale sur  $ab$  comme diamètre; on démontre que si l'on fait tourner le plan vertical dans lequel se meut l'aiguille, autour de la verticale  $oa$  qui passe par son centre de gravité, son axe formera toujours une des arêtes du cône  $oacbe$ . En effet, soit  $oac$  une des positions du plan qui contient l'aiguille; il est facile de voir qu'elle sera en équilibre quand son axe sera dirigé suivant  $oc$ . Car la force terrestre est dirigée suivant  $cf$  parallèle à  $ob$ ; cette force, comprise dans le plan du triangle  $ocb$ , peut se décomposer en deux autres, l'une dirigée suivant le prolongement de  $oc$ , l'autre suivant  $cb$ . La première composante est détruite par la résistance de l'axe de suspension  $o$ , et  $cb$  ne peut avoir d'effet pour déplacer l'aiguille dans le plan  $oac$ , puisque cette composante est perpendiculaire à ce

plan, comme étant perpendiculaire à la fois à  $ac$ , puisque  $ab$  est un diamètre, et à  $oc$ , le point  $a$  étant le pied de la perpendiculaire abaissée du point  $o$  sur le plan  $acb$ . La composante  $cb$  ferait au contraire mouvoir l'aiguille, si son axe rencontrait  $ac$  en un point situé hors de la circonférence  $acb$ ; car on pourrait la décomposer en deux forces, l'une perpendiculaire au plan  $oac$ , l'autre nécessairement oblique, qui ferait mouvoir l'aiguille. Cette aiguille prendra donc d'elle-même la direction  $oc$ . — Il résulte de là que l'angle  $aob$ , dans le méridien magnétique, est maximum, et par conséquent que l'angle d'inclinaison, qui en est le complément, est *minimum*. Dans le plan perpendiculaire à  $oab$ , plan tangent au cône  $oacbe$ , l'axe de l'aiguille prend la direction  $oa$ . Il est facile de voir directement que, dans cette position, elle est en équilibre.

Quand on veut mesurer l'angle d'inclinaison, on peut, en faisant tourner autour d'un axe vertical le plan dans lequel se meut l'aiguille, chercher par tâtonnement la position dans laquelle elle fait le plus petit angle avec l'horizontale; ou bien on peut d'abord placer ce plan de manière que l'aiguille soit verticale, puis le faire tourner de  $90^\circ$ .

Dans cette manière de procéder, au moment où l'angle approche de son maximum ou de son minimum, la composante qui sollicite l'aiguille est très faible, de sorte que le moindre frottement sur son axe de rotation l'empêche de prendre sa véritable direction. On évite cette difficulté en faisant deux observations, dans deux plans perpendiculaires entre eux et éloignés des positions du maximum et du minimum. Soient  $oac$ ,  $oae$  ces deux plans. Dans le triangle rectangle  $cae$ , on a  $\overline{ce}^2 = \overline{ab}^2 = \overline{ac}^2 + \overline{ae}^2$ . Or, les triangles  $oab$ ,  $oac$ ,  $oae$  donnent  $ab = \overline{oa} \operatorname{tang} i$ ;  $ac = \overline{oa} \operatorname{tang} \beta$ ;  $ae = \overline{oa} \operatorname{tang} \alpha$ . L'équation devient donc :

$$\operatorname{tang}^2 i = \operatorname{tang}^2 \beta + \operatorname{tang}^2 \alpha; \quad \text{d'où} \quad \cot I = \sqrt{\cot^2 \alpha + \cot^2 \beta},$$

en représentant par  $I$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  les compléments des angles  $i$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . — Nous verrons (1552), que cette méthode perd de sa précision, dans la pratique, à cause du mode de suspension de l'aiguille.

**Conséquences.** 1<sup>o</sup> On peut, au moyen des angles  $\alpha$  et  $\beta$ , trouver la position du *méridien magnétique*, en déterminant l'angle  $cab$  qu'il fait avec le plan  $oac$ . En effet, les triangles rectangles  $bca$ ,  $bea$  donnent  $\overline{ac} = \overline{ab} \cos \overline{cab}$ , et  $\overline{ae} = \overline{ab} \cdot \cos \overline{cab} = \overline{ab} \cdot \sin \overline{cab}$ . En divisant les deux égalités membre à membre, il vient  $ae : ac = \operatorname{tang} \overline{cab}$ , ou  $\operatorname{tang} \overline{cab} = \operatorname{tang} \alpha : \operatorname{tang} \beta$ , en remplaçant  $ae$  et  $ac$  par leur valeur ci-dessus.

2<sup>o</sup> Coulomb a reconnu que, pour maintenir l'aiguille *horizontale*, ou, en général, dans une position faisant un angle constant avec l'horizon, il faut la charger d'un même poids à l'extrémité sud, quel que soit l'azimut dans lequel on la place. En effet, quand l'aiguille est horizontale, la force terrestre  $f$  donne deux composantes, l'une horizontale qui est détruite, l'autre verticale égale à  $f \sin I$ , la force  $f$  faisant l'angle ( $90^\circ - I$ ) avec la verticale; et cette composante est indépendante de l'azimut.

**1507. Aiguilles astatiques.** — Une aiguille aimantée est dite *astatique* quand elle n'est pas influencée par le magnétisme terrestre. On rend une aiguille astatique, en disposant dans le méridien magnétique un aimant dont le pôle le plus rapproché de l'aiguille s'oppose à l'action de la terre. En éloignant plus ou moins cet aimant, on finit par rendre l'aiguille indifférente. L'aimant doit être assez fort pour agir de loin, afin que les actions de ses pôles forment un couple à forces constantes; la différence de distance à cet aimant, des pôles de l'aiguille, étant insensible dans toutes les positions de celle-ci.

On obtient encore un *système astatique* au moyen de deux aiguilles identiques et de même force magnétique  $ab, a'b'$  (fig. 1045), réunies l'une à l'autre par une tige rigide  $n$  et dont les pôles opposés sont tournés du même côté. Il est évident que les actions de la terre sur les deux aiguilles se contrebalancent. Si l'une



Fig. 1045.

d'elles,  $ab$ , est plus forte que l'autre, on l'incline de manière à rapprocher ses pôles de l'axe de suspension ce qui diminue l'action de la composante horizontale de la force terrestre, et l'on parvient par tâtonnement à rendre le système indifférent.

Ampère a construit une *aiguille astatique*, en plaçant le plan dans lequel elle peut tourner, perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, c'est-à-dire à la force magnétique terrestre. L'aiguille est mobile dans le plan d'un cercle divisé (fig. 1046) fixé à une roue dentée verticale  $r$ , sur laquelle agit une vis sans fin  $vv'$ . Le support de la roue  $r$  est lui-même porté par une seconde roue dentée horizontale  $s$ , que commande la vis tangente  $u$ . Au moyen de ces deux roues, on peut amener par tâtonnement le plan du cercle que parcourt l'aiguille à être perpendiculaire à la force magnétique terrestre.



Fig. 1046. — 1/3.

### § 3. — COMPARAISON DES FORCES MAGNÉTIQUES

#### I. Lois des attractions et répulsions magnétiques.

**1508.** *Les intensités des attractions et des répulsions magnétiques varient en raison inverse des carrés des distances des centres d'action.* Cette loi, soupçonnée par Tobie Mayer et adoptée par Mitchell et par Lambert, a été démontrée par Coulomb au moyen des deux méthodes suivantes<sup>1</sup> :

<sup>1</sup> Mémoires de l'ancienne Académie des Sciences de Paris, de 1784 à 1790.



**1. Méthode des oscillations.** — Une aiguille horizontale *astatique* oscille sous l'influence de l'un des pôles d'un aimant vertical, assez long pour que son autre pôle n'agisse pas sur l'aiguille. Celle-ci doit être assez courte pour que les forces qui agissent sur ses pôles puissent être considérées comme égales et parallèles dans toutes ses positions. Les oscillations suivent alors les lois de celles du pendule (I, 129). Si donc on fait deux expériences consécutives en plaçant le pôle de l'aimant à des distances différentes  $d, d'$  du centre de l'aiguille, les forces magnétiques  $m, m'$  seront entre elles comme les carrés des nombres  $n, n'$  des oscillations accomplies dans le même temps. On aura donc  $n^2 : n'^2 = m : m'$ . Or, l'expérience montre que les quantités  $n, n', d, d'$  satisfont à la relation  $n : n' = d' : d$ ; d'où  $m : m' = d'^2 : d^2$ .

On peut aussi opérer au moyen d'une aiguille aimantée non *astatique* : soit  $N$  le nombre d'oscillations qu'elle fait sous l'influence de la terre seule,  $n$  ce nombre quand elle oscille sous l'influence des actions du globe et du pôle d'un aimant placé dans le méridien magnétique, et  $n'$  ce nombre quand l'aimant est plus éloigné; en appelant  $F, m, m'$  les forces magnétiques du globe, et de l'aimant aux deux distances considérées, on aura

$$N^2 : n^2 = F : (m + F), \quad N^2 : n'^2 = F : (m' + F), \quad \text{d'où, } \textit{componendo},$$

$$(n^2 - N^2) : m = N^2 : F, \quad \text{et} \quad (n'^2 - N^2) : m' = N^2 : F; \quad \text{d'où enfin}$$

$$m : m' = (n^2 - N^2) : (n'^2 - N^2).$$

L'aiguille oscillante dont se servait Coulomb était suspendue par un fil de soie sans torsion; elle pesait 3<sup>gr</sup>,75, et faisait 15 oscillations par minute sous l'influence du globe. L'aimant vertical était formé d'un fil d'acier, et son pôle mathématique était à 30<sup>mm</sup> de l'extrémité. Le pôle se trouvait dans le plan horizontal de l'aiguille quand celle-ci restait horizontale et faisait le maximum d'oscillations dans un temps donné.

**1509. II. Balance magnétique.** — Dans la seconde méthode, on emploie la *balance de torsion* ou *balance de Coulomb*, instrument des plus précis, que l'inventeur avait déjà appliqué à l'étude des forces électriques, comme nous le verrons plus loin. La *balance magnétique* consiste en une cage de verre, cylindrique ou rectangulaire (*fig. 1047*), fermée par une glace que surmonte en son milieu un tube de verre  $t$ . A la partie supérieure de ce tube est suspendu un fil métallique qui soutient une aiguille aimantée horizontale  $ac$ . Une bande, sur laquelle sont tracées des divisions qui correspondent à des angles de 1°, règne tout autour de la cage de verre, à la hauteur de l'aiguille. Ces divisions sont les degrés de la circonférence, quand la cage est cylindrique. Le fil de suspension s'enroule sur un petit treuil, représenté à part en  $o$ , porté par un bouchon métallique un peu conique qui s'enfonce à frottement doux dans un disque divisé en degrés. Ce disque peut tourner sur une virole  $v$  fixée au tube  $t$ . Il résulte de cette disposition, qu'on peut tordre le fil  $f$  par le haut, soit en

faisant tourner le bouchon  $r$ , soit en faisant tourner le disque gradué, dont un vernier tracé sur la virole  $v$  indique le déplacement angulaire.

On commence par placer l'aiguille  $ac$  dans le méridien magnétique, sans que le fil soit tordu, ce dont on s'assure en remplaçant cette aiguille par une baguette de cuivre de même poids. Après avoir remis l'aiguille en place, on en approche, dans le méridien magnétique, le pôle d'un mince aimant  $A$ , que l'on fait passer par une ouverture du couvercle. Les pôles en présence étant supposés de même nom, l'aiguille est repoussée, et fait avec le méridien magnétique un angle que l'on mesure sur la division qui entoure la cage. Cet angle est aussi l'angle de torsion, et sert de mesure à la force de torsion. Cette force, jointe à l'action magnétique de la terre, fait équilibre à la répulsion de l'aimant, pour la distance où son pôle se trouve du pôle de l'aiguille  $ac$ . Si donc  $m$  représente la répulsion magnétique,  $\alpha$  la force de torsion, et  $\theta$  celle qu'il faudrait pour amener l'aiguille dans la position qu'elle occupe, si la terre agissait seule, on aura  $m = \alpha + \theta$ , pour la valeur de la force magnétique exercée à la distance correspondant à l'angle d'écart.

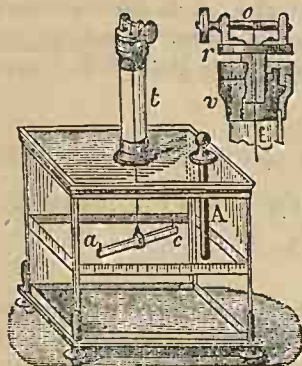


Fig. 1047.

Si maintenant on tord le fil à son extrémité supérieure, de l'angle  $\beta$ , de manière à rapprocher le pôle  $c$ , de l'aimant  $A$ , la répulsion  $m_1$  agira à une distance moindre, et si  $\alpha_1$  est l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique,  $\beta + \alpha_1$  sera l'angle de torsion. En appelant  $\theta_1$  la force de torsion qui représente l'action terrestre dans cette nouvelle position de l'aiguille, on aura  $m_1 = \beta + \alpha_1 + \theta_1$ . L'expérience montre que les valeurs de  $m$

et  $m_1$  satisfont très-sensiblement à la relation  $m = m_1 = \alpha^2 = \alpha_1^2$ .

Pour vérifier la loi dans le cas des attractions, il faut tordre le fil par le haut, de manière à écarter l'extrémité  $c$  de l'aiguille, du pôle de l'aimant  $A$  qui l'attire. L'angle de torsion est alors égal à la quantité dont on a fait tourner la virole supérieure, diminuée de l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique, et l'attraction  $m'$  est donnée par l'égalité  $m' = \beta - \alpha - \theta_1$ , en adoptant les mêmes notations que ci-dessus.

L'aiguille aimantée dont se servait Coulomb était un fil d'acier de 650<sup>mm</sup> de long et de 3<sup>mm</sup>,4 de diamètre; au-dessous était suspendue une lame verticale de laiton plongeant dans l'eau, destinée à amortir les oscillations. L'aimant fixe était identique à l'aiguille mobile, et leur point de croisement se trouvait à 27<sup>mm</sup> des extrémités. L'action du globe avait été évaluée d'avance; Coulomb la supposait proportionnelle à l'angle très-petit formé par l'aiguille avec le méridien magnétique, les angles étant pris pour leurs sinus.

**1510. Causes d'erreur.** — Dans cette manière d'opérer, il y a différentes

causes d'erreur : d'abord, les points de l'aimant fixe qui agissent sur l'aiguille mobile ne sont pas seulement ceux qui se trouvent dans la section faite par le plan horizontal qui la contient ; des points placés au-dessous et au-dessus de cette section agissent aussi, et d'une manière plus sensible, relativement, quand la distance est plus grande, parce que l'obliquité est alors moins prononcée. L'effet observé est donc très-complexe, et la loi ne se vérifie qu'approximativement ; car elle n'est rigoureusement vraie que pour deux *éléments magnétiques*. — D'un autre côté, les distances sont comptées sur des arcs, au lieu de l'être sur leur corde ; et l'action s'exerce obliquement à la direction de l'aiguille. Il est facile de voir que les deux dernières causes d'erreur sont très-petites pour les faibles écarts, et qu'elles tendent à se compenser. En effet, on prend les distances trop grandes en les comptant sur l'arc, et les forces, aussi trop grandes en les considérant tout entières, au lieu de prendre leur composante normale à l'aiguille. On peut, du reste, tenir compte de ces deux causes d'erreur, par la méthode suivante :

Soit  $oa$  (fig. 1048) l'aiguille dans le méridien magnétique,  $oa'$  sa position quand elle est soumise à l'influence de l'aimant  $b$ . La distance à laquelle la répulsion s'exerce est représentée par la corde  $aa'$  ou par  $2ac$ . Or, en posant  $aoa' = \alpha$ , et  $oa = l$ , on a  $ac = l \sin \frac{1}{2} \alpha$ . La distance est donc  $d = 2l \sin \frac{1}{2} \alpha$ . La force répulsive  $a'r$  se décompose en deux autres : l'une sur le prolongement de  $oa'$ , l'autre perpendiculaire à  $oa'$ . Cette dernière composante, dont la valeur est  $r \cos \frac{1}{2} \alpha$ , fait équilibre à la force de torsion et à l'action directrice du globe. Si  $t$  est la force de torsion correspondant à  $1^\circ$ , et  $F$  la composante horizontale de la force magnétique du globe, on aura donc

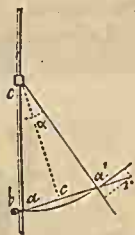


Fig. 1048.

$$r \cos \frac{1}{2} \alpha = at + F \sin \alpha, \quad \text{d'où} \quad r = \frac{at + F \sin \alpha}{\cos \frac{1}{2} \alpha}.$$

Pour obtenir un écart moindre,  $\alpha'$ , on tourne la virole supérieure de la balance magnétique, d'une quantité  $\beta$  ; la distance  $aa'$  est alors remplacée par la distance  $d' = 2l \sin \frac{1}{2} \alpha'$ , et la répulsion magnétique devient

$$r' = \frac{(a' + \beta) t + F \sin \alpha'}{\cos \frac{1}{2} \alpha'}.$$

On compare ensuite les valeurs de  $r$  et  $r'$  aux carrés des valeurs de  $d$  et  $d'$ .

On peut faire autrement : si la loi du carré des distances est vraie, et si l'on désigne par  $\varphi$  la force répulsive à l'unité de distance, par  $\alpha$  l'angle d'écart, et par  $b$  l'angle total de torsion, on aura

$$\frac{\varphi}{d^2}, \quad \text{ou} \quad \frac{\varphi}{4l^2 \sin^2 \frac{1}{2} \alpha} = \frac{bt + F \sin \alpha}{\cos \frac{1}{2} \alpha}, \quad \text{d'où} \quad \frac{\varphi}{4l^2} = (bt + F \sin \alpha) \sin \frac{1}{2} \alpha \tan \frac{1}{2} \alpha.$$

Le premier membre étant constant, il devra en être de même du second, quels que soient  $\alpha$  et  $b$ , si la loi des carrés est vraie ; et c'est ce qui a lieu.

## II. Comparaison des aimants. — Distribution du magnétisme.

**1511. Comparaison de la force des aimants.** — Pendant longtemps on a comparé la force des aimants en cherchant le poids maximum qu'ils pouvaient porter. Ce moyen ne donne qu'une approximation grossière, ce poids dépendant de plusieurs circonstances, entre autres de la masse et de la forme du fer attiré auquel est suspendue la charge. Aujourd'hui, on emploie les oscillations ou la balance de torsion. Pour la méthode des oscillations, on procède comme nous l'avons indiqué ci-dessus (1508); seulement, au lieu d'un même aimant placé à différentes distances, on fait agir successivement les aimants à comparer, en les plaçant toujours à la même distance de l'aiguille. Celle-ci doit être assez éloignée pour que son état magnétique ne puisse être modifié par les aimants.

La balance de torsion s'emploie comme nous l'avons dit plus haut (1509); seulement, après avoir introduit successivement en A (fig. 1047) le pôle de chacun des aimants que l'on veut comparer, on a soin, en tordant plus ou moins le fil de suspension par le haut, d'écarter toujours également du méridien magnétique l'aiguille mobile.

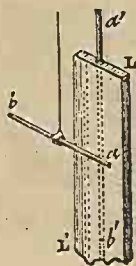


Fig. 1049.

**Moment magnétique d'un aimant.** — On peut encore placer les aimants dans un étrier fixé au fil de suspension de la balance de torsion, de manière qu'ils restent dans le méridien magnétique sans qu'il y ait de torsion. On cherche ensuite de combien de degrés il faut faire tourner le micromètre supérieur pour obtenir un écart constant pour tous les aimants que l'on compare : les forces de torsion ainsi obtenues pour les divers aimants, représentent ce que Coulomb a désigné sous le nom de *moment magnétique* de ces aimants.

Le moment magnétique dépend à la fois de l'intensité magnétique des pôles et de leur distance à l'axe de suspension. Nous verrons plus loin des expériences dans lesquelles les trois méthodes que nous venons d'indiquer sont utilement employées.

**1512. Distribution du magnétisme dans les aimants, suivant la longueur.** — Coulomb a procédé au moyen de sa balance magnétique ou en servant de la méthode des oscillations. Avant lui, on se contentait de chercher le poids maximum que l'aimant pouvait soutenir en ses différents points.

**Méthode par la balance de torsion.** — On introduit dans la balance une règle verticale de bois LL' (fig. 1049), de manière qu'elle touche l'aiguille mobile ab, placée dans le méridien magnétique, sans torsion du fil de suspension. La règle porte, du côté opposé, une rainure dans laquelle on fait glisser verticalement une aiguille cylindrique aimantée a'b', dont le pôle b' est de nom contraire au pôle a, qui est alors repoussé; on la ramène dans le méridien magnétique en tordant le fil par le haut, et l'angle de torsion mesure la force

répulsive exercée. On fait ensuite descendre l'aimant  $a'b'$ , de manière à présenter une autre section à l'aiguille mobile, et l'on observe un autre angle de torsion. Comme l'aimant est très-près de l'aiguille, il n'y a que la section droite, située en face du pôle  $a$ , qui agisse efficacement, les sections au-dessus ou au-dessous agissant très-obliquement.

**Méthode des oscillations.** — Pour appliquer cette méthode, Coulomb faisait osciller un petit aimant  $a$  (fig. 1051) suspendu à un fil de cocon, en face des différentes sections d'un fil d'acier aimanté  $oo'$ , placé verticalement dans le méridien magnétique. L'aimant  $a$ , dont on voit la coupe en  $b$ , avait reçu le maximum d'aimantation, afin que son état ne pût pas être influencé par le magnétisme différent des divers points de l'aiguille  $oo'$ , dont il était toujours également éloigné. Si l'on désigne par  $m$  et  $m'$  les intensités magnétiques en deux points différents, par  $N, n, n'$ , les nombres d'oscillations de l'aimant  $a$  sous l'influence de la terre seule, et sous cette influence réunie à celle d'un des deux points considérés, on aura (1508)  $m : m' = n^2 - N^2 : n'^2 - N^2$ .

**1513. Méthode par arrachement.** —

Pour comparer les intensités magnétiques aux différents points d'un aimant, M. Jamin mesure les efforts nécessaires pour en séparer un bout de fil de fer terminé par une petite boule, qu'on applique successivement en ces divers points<sup>1</sup>. Cette boule, ou *clou d'épreuve*,  $s$  (fig. 1050), est suspendue au bras B d'une balance, et l'aimant, dont l'extrémité se voit en  $m$ , est porté par un chariot  $c$  mobile sur des rails. Pour mesurer la *force d'arrachement*, on tend peu à peu le ressort  $r$  en faisant tourner le treuil  $t$ , sur lequel s'enroule un cordon de soie attaché au ressort. Une tête divisée  $d$  permet de compter le nombre  $n$  de tours qu'il faut faire à ce treuil pour que la tension produise l'arrachement de  $n$ ; on en déduit l'allongement  $l$  éprouvé par le ressort. La tension  $P$  de ce ressort est alors donnée par la formule  $l = KLP$ , comme pour les barres étirées (I, 501);  $L$  étant la longueur du ressort. En désignant par  $r$  le rayon du treuil, on aura  $l = 2\pi rn$ , et par conséquent  $2\pi rn = KLP$ ; d'où  $P = \frac{2\pi r}{KL} n = kn$ . La constante  $k$  s'évalue directement en mettant en B un poids connu, et cherchant le nombre de tours nécessaires pour qu'il y ait équilibre.

L'intensité au point touché est égale, d'après Coulomb, à  $\sqrt{P}$ , le magnétisme  $\mu$  de ce point, développant dans la boule  $s$ , une quantité égale de fluide de nom contraire, de manière que la force d'arrachement doit vaincre une résistance magnétique proportionnelle à  $\mu^2$ . Pour rendre comparables les mesures faites

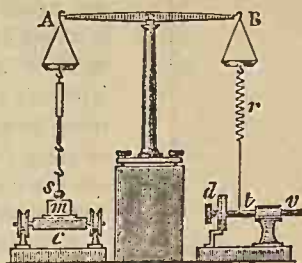


Fig. 1050.

<sup>1</sup> Journal de physique de M. d'Almeida, t. V, p. 41.

sur différents barreaux, on les ramène à celles qu'on obtiendrait avec un cylindre de fer de 0<sup>cm</sup>,1 de diamètre et de 15<sup>cm</sup> au moins de longueur. Deux expériences faites au même point d'un aimant,  $m$ , l'une avec ce cylindre et l'autre avec le clou d'épreuve, donnent le facteur par lequel il faut multiplier les résultats obtenus avec ce dernier, pour passer à ceux que donnerait le cylindre de fer, qui est moins commode à employer. Du reste, M. Jamin a reconnu que la force d'arrachement du cylindre est proportionnelle à sa section, et que la base de contact peut être arrondie sans changer cette force.

**1514. Distribution dans un aimant linéaire.** — Coulomb a représenté

les intensités aux différents points d'une aiguille linéaire  $oo'$  par des perpendiculaires, dont il a réuni les extrémités par une courbe; seulement il a doublé les résultats obtenus aux deux extrémités, parce que l'aimant oscillant  $a$  est sollicité par des points placés au-dessus et au-dessous de la section de l'aiguille  $oo'$  située à la même hauteur, et qu'il manque la moitié de ces points quand on arrive à l'extrémité. Cette manière de procéder est justifiée par l'observation des intensités près d'un point conséquent : la courbe est symétrique de part et d'autre de la perpendiculaire qui passe par ce point, et elle présente la même forme générale que celle que l'on construit en doublant l'intensité à l'extrémité libre.

La figure 1051 montre la forme de la courbe pour un aimant cylindrique très-allongé. On voit qu'il y a un espace neutre  $nn'$ , à partir duquel la force magnétique va en augmentant de plus en plus rapidement. La courbe reste la même pour des aimants de longueur différente, mais de même section, quand la longueur surpasse 25<sup>cm</sup>; l'espace neutre  $nn'$  varie seul.

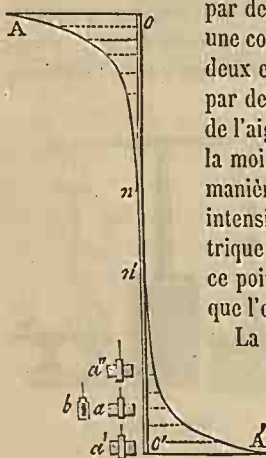


Fig. 1051.

Les pôles de l'aimant  $oo'$  correspondent au centre de gravité des surfaces  $Aon$ ,  $A'o'n'$ , puisqu'ils sont les points d'application des résultantes de forces proportionnelles aux ordonnées des courbes  $An$ ,  $A'n'$ . Coulomb en a déterminé la position par le calcul, et il a trouvé que les distances de ces points aux extrémités d'aiguilles cylindriques sont entre elles à peu près comme leurs diamètres. Dans les aiguilles qu'employait Coulomb, la distance était de 40<sup>mm</sup>. A égal diamètre, cette distance restait la même ainsi que la forme des courbes, quand la longueur dépassait 25<sup>cm</sup>, et le moment magnétique était proportionnel à la distance des pôles entre eux.

Quand l'aimant est très-court, les pôles sont placés à une distance des extrémités un peu plus grande que  $\frac{1}{6}$  de la longueur, et l'excès est d'autant plus petit que l'aimant est plus court; c'est qu'alors la courbe se rapproche beaucoup d'une ligne droite : le pôle est donc au centre de gravité d'un triangle, c'est-à-dire au tiers de sa hauteur à partir de la base.

Biot<sup>1</sup> en s'appuyant sur l'analogie qui existe entre les fils aimantés et les piles électriques, dont nous parlerons en traitant du condensateur électrique, a trouvé pour la courbe, l'équation logarithmique  $y = \Lambda (n^x - n^{2l-x})$ , dans laquelle les abscisses sont comptées suivant la longueur, à partir de l'extrémité nord.  $\Lambda$  et  $n$  sont des constantes, et  $2l$  la longueur de l'aiguille. Quand cette longueur est très-grande, la valeur de  $n$  est une fraction voisine de  $\frac{1}{2}$ ; on peut donc négliger  $n^{2l-x}$  devant  $n^x$ , et l'équation se réduit à  $y = \Lambda n^x$ . La distance des pôles aux extrémités est donnée par la formule

$$x = - \left( 2ln' + \frac{(1 - n^{2l})}{\log n} \right) \frac{1}{(1 - n')^2},$$

dans laquelle les logarithmes sont hyperboliques. — Si la longueur est très-grande,  $n$  est une fraction, et en négligeant ses puissances, il vient  $X = - \frac{l}{\log n}$ . Les résultats calculés au moyen de ces formules s'accordent d'une manière satisfaisante avec ceux que donne l'observation.

Green, en partant de l'hypothèse de la force coërcitive, a donné une formule qui représente le moment magnétique d'une aiguille cylindrique dans le cas où elle n'est pas trop courte. M. Bouty<sup>2</sup> a vérifié cette formule sur des aiguilles saturées ou non, et même sursaturées temporairement. Pour être sûr de l'identité de trempe et de composition de l'acier, il obtenait les aiguilles par des ruptures successives de la plus longue. Il a trouvé ainsi un accord satisfaisant entre les résultats de l'expérience et ceux que donne la formule. Cette comparaison confirme en outre la distribution trouvée par Coulomb dans les aiguilles cylindriques, car la formule de Green est liée à celle qui représente cette distribution dans les recherches de Coulomb.

**Expériences sur des fils très-fins.** — Pour se rapprocher autant que possible de la condition d'une seule file d'éléments magnétiques, Becquerel<sup>3</sup> a préparé des fils d'acier ayant moins de  $\frac{1}{20}$  de millimètre de diamètre, par le procédé de Wollaston, en les tirant à la filière après les avoir enveloppés d'une couche d'argent. Il enlevait ensuite l'argent au moyen de mercure sec. Un fil d'acier, entouré de sa gaine d'argent, afin qu'il pût rester rectiligne, était aimanté, puis suspendu dans la balance de Coulomb; et l'on opérait comme il a été dit plus haut (1512). La distribution du magnétisme s'est trouvée d'accord avec la loi établie par Biot. Le fil ayant  $\frac{1}{75}$  de millimètre de diamètre, et 128<sup>mm</sup> de longueur; les pôles étaient encore à 8<sup>mm</sup>,5 des extrémités, malgré la petitesse du diamètre.

**Courbes magnétiques.** — Les courbes que dessinent les parcelles de

<sup>1</sup> *Traité élémentaire de physique expérimentale et mathématique*, t. III, p. 75.

<sup>2</sup> *Journal de physique*, t. III, IV et V, et *Annales de l'école normale*, 1876.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXII, p. 413.

limaille dans le fantôme magnétique (1490), peuvent servir à donner une idée de la manière dont est distribué le magnétisme dans les aimants. Lambert était parvenu à trouver une équation de ces courbes. M. Roget a indiqué le moyen de les tracer soit par points, soit d'une manière continue; mais les résultats ainsi obtenus, quoique très-intéressants, ne peuvent être très-précis.

**1515. Aimants non prismatiques.** — Dans ce qui précède, il n'est question que d'aimants prismatiques, à aimantation régulière, ayant la ligne neutre au milieu. Quand l'aimant a une forme différente ou est aimanté irrégulièrement, le calcul ne peut plus donner la position des pôles, que l'on cherche alors par l'expérience. On a reconnu ainsi que, dans les aiguilles en forme de losange allongé, les pôles se rapprochent du centre, et d'autant plus que le losange est moins allongé. — Dans des anneaux bien homogènes, les pôles peuvent être aux extrémités d'un même diamètre ou de deux diamètres différents. Dans des lames larges et épaisses, l'aimantation est presque toujours irrégulière, et il y a souvent des points conséquents.

Les aimants rectilignes à section très-petite peuvent aussi être aimantés irrégulièrement, avec leurs pôles de force inégale; alors la ligne neutre est plus rapprochée du plus fort, de manière que les deux moitiés contiennent toujours la même quantité de fluide libre.

Il résulte des expériences de M. Kupffer que l'influence de la terre suffit pour déplacer la ligne neutre : dans notre hémisphère, si l'aimant est placé verticalement le pôle nord en bas, ce pôle devient plus puissant que l'autre, et la ligne neutre s'abaisse. Si l'on met le pôle sud en bas, la ligne neutre revient au milieu, et les pôles reprennent des forces égales.

De Haldat a aimanté des plaques d'acier de 2 à 3 décimètres carrés de surface et de 1 à 3<sup>mm</sup> d'épaisseur, en promenant sur leur surface l'extrémité un peu arrondie d'un fort aimant<sup>1</sup>. La limaille dessine ensuite sur ces plaques le chemin qu'a suivi l'aimant, en formant ce qu'il nomme des *figures magnétiques*. Ces figures présentent la forme de rubans, dont la largeur dépend de celle de l'aimant; la limaille s'accumule sur les bords, de manière à en marquer nettement les limites, et abandonne l'espace intermédiaire, comme cela a lieu autour des pôles des aimants quand on forme le fantôme magnétique (1490). Les figures magnétiques s'obtiennent encore quand on interpose entre l'aimant et la plaque d'acier des lames de substances non magnétiques, bois, carton...; seulement, il faut passer plusieurs fois sur les mêmes lignes, l'aimant agissant alors à une certaine distance. On peut combiner ces figures magnétiques avec les figures acoustiques de Chladni en faisant vibrer la plaque avec un archet, ce qui ne détruit pas son aimantation; mais, si l'on vient à la frapper à coups précipités avec un petit maillet de bois, elle rentre à l'état neutre, les secousses répétées faisant céder la force coercitive.

**1516. Distribution transversale du magnétisme dans les aimants.**

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 33.



— Coulomb a reconnu que la force magnétique d'un aimant va en augmentant de l'axe à la surface. Ayant taillé dans une même feuille de tôle mince 16 lames égales d'acier de 21<sup>mm</sup> de largeur et 162<sup>mm</sup> de longueur, il les aimanta à saturation et les superposa, de manière à en former des faisceaux composés successivement de 2, 3, 4..., 16 lames. Il essaya ensuite chaque faisceau dans la balance magnétique, et chercha l'angle de torsion qui pouvait l'écarter de 30° du méridien magnétique; il trouva les résultats suivants :

Nombre des lames.	1	2	4	6	8	12	16
Angles de torsion..	82°	125°	150°	172°	182°	205°	229°

On voit que la force directrice est loin d'être proportionnelle au nombre des lames, ce qui montre qu'elles réagissent les unes sur les autres, en modifiant leur état magnétique. En effet, ayant séparé les lames, Coulomb reconnut que leurs forces n'étaient plus égales et allaient en diminuant de l'extérieur à l'intérieur. Les angles de torsion nécessaires pour les éloigner de 30° du méridien magnétique étaient, pour les 8 qui se trouvaient d'un côté, en commençant par l'extérieur, 48°, 36°, 35°, 33°, 34°, 38°, 35° et 31°.

Il est à remarquer que ces résultats ne représentent pas les forces des diverses lames quand elles sont assemblées, leur état changeant quand, en les séparant, on les soustrait à leur influence mutuelle; car elles s'affaiblissent quand on les réunit : par exemple, le moment magnétique d'une seule, prise isolément, ayant été de 82°, celui des 16 lames réunies n'était que de 228°,8, ce qui fait en moyenne, pour chaque lame, 14°,3 seulement. Coulomb a trouvé quelquefois les lames du milieu à l'état neutre, ou même aimantées en sens inverse des autres. Nobili est arrivé aux mêmes conclusions sur des paquets d'aimants très-minces. Un barreau ne peut donc être considéré comme formé de files d'éléments magnétiques toutes également aimantées.

1517. Dans ce qui précède, il est question de faisceaux d'aiguilles ou de lames aimantées, et non d'aimants d'une seule pièce. Mais Coulomb ayant reconnu qu'un faisceau de lames pressées les unes contre les autres prend la même force magnétique qu'un barreau unique de mêmes dimensions extérieures, on est porté à penser que, dans les aimants d'une seule pièce, la force magnétique va aussi en diminuant de l'extérieur à l'intérieur. Pour appuyer cette manière de voir, Nobili trempa et aimanta deux cylindres du même acier et de mêmes dimensions extérieures, dont l'un était massif et l'autre foré dans toute sa longueur, et ce dernier déviait une aiguille d'épreuve de 19°, tandis que l'autre ne la déviait que de 9°,5 quoiqu'il eût un poids presque double du premier.

De Haldat, ayant fortement aimanté un tube de fer, au moyen d'un courant électrique, comme nous l'expliquerons plus tard, reconnut que la force magnétique était la même quand ce tube était vide, et quand il contenait un cylindre massif prenant bien juste, ou de la limaille de fer fortement tassée. Le même physicien a tenté, mais en vain, de faire passer l'aimantation, du milieu d'un

faisceau, où les aiguilles ou lames étaient aimantés, dans les parties extérieures qui étaient à l'état neutre. Enfin, Barlow a reconnu que les actions exercées sur une aiguille aimantée, par un globe de fer creux et un globe massif, étaient égales, pourvu que l'épaisseur des parois du premier fût de 0<sup>mm</sup>,1 au moins.

Depuis une dizaine d'années, on a fait sur la distribution du magnétisme dans les aimants et sur les modifications de structure produites dans l'acier par l'aimantation beaucoup d'expériences, dues entre autres à MM. Du Moncel, Pouillet, Gaugain, Jamin, Tréve.... Dans le plus grand nombre de ces expériences, l'aimantation est produite au moyen de courants électriques; nous y reviendrons donc quand nous parlerons de ce mode d'aimantation. Pour le moment, nous allons exposer comment M. Jamin envisage la constitution intérieure des aimants <sup>1</sup>.

**1518. Idées théoriques sur la constitution des aimants.** — Nous avons vu (1496) qu'un aimant peut être regardé comme composé de files d'éléments magnétiques se regardant par les pôles contraires. M. Jamin admet que ces pôles se neutralisent deux à deux, de sorte que les pôles extrêmes de chaque file peuvent seuls produire des actions extérieures; mais comme ces pôles, de même nom, se repoussent, les files divergent vers leurs extrémités, et les pôles actifs s'épanouissent aux deux surfaces polaires de l'aimant, depuis la section moyenne jusqu'aux extrémités. L'attraction en chaque élément de surface est alors proportionnelle au nombre des pôles élémentaires qui y aboutissent, et la force d'arrachement, au carré de ce nombre. Toutes les files passent par la section moyenne, qui les embrasse comme une ceinture; de sorte que leur nombre, et par suite la quantité de magnétisme, dépend de la grandeur de cette section.

Si l'aimant est mince et saturé, les files d'éléments arrivent jusqu'à son axe, et le magnétisme total est proportionnel à la section moyenne; si le barreau est épais, l'aimantation peut ne pénétrer que jusqu'à une certaine profondeur, et si celle-ci est faible, la quantité de magnétisme est proportionnelle au périmètre de cette section. Le magnétisme possible dépend exclusivement du nombre des files qui traversent la section moyenne, et, par conséquent, de ses dimensions; mais il dépend aussi de l'étendue des surfaces polaires, qui doivent être telles que toutes les files trouvent assez de place pour s'y terminer.

Si l'aimant est très-allongé, ses extrémités présentent une surface plus grande qu'il n'est nécessaire, il y a un espace neutre plus ou moins étendu, et les deux courbes d'intensité (1514) ne se joignent pas. Si l'on raccourcit l'aimant peu à peu, ces courbes, sans changer d'abord de forme, finissent par se joindre à la ligne neutre, et alors on a l'aimantation complète sous la plus petite longueur possible. Mais si l'on raccourcit encore plus, les surfaces polaires ne suffisent plus à l'épanouissement de toutes les files, les plus courtes disparaissent, et la quantité de magnétisme diminue. M. Jamin appelle les aimants qui sont dans ce

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Acad. des Sciences de Paris, de 1872 à 1873, et Journ. de physique, de M. d'Almeida, t. V, p. 41.

cas aimants brachypolaires; ceux qui présentent un espace neutre entre les courbes sont appelés mégapolaires.

Cette manière de considérer la constitution des aimants est confirmée par les expériences suivantes : — 1° trois lames minces mégapolaires ayant la même section moyenne, dont une est rectangulaire, une autre en forme de losange allongé, et dont la troisième va en s'élargissant jusqu'aux deux bouts à partir de la ligne moyenne, ayant été explorées au moyen du clou d'épreuve (1513), ont présenté la même quantité totale de magnétisme. — 2° On prend une bande aimantée mégapolaire et assez large; si l'on diminue la largeur à la ligne moyenne, on voit la quantité de magnétisme diminuer, et rester toujours sensiblement proportionnelle à la largeur réduite. Si l'aimant est brachypolaire, le rapport du magnétisme à la section moyenne va en augmentant à mesure qu'on la rétrécit; mais jusqu'à une certaine limite, toutes les files qui restent finissant par trouver assez de surface pour s'y épanouir. — 3° Si l'on ajoute des pièces de fer doux aux deux bouts, l'expérience montre que l'on change la distribution, mais non la quantité du magnétisme, quand l'aimant est mégapolaire, ce que l'on pouvait prévoir; et cette quantité n'est pas augmentée quand on réaimante le barreau ainsi armé. Mais s'il est brachypolaire, et qu'on le réaimante après l'addition des pièces polaires, il prend tout le magnétisme que comporte sa section moyenne, et sa force est considérablement accrue. Si alors on enlève les pièces de fer, les surfaces polaires deviennent insuffisantes, et l'aimant redescend à sa force primitive.

#### § 4. — AIMANTATION ET FORCE DES AIMANTS

##### I. Procédés d'aimantation.

**1519. Différents moyens d'aimantation.** — Aimanter, c'est décomposer le fluide neutre, dans les éléments magnétiques de corps possédant de la force coercitive. On aimante au moyen d'aimants, au moyen du magnétisme du globe, et par l'électricité. L'emploi de l'électricité, qui fournit le moyen le plus complet et le plus énergique, ne sera étudiée que plus tard.

On a cru longtemps, d'après M. Morichini et M<sup>me</sup> Sommerville, que la lumière solaire avait la propriété d'aimanter de petites aiguilles d'acier. Mais Pouillet et MM. Riess et Moser ont prouvé qu'il n'en est rien, et que les signes de magnétisme observés quelquefois doivent être attribués à l'action du globe, la chaleur solaire faisant céder la force coercitive.

**Du point de saturation.** — Les fluides séparés dans un aimant tendant à se recombinaer, ils ne restent séparés qu'autant que la force coercitive peut s'opposer à leur réunion. Or cette force est limitée; il y a donc pour chaque barreau un *maximum* d'aimantation qui dépend de sa nature, de son volume,

de sa forme et de la force coërcitive dont il est doué. Quand on a obtenu ce maximum, on dit que le corps est aimanté à saturation.

**1520. Méthodes de la simple touche.** — Pour aimer, on a d'abord procédé en mettant l'un des bouts du barreau d'acier trempé à aimer, en contact avec l'un des pôles d'un aimant. Ce pôle agit sur le fluide neutre, en faisant céder la force coërcitive, attire de son côté le fluide de nom contraire de chaque élément magnétique, et repousse à l'opposé le fluide de même nom. L'effet peut se faire sentir jusqu'à l'autre bout du barreau, parce que les éléments agissent les uns sur les autres comme les morceaux de fer dans la chaîne magnétique (1495). Seulement, l'effet s'affaiblissant à mesure qu'on s'éloigne du point touché, la ligne neutre est plus rapprochée de ce point, et le pôle opposé est diffus et peu marqué. L'action peut même ne pas se faire sentir jusqu'à l'extrémité, quand le barreau est long et fortement trempé. Il se forme alors un point conséquent à une certaine distance, au delà duquel il n'y a plus de traces d'aimantation, ou bien après lequel on trouve un pôle de même nom que celui de l'aimant, puis quelquefois un troisième, de nom contraire. Ces points conséquents sont de plus en plus faibles; on peut les attribuer à l'action du fluide du pôle qui les précède immédiatement.

Du reste, la décomposition ne se fait pas instantanément; le Dr Robison a reconnu qu'elle a lieu de proche en proche, et d'autant plus lentement que l'acier est mieux trempé<sup>1</sup>. Ainsi, quand le barreau touche le pôle *positif* de l'aimant, il se forme d'abord un pôle *négatif* au point en contact, un peu plus loin un pôle *positif*, puis un second pôle *négatif* très-faible. Ces pôles marchent lentement vers l'extrémité opposée à l'aimant; et si le barreau n'est pas trop long, au bout d'un certain temps, le premier pôle positif en atteint l'extrémité, et l'aimant est constitué avec deux pôles seulement. Si le barreau est très-long, le déplacement finit par s'arrêter, et il reste des points conséquents. M. Jamin appelle *conductibilité magnétique*, la faculté de propager ainsi le magnétisme faculté qui est d'autant plus prononcée que la force coërcitive est plus faible, de proche en proche.

Par la méthode qui précède, on ne peut aimer que de très-petits barreaux, et l'aimantation est irrégulière, à moins que le barreau ne soit court et l'aimant puissant. M. Gaugain augmente notablement l'effet, en chauffant le petit barreau d'acier suspendu à l'aimant, et le laissant refroidir dans cette position.

**Simple touche avec friction.** — On aime à saturation de petits barreaux, en les faisant glisser plusieurs fois de suite sur le pôle d'un aimant, et en ayant soin de toujours marcher dans le même sens. Considérons une file d'éléments magnétiques AB (fig. 1052), au-dessus de laquelle on fait glisser le pôle positif de l'aimant C, dans le sens de la flèche. Quand l'aimant arrivera en *n*, il se fera dans les différents éléments une décomposition indiquée par les signes + et —. Celle qui existe dans la partie *nA*, vers laquelle marche l'aimant, sera intervertie

<sup>1</sup> *Traité d'électricité*, par A. De la Rive, t. I, p. 494.

en chaque point dès que l'aimant l'aura dépassée; de manière que tous les éléments seront disposés comme ceux de la partie *nB*, quand l'aimant sera arrivé en A. Si l'on fait passer une seconde fois l'aimant, en allant toujours de B en A, les mêmes effets se produiront et l'aimantation sera augmentée, l'état magnétique établi dans la partie *nA* lors du premier passage n'étant pas entièrement détruit et interverti quand l'aimant passe de nouveau. On voit que l'extrémité la dernière touchée prend un pôle contraire à celui de l'aimant.

#### 1521. Méthodes de la double touche.

— Jusqu'au milieu du dix-huitième siècle, on ne connut pas d'autres moyens d'aimantation que ceux qui précèdent. Vers 1745, Réaumur et Buffon reçurent d'Oxford de petits barreaux aimantés, fabriqués par un médecin anglais, Knight, qui avaient une puissance extraordinaire pour leurs dimensions. Quelque temps avant, un fabricant d'aimants, Lemaire, avait obtenu des résultats remarquables par une méthode nouvelle que l'arrivée des aimants de Knight engagea Duhamel à essayer. Il parvint alors, en aimantant des morceaux de lame de sabre placés les uns sur les autres, à donner au plus petit, qui était en dessus, une aimantation comparable à celle des aimants de Knight. Ce dernier annonçait qu'il n'employait pas de pierre d'aimant, mais il tenait son procédé secret. Mitchell et Canton, en Angleterre, Duhamel et Antheaume, à Paris, tentèrent d'obtenir les mêmes résultats, et c'est à leurs recherches et à celles d'Épinus que nous devons les procédés, perfectionnés par Coulomb, dont on fait usage aujourd'hui pour aimanter les plus gros barreaux. Tous ces procédés portent le nom de *méthodes du double contact* ou de la *double touche*.

**I. Méthode de Knight.** — Knight plaçait bout à bout par les pôles contraires, deux gros barreaux aimantés, et posait sur eux, dans le sens de leur longueur, le barreau à aimanter, de manière que son milieu fût sur le point de jonction. Faisant ensuite tenir ce barreau par un aide, il séparait les aimants et les faisait glisser jusqu'aux extrémités. On voit que, les deux aimants concourant à la décomposition qui se fait dans les éléments magnétiques, l'aimantation devait être bien plus complète que lorsqu'on n'en emploie qu'un seul. Knight avait aussi découvert l'effet de la trempe sur la force coercitive; il opérait sur des barreaux d'acier fortement trempés, et obtenait ainsi des résultats inconnus avant lui.

**II. Méthode de Mitchell.** — On dispose plusieurs barreaux d'acier les uns à la suite des autres, *ns* (fig. 1053), et l'on appuie perpendiculairement au milieu, par les pôles opposés, deux aimants maintenus à une distance constante

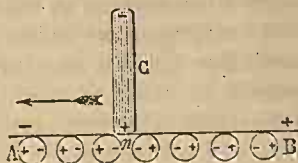


Fig. 1052.

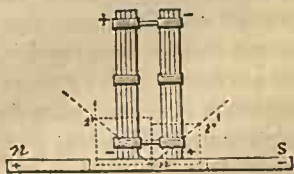


Fig. 1053.

l'un de l'autre. On les fait glisser ainsi, d'un bout à l'autre de  $ns$ , en les faisant aller et venir sans dépasser les extrémités. On termine l'opération de manière que chaque moitié ait reçu le même nombre de frictions, et quand les aimants arrivent au milieu. Dans cette manière d'opérer, que Mitchell appelait la *double touche*, chaque élément magnétique, quand il se trouve en  $n$  entre les deux aimants, est soumis à la somme des actions exercées par les deux pôles, tandis que les éléments placés en dehors, ne subissent que la différence de ces actions. Il est à remarquer que les barreaux placés au milieu acquièrent une bien plus grande force que ceux des extrémités; c'est qu'ils subissent de la part de ces derniers, une action qui retient à l'état de séparation les fluides que les aimants mobiles tendent à recombinaison dans les éléments qui se trouvent en dehors de l'espace qu'ils recouvrent.

La distance à donner aux deux aimants, dépend de la position de leurs pôles mathématiques, l'élément  $n$  étant soumis à des actions  $nr$ ,  $nr'$  passant par ces pôles, d'autant plus obliques qu'ils sont plus éloignés des extrémités. L'obliquité diminue quand on écarte les deux aimants, mais alors les pôles s'éloignent du point  $n$ ; il y a donc un milieu à garder. Le calcul montre que la distance doit être telle que l'angle  $nrn'$  soit de  $70^\circ$  environ.



Fig. 1054.

**III. Méthode d'Épinus.** — Épinus a apporté à la méthode de la double touche, un perfectionnement important, déjà réalisé par Duhamel, qui consiste

à incliner les deux aimants en sens contraire, de manière à abaisser leur pôle mathématique. Voici comment se pratique aujourd'hui cette méthode, perfectionnée par Coulomb : on place le barreau à aimanter entre les pôles opposés de deux forts aimants  $a$ ,  $b$  (fig. 1054). Les aimants mobiles  $c$ ,  $d$  sont posés sur son milieu, inclinés de  $15^\circ$  à  $30^\circ$  suivant la position de leurs pôles, et séparés par un petit morceau de bois  $o$ . Enfin, le pôle de chacun d'eux doit être de même nom que celui de l'aimant fixe qui est du même côté. On fait ensuite glisser les aimants mobiles, ainsi disposés, d'une extrémité à l'autre du barreau, de manière que ses deux moitiés reçoivent le même nombre de frictions. Les aimants fixes empêchent la recombinaison des fluides, dans les éléments qui sont en dehors des points touchés; ils aident aussi, par leur influence, à la décomposition du fluide neutre. Quand le barreau est gros, il faut répéter l'opération sur ses quatre faces. — Cette méthode est la plus efficace; mais elle a l'inconvénient de produire une aimantation peu régulière, et de donner souvent des points conséquents. Coulomb a trouvé que la ligne neutre est plus rapprochée, de quelques millimètres, de l'extrémité touchée la dernière.

**IV. Touche séparée ou de Duhamel.** — Les choses sont disposées comme dans la méthode d'Épinus; seulement, les aimants mobiles  $C$  et  $D$  (fig. 1055), inclinés de  $25^\circ$  à  $30^\circ$ , ne sont plus séparés par du bois. On les écarte

ensuite l'un de l'autre en les faisant glisser séparément sur chaque moitié du barreau, et, quand ils sont arrivés aux extrémités, on les enlève pour les reporter au milieu et les écarter de nouveau...

D'après Musschenbroeck, un ouvrier, nommé Jacob Dykgraaf, fabriquait des aimants par cette méthode. A la même époque, Duhamel et Antheaume, dans leurs essais pour découvrir les procédés de Knight, imaginaient une méthode analogue : ils disposaient parallèlement l'un à l'autre deux barreaux d'acier AB, A'B' (fig. 1056), réunis à leurs extrémités par deux barreaux de fer doux AA', BB', et opéraient des frictions au moyen de deux aimants inclinés *a*, *c*, qu'ils séparaient, comme nous venons de l'expliquer. Il est facile de voir que les magnétismes décomposés dans la barre frottée amenaient à l'état d'aimantation temporaire les barreaux de fer, et le magnétisme de ces derniers réagissait ensuite pour retenir à l'état de décomposition les fluides du barreau AB.

La méthode de la touche séparée, moins puissante que celle d'Æpinus, donne une aimantation plus régulière; on l'emploie principalement pour les aiguilles des boussoles. L'aiguille à aimanter est appuyée sur les extrémités des aimants

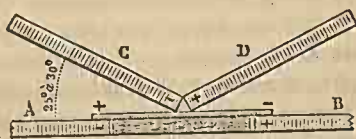


Fig. 1055.

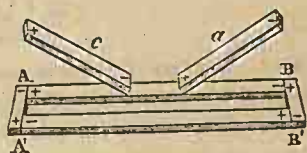


Fig. 1056.

fixes, de manière à empiéter de 16 à 18<sup>mm</sup> quand elle n'a que 8 à 10<sup>cm</sup> de longueur, et de 35 à 40<sup>mm</sup> quand elle est plus longue. Si elle est mince, on la soutient au moyen d'une règle de bois.

**1522. Remarques.** — Les aimants obtenus par le double contact sont souvent *sursaturés*, c'est-à-dire qu'ils renferment plus de fluides séparés que la force coercitive seule n'en peut maintenir, ce qui provient de l'influence des aimants fixes. Quand ces aimants sont ensuite enlevés, les fluides en excès se recombinaient, et l'aimant retombe à l'état de saturation. Du reste, cet effet n'est pas instantané : il se produit graduellement, et n'est complet qu'au bout d'un temps, quelquefois très-long, que les variations de température, les secousses peuvent abrégier.

Quand on veut augmenter la force d'un barreau non saturé, il faut avoir soin de ne pas employer des aimants plus faibles que ceux avec lesquels on l'a aimanté la première fois : on pourrait l'affaiblir, car, à chaque passage des aimants mobiles, il y a recombinaison partielle des fluides séparés dans les éléments magnétiques. Il se fait ensuite une nouvelle décomposition, qui rétablit, puis augmente l'aimantation qui existait avant le passage; et, si les aimants sont trop faibles, ils ne pourront pas développer autant de magnétisme qu'il y en

avait avant de les faire agir. Généralement, la force qui reste à l'aimant est celle que les barreaux employés lui auraient communiquée, s'ils l'avaient trouvé à l'état neutre.

L'ébranlement moléculaire produit par les frictions est très-important pour faire céder la force coercitive, et il faut appuyer fortement les aimants mobiles quand on veut saturer de gros barreaux. Si l'on place un petit barreau d'acier entre les pôles opposés de deux aimants assez éloignés pour ne pouvoir l'aimanter, il suffit de le frotter avec un corps non magnétique pour que la force coercitive cède et qu'il y ait aimantation.

Du reste, la force coercitive ne cède que peu à peu et à chaque friction. Ce fait a été étudié par Quételet<sup>1</sup>, qui a reconnu qu'il faut exercer les frictions sur toute la surface du barreau à aimanter pour obtenir l'état de saturation; alors, douze frictions suffisent généralement avec la touche séparée, et l'intensité magnétique  $i$ , après un nombre  $x$  de frictions, en fonction de l'intensité maximum  $I$  que peut recevoir le barreau, est donnée par la formule

$$i = I (1 - 0,36 \sqrt{x}).$$

**1523. Manière d'obtenir des points conséquents.** — Il faut d'abord employer des baguettes très-allongées et fortement trempées, comme les aiguilles à tricoter. Pour obtenir un seul point conséquent, on exerce des frictions avec le même pôle de deux aimants, en partant de chaque extrémité et s'arrêtant au milieu, où il se forme un pôle contraire à celui de l'aimant. — Pour obtenir plusieurs points conséquents, on appuie la baguette d'acier sur les pôles alternativement positifs et négatifs de plusieurs aimants perpendiculaires à sa direction, et on la frotte avec du bois; chaque aimant produit un pôle contraire à celui par lequel il agit.

**1524. Aimantation par la terre.** — Gilbert avait découvert, dès 1500, qu'une barre de fer dirigée convenablement dans le méridien magnétique, devenait un aimant quand on la frappait sur le bout. Lorsque Knight eut annoncé qu'il aimantait sans aimants, on crut qu'il excluait les aimants artificiels comme les naturels, et l'on songea à utiliser l'influence de la terre. Antheaume obtint de bons résultats en plaçant l'une à la suite de l'autre deux barres de fer parallèles à l'aiguille d'inclinaison, et par conséquent aimantées par la terre, et faisant glisser longitudinalement un barreau d'acier sur le point de jonction, en faisant aller et venir lentement. Marcell plaçait le barreau horizontalement, dans le méridien magnétique, entre deux grosses barres de fer, et le frottait avec une barre verticale de même métal. — Mitchell puis Canton ayant aimanté quatre lames par un moyen analogue, s'en servit pour en aimanter deux autres, qui furent plus fortes que les quatre premières, et dont il se servit ensuite pour

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. LIII, p. 248.



augmenter leur force magnétique. En aimantant ainsi ces lames les unes par les autres, il parvint à en faire des aimants énergiques.

Scoresby procédait par le moyen de choes : il frappait d'abord sur le bout, une large barre de fer verticale, puis une barre d'acier de 80<sup>cm</sup> de longueur, après l'avoir appuyée sur la barre de fer. Il frappait ensuite de petits barreaux d'acier suspendus à l'extrémité de la grande barre d'acier; tous ces barreaux furent aimantés. Ayant préparé six aimants, par ce moyen, il les réaimanta successivement les uns par les autres, en suivant les méthodes ordinaires. — Le degré d'aimantation, qui augmente avec le nombre de coups frappés, peut cependant diminuer quand on les multiplie trop.

On se procure facilement des aimants, en tordant des brins de fil de fer, placés verticalement. L'écroutissage dû à la torsion développe de la force coërcitive, et l'état magnétique produit par l'influence du globe persiste. En liant ensemble plusieurs de ces petits aimants, tous les pôles nord du même côté, on obtient un aimant assez fort.

C'est par l'influence du magnétisme terrestre qu'on explique la polarité des aimants naturels. Le platine natif, particulièrement celui des monts Ourals, est souvent fortement aimanté, ce qu'il doit à 12 à 20 pour cent de fer qu'il contient, et certains échantillons présentent plusieurs axes, jusqu'à trois avec six pôles. M. Daubrée, pour prouver que c'est à l'action du globe qu'est due cette aimantation, a allié du fer à du platine en fusion dans un creuset en rigole dirigée suivant le méridien magnétique et qu'il inclinait parallèlement à l'aiguille d'inclinaison aussitôt après la solidification. La barre restait aimantée, pourvu qu'il y eût assez de fer, mais pas trop, car dans ce dernier cas l'alliage de platine et fer était bien magnétique, mais ne présentait pas de pôles, à moins qu'on ne lui appliquât ensuite les procédés d'aimantation.

## II. De la force des aimants.

**1525. Influence du volume et de la forme.** — La force des aimants dépend de leur volume, de leur forme, de la force coërcitive et de la température. Quant au *volume*, Coulomb a reconnu que : 1<sup>o</sup> les moments magnétiques des aimants de même substance et de forme semblable sont à peu près proportionnels aux cubes des dimensions homologues; 2<sup>o</sup> dans les aiguilles cylindriques de même longueur, la quantité de magnétisme libre est sensiblement proportionnelle au diamètre; 3<sup>o</sup> la durée d'une oscillation d'un barreau à section rectangulaire, dont la largeur est  $l$ , l'épaisseur  $e$ , et la longueur  $2L$ , est donnée par la formule

$$t = me\sqrt{l} + nL,$$

$m$  et  $n$  sont des constantes dépendant de la nature et de la trempe de l'acier. Quant à la *forme*, Coulomb a constaté que des lames minces d'acier en forme

de losange allongé ont une plus grande *force directrice*, à poids égal, que des aiguillés rectangulaires de même épaisseur également trempées, ce qui s'explique facilement d'après les expériences de M. Jamin, la section moyenne étant plus grande à poids égal.

M. Kupffer a reconnu que si l'on termine en cône une des extrémités d'un barreau d'acier, le pôle qui s'y trouve est plus faible que l'autre, et plus éloigné de la ligne neutre; résultats d'autant plus marqués que le cône est plus effilé.

**1526. Influence de la trempé.** — Knight parait avoir reconnu le premier que l'acier *trempe* s'aimante plus fortement que celui qui ne l'est pas. Coulomb a laissé sur ce sujet un travail remarquable, qui a été publié par Biot<sup>1</sup>, et dont voici les principaux résultats : un barreau d'acier aimanté à saturation, après avoir été trempé à divers degrés, a donné les nombres suivants :

Température de la trempé.....	875° c.	975	1075	1187
Temps de 10 oscillations.....	93 <sup>s</sup>	78	64	63

L'acier n'éprouve pas de modification sensible de structure quand on le trempé au-dessous de 870°; aussi, les résultats magnétiques ont-ils été les mêmes à tous les degrés de trempé inférieurs à cette limite. Coulomb a trouvé les nombres suivants avec un barreau d'acier trempé à 1100°, recuit successivement à différents degrés, puis aimanté :

Température du recuit.....	15° c.	267	512	1122
Temps de 10 oscillations.....	63 <sup>s</sup>	64,5	70	93

L'aimantation était donc d'autant plus faible que le recuit avait été plus prononcé.

On a admis pendant longtemps que le maximum d'aimantation d'un barreau d'acier augmentait toujours avec le degré de trempé. MM. Tréve et Durassier ont trouvé qu'il en était ainsi, sur cinq échantillons d'acier du Creuzot contenant depuis 0,25 jusqu'à 0,95 de carbone, et trempés à divers degrés; de plus, les échantillons les plus carburés recevaient la plus forte aimantation. Mais M. Jamin a montré que les résultats dépendent de la forme plus ou moins allongée des aimants<sup>2</sup>. Ayant aimanté une longue bande d'acier assez large et de 1<sup>mm</sup> d'épaisseur, et vérifié, par la méthode du clou, que l'intensité magnétique, nulle au milieu, sauf près des extrémités, va en augmentant quand on s'avance vers les bords, il trouva que l'intensité moyenne  $y$ , qui se montrait à  $\frac{1}{3}$  de la largeur, était représentée, pour une section prise à une distance  $x$  de l'extrémité, par la formule  $y = A k - x$ .  $A$  est une constante qui exprime l'intensité à l'extrémité, et reste la même pour un même acier, quel que soit son état physique; et  $k$  est le rapport des intensités en deux points placés à une distance de 1<sup>cm</sup> l'un de l'autre, et qui diminue à mesure que l'acier est plus recuit.

<sup>1</sup> *Traité de physique expérimentale et mathématique*, par Biot, t. III, p. 106.

<sup>2</sup> *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXX, p. 4553.

Cette formule représente les intensités vraies, c'est-à-dire qu'elle suppose une conductibilité magnétique égale à 1. Or, dans la méthode du clou, l'action est complexe et dépend de l'espace dans lequel s'étend l'influence du fer en contact, espace d'autant plus grand que la conductibilité magnétique est elle-même plus grande. Si donc  $y_1$  est l'intensité déduite de la force d'arrachement, on a  $y = \mu y_1$ . Pour connaître le rapport entre la valeur de  $\Lambda$  et celle,  $\Lambda_1$ , mesurée à l'extrémité au moyen du clou d'épreuve, on remarque que  $\frac{1}{k}$  représentant le coefficient de conductibilité linéaire dans une direction quelconque autour d'un point, la conductibilité en surface autour de ce point sera  $1 : k^2$ , et l'on aura  $k^2 y_1 = y$ , et par suite  $\Lambda_1 k^2 = \Lambda$ .

Il résulte des expériences de M. Jamin que, pour toutes les lames égales d'un même acier, diversement trempées, les courbes d'intensité prolongées, en changeant le signe de  $x$ , se rencontrent en un même point, pour lequel on a  $x = -2$  et  $y_1 = \Lambda_1 k^2$ ; et, comme on a  $\Lambda_1 k^2 = \Lambda$ , on voit que  $\Lambda$  reste constant pour un même acier, et les valeurs vraies de l'intensité sont  $y = \Lambda k^{-x}$ ; tandis que  $y = \frac{\Lambda}{k^2} k^{-x} = \Lambda k^{-(x+2)}$  représente les valeurs données par le clou d'épreuve.

On voit aussi que : 1° la hauteur de la courbe vraie, à l'extrémité de l'aimant, est constante; mais que celle que donne le clou d'épreuve est  $\Lambda : k^2$  et croit avec le recuit. — Si  $k$  diminue par le recuit, la courbe magnétique s'étend vers le milieu de l'aimant, qui devra être d'autant plus long qu'il sera plus recuit, si l'on veut qu'il conserve tout le magnétisme dont il est capable. — 3° La quantité totale  $M$  du magnétisme vrai, représenté par la formule  $M = \Lambda \cdot \frac{1}{lk}$ , augmente avec le recuit, et la quantité mesurée par arrachement augmente encore plus, car elle est  $M_1 = \frac{\Lambda}{k^2} \cdot \frac{1}{lk}$ . — 4° Pour être mégapolaire, un aimant doit être d'autant plus allongé qu'il est plus recuit. — 5° Pour reconnaître l'influence de la nature et de la trempe de l'acier, il ne suffit pas d'opérer sur des baguettes égales; les unes pouvant être mégapolaires et les autres brachypolaires, il n'est pas permis de les comparer, et cela nous explique certaines anomalies trouvées par Coulomb, qui avait vu des aiguilles minces trempées à blanc ne pas garder plus de magnétisme qu'après avoir été entièrement recuites.

**1527. Faisceaux magnétiques.** — Les petits aimants sont, relativement à leur poids, plus puissants que les gros. D'un autre côté, il est difficile de tremper sans les déformer, et d'aimanter à saturation les gros barreaux. Knight a donc imaginé de réunir plusieurs aimants, en formant des *faisceaux magnétiques*. Coulomb, qui a fait une étude suivie de ces faisceaux, a posé des règles pour les construire.

Coulomb avait trouvé que la puissance d'un faisceau n'était pas proportionnelle au nombre des lames qui le composaient, les barreaux réagissant les uns sur les autres, de manière à altérer mutuellement leur état d'aimantation (1516). Pour

diminuer cet effet, il leur donnait des longueurs différentes, de manière que leurs extrémités fussent disposées en gradins, les plus longs étant au milieu. La figure 1057 représente, vu de côté et de face, un de ces faisceaux, formé de trois couches de lames, dont celles du milieu dépassent les autres. Ces lames ne se touchent pas, et leurs extrémités sont enchâssées dans des masses de fer doux ou *pièces polaires*, *a*, *a'*, aimantées par influence et formant un épanouissement des régions polaires des lames (1497), en donnant un pôle unique placé près de leur extrémité. De plus, le magnétisme développé dans ces masses de fer réagit sur celui des lames aimantées, de manière à maintenir leur état d'aimantation. Malgré cette action conservatrice, on trouve parfois que certaines des lames intérieures ont perdu presque toute trace d'aimantation, et même ont eu leurs pôles intervertis.

Scoresby, en séparant les lames les unes des autres, est parvenu à donner aux faisceaux beaucoup plus de force qu'à un barreau unique de dimensions et de masse équivalentes <sup>1</sup>. Si donc on forme les aiguilles des boussoles de lames minces superposées donnant le même poids, on aura une plus grande force directrice qu'avec une aiguille simple. Du reste, l'accroissement de force avec le

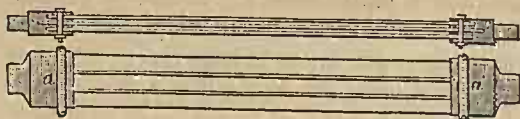


Fig. 1057.

nombre de lames, diminue à mesure que ce nombre est plus grand, et d'autant moins vite qu'elles sont plus écartées et mieux trempées. Par exemple, un faisceau de 196 lames de

40<sup>cm</sup> de longueur s'est montré 6 fois plus fort quand l'acier avait reçu la plus forte trempé que lorsqu'il n'avait reçu que la trempé ordinaire. Nous allons voir l'explication de ces divers faits (1528).

C'est au moyen de faisceaux que Coulomb aimantait par la méthode de la double touche (fig. 1054) ; c'est aussi au moyen des faisceaux, que l'on forme les aimants les plus puissants. On en cite un ne pesant que 18<sup>kil</sup>,5 et portant 223<sup>kil</sup>, construit par M. Keil en aimantant les lames les unes par les autres et en prenant une foule de précautions.

**1528. Distribution du magnétisme dans les faisceaux.** — M. Jamin a fait, sur les faisceaux magnétiques, de nombreuses recherches qui ont jeté un grand jour sur divers points obscurs de leur théorie<sup>2</sup>. Il montre d'abord que les inégalités dans l'état magnétique des diverses lames d'un faisceau qu'on a démonté, ne se montrent jamais quand ces lames, prises dans une même bande d'acier, ont une composition et une trempé identiques. Alors, les lames séparées ont toutes gardé la même quantité *m'* de magnétisme, distribué de la même

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXIX, p. 106.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Ac. des Sc.*, t. LXXVIII, p. 1337, et *Journal de phys.*, t. V, p. 73.

manière. Si l'on superpose ensuite ces lames *non saturées*, de manière à former des faisceaux de 2, 3,.... 8 lames, on trouve que :

1<sup>o</sup> La totalité M de magnétisme du faisceau égale la somme des magnétismes de chaque lame, qui garde son magnétisme  $m'$ , de sorte qu'on a  $M = nm'$ .

2<sup>o</sup> Les deux courbes magnétiques (1514) s'élèvent quand le nombre  $n$  des lames augmente, et ces courbes s'avancent vers le milieu du faisceau. On en conclut que les files d'éléments conservées dans chacune des lames gardent leur place dans chaque section moyenne, pendant que leurs extrémités, au lieu de s'arrêter aux surfaces en contact, se prolongent par influence jusqu'aux surfaces extérieures du faisceau, où aboutissent leurs pôles élémentaires. Le faisceau est ainsi aimanté dans toute sa profondeur, ce qui explique sa supériorité sur un barreau d'une seule pièce.

Les lames employées par M. Jamin avaient 1<sup>m</sup> de longueur, une largeur,  $a$ , de 5<sup>cm</sup> et une épaisseur,  $e$ , de 1, 2, 3 ou 4 millimètres. Les intensités moyennes,  $y$  et  $y_1$ , sur les plats et sur les tranches ayant été mesurées du bout au milieu d'une lame isolée, ainsi que l'intensité  $y_2$  sur sa tranche extrême, le magnétisme total, M, a été représenté par la formule

$$M = a \left( \Sigma y + \frac{e}{a} \Sigma y_1 + e y_2 \right).$$

L'expérience a montré que, en général,  $y$  et  $y_1$  sont dans un rapport constant; de sorte qu'on a  $y_1 = \mu y$  ( $\mu$  était à peu près égal à 1,2); on a donc, en négligeant le dernier terme,

$$m' = \frac{M}{a} = \Sigma y \left( 1 + \mu \frac{e}{a} \right).$$

Dans un faisceau formé de  $n$  lames, les pôles élémentaires affleurant la surface des plats des faisceaux, donnent des intensités Y, et la somme totale du magnétisme sera  $\Sigma Y \left( 1 + \mu \frac{ne}{a} \right)$ , et comme elle est égale à  $n$  fois le magnétisme  $m'$  de chaque lame, on aura

$$\Sigma Y \left( 1 + \mu \frac{ne}{a} \right) = n \Sigma y \left( 1 + \mu \frac{e}{a} \right); \text{ d'où } \frac{\Sigma Y}{n} = \Sigma y \left[ 1 - (n-1) \mu \frac{e}{a} \right],$$

en s'en tenant aux deux premiers termes de la division algébrique.

Supposons maintenant qu'on aimante séparément les lames à saturation, et qu'on les remette en faisceau; toutes perdront de leur magnétisme et reviendront à la valeur  $m'$ . C'est que chacune d'elles était mégapolaire, et, quand on les superpose en nombre croissant, les courbes, comme nous venons de le voir, se rapprochent, empiètent bientôt l'une sur l'autre, et le faisceau devient brachypolaire, parce que, tandis que la section moyenne augmente proportionnellement au nombre des lames, la surface polaire s'accroît seulement comme l'épaisseur  $ne$ . Si donc on sépare les lames, on les trouvera saturées si elles sont peu

nombreuses, puis, leur magnétisme  $m'$  ira en diminuant quand leur nombre  $n$  augmentera, à partir du moment où les courbes se seront jointes au milieu du faisceau.

Le magnétisme des plats du faisceau,  $\Sigma Y$ , n'augmentant que jusqu'à une certaine valeur du nombre  $n$  de lames, l'accroissement d'épaisseur doit seul déterminer l'augmentation du magnétisme du faisceau. Or le magnétisme gardé par chaque lame est

$$m' = \Sigma y \left( 1 + \mu \frac{e}{a} \right) = \frac{1}{n} \Sigma Y \left( 1 + \mu \frac{ne}{a} \right) = \frac{\Sigma Y}{n} + \mu \frac{e}{a} \Sigma Y.$$

Si  $\Sigma Y$  ne s'accroît plus, le nombre  $n$  de lames ayant atteint la limite, et si l'on ajoute encore des lames, le magnétisme  $m'$  ira, chez toutes, en diminuant, le premier terme diminuant quand  $n$  augmente.

On voit que la force d'un faisceau, qui est d'abord proportionnelle au nombre des lames, croît ensuite de moins en moins quand on en ajoute d'autres, jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle il serait inutile d'en superposer un plus grand nombre.



Fig. 1058.

Les résultats changent quand les lames sont séparées par des matières non magnétiques. Si elles sont d'abord saturées, chacune d'elles perd moins que lorsqu'elles se touchent.

Le magnétisme total extérieur observé sur les plats et les tranches est bien diminué, mais une certaine quantité est restée entre les lames, de sorte que le magnétisme total du faisceau est beaucoup plus grand que si les lames se touchaient; seulement, il n'y en a qu'une partie à l'extérieur, l'autre étant dans les intervalles; et le total est d'autant plus fort que les intervalles sont plus grands. Il y a donc avantage à séparer les lames.

**1529. Des armatures.** — La force des aimants peut s'altérer à la longue, soit par des chocs accidentels, soit par les variations de température, soit enfin par l'action du globe. Pour conserver la force des barreaux, Knight a imaginé de les réunir par paires dans une même boîte, en les plaçant parallèlement, à une certaine distance l'un de l'autre, de manière que les pôles opposés soient du même côté (fig. 1058). Aux extrémités, sont appliqués de petits barreaux de fer doux  $c, c'$ , nommés *contacts* ou *armatures*. Le fluide neutre de ces contacts est décomposé comme il est indiqué dans la figure par les signes  $+$  et  $-$ ; et les fluides en présence, dans le fer et dans les aimants, empêchent, en s'attirant, la recomposition dans ces derniers. Une règle de bois  $aa$  sépare les deux aimants.

Au moyen des armatures, on peut disposer les paires de barreaux de manière à faire agir en même temps deux de leurs pôles, comme on le voit (fig. 1059). Un contact de fer doux  $ff$  est maintenu contre les pôles supérieurs des deux barreaux par des tiges de cuivre  $t, t$ . Une autre armature de fer doux  $pp$  nommée

portant, retenue par attraction magnétique, sert à suspendre la charge. Ainsi disposés, les aimants peuvent avoir une *force portative* de beaucoup supérieure au double de celle de chaque barreau à l'un de ses pôles. C'est qu'il se fait dans le portant, sous les actions réunies des deux pôles, une décomposition magnétique qui réagit ensuite pour augmenter la puissance des pôles.

M. Bazin a eu l'idée de recourber un seul barreau aimanté, en forme de fer à cheval, de manière à faire agir les deux pôles sur un même *portant*. La figure 1060 représente un aimant ainsi disposé, composé de plusieurs lames superposées en faisceau. Les extrémités polaires se nomment les *pieds*, et la partie courbe, le *talon* de l'aimant. On aimante ces barreaux courbes, comme les barreaux droits, en plaçant sur le prolongement des branches les deux aimants fixes, et promenant les aimants mobiles sur les faces, en en suivant la courbure.

Les aimants en fer à cheval peuvent porter beaucoup plus que le double de la charge que porterait un seul de leurs pôles.

On a remarqué depuis longtemps que la forme et la masse des contacts et des portants, ont une grande influence sur leur efficacité; mais on n'a possédé longtemps à cet égard que des notions empiriques et vagues, et ce n'était que par tâtonnement qu'on arrivait à leur donner les proportions les plus convenables. On recommandait d'arrondir les extrémités des portants et de donner une forme cylindrique à la surface de contact. De nombreuses expériences dues principalement à M. Du Moncel et à



Fig. 1060.

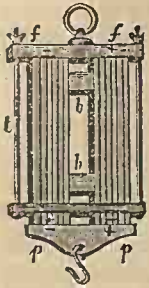


Fig. 1059.

M. Jamin, ont jeté un grand jour sur ce sujet.

**1530. Mouvements magnétiques dans les armatures.** — Nous avons vu (1495) qu'une pièce de fer doux présentée à *distance* à l'un des pôles d'un aimant, y développe une aimantation inverse, tandis que lorsqu'il y a contact, le fer présente un seul magnétisme qui est de même nom que celui du pôle de l'aimant, que ce fer ne fait que prolonger (1497). C'est ce qu'a montré M. Du Moncel en observant le fantôme magnétique, dont il a suivi les déformations autour des extrémités en présence d'un aimant et d'un barreau de fer placés dans des conditions variées. Il a montré aussi qu'il existe entre le pôle et le fer en contact une action qui a pour effet de *dissimuler* en grande partie les polarités magnétiques opposées et de les maintenir encore quand la cause aimantante n'agit plus<sup>1</sup>.

M. Jamin a conclu des effets différents qui se produisent quand le fer est en

<sup>1</sup> Étude du magnétisme, etc., 1858, et Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. LXXVI, p. 281.

contact avec l'aimant ou en est séparé, qu'il doit y avoir une distance pour laquelle l'aimantation du fer est nulle avant de changer de sens, et il a constaté les faits suivants<sup>1</sup> : Quand on approche peu à peu un cylindre de fer doux du pôle austral, par exemple, d'un aimant, le fluide attiré dans le fer forme un pôle contraire, de plus en plus concentré à l'extrémité la plus rapprochée de l'aimant, pendant que la ligne neutre sur le fer s'avance et que le magnétisme repoussé s'étale de plus en plus sur la partie opposée. La ligne neutre finit par atteindre l'extrémité interne du cylindre de fer, celle qui regarde l'aimant, et l'on ne distingue plus de magnétisme sur la surface extérieure ni même sur la face interne, car un morceau de fer qu'on y applique n'éprouve pas d'action, les effets des fluides de l'aimant et du fer se neutralisant. Si l'on approche encore plus, le fer prend partout du fluide austral, et entre les deux surfaces en présence il y a les deux fluides contraires, n'exerçant pas plus d'action extérieure que deux tranches contiguës d'un même aimant, et il semble que l'aimant se prolonge, à travers l'espace intermédiaire, jusque dans le fer doux.

En même temps, le contact réagit sur le magnétisme de l'aimant et en modifie la distribution; d'abord il appelle son magnétisme vers l'extrémité, dont la courbe des intensités se rapproche; puis, les ordonnées diminuent toutes, le magnétisme tendant à s'accumuler à la face interne; et, quand il y a contact, elles sont presque nulles près des surfaces de jonction, de chaque côté desquelles l'intensité donnée par le clou d'épreuve est la même. Cependant, ces surfaces adhèrent fortement, ce qui indique qu'elles possèdent beaucoup de *magnétisme dissimulé*, c'est-à-dire ne produisant pas d'effet extérieur, les magnétismes contraires des deux surfaces se neutralisant. A une certaine distance, dans l'acier, le magnétisme extérieur se retrouve, l'armature n'agissant pas aussi loin, mais on peut le ramener à l'extrémité en promenant du milieu vers le pôle un morceau de fer doux qui semble balayer le magnétisme vers la surface de contact, ce qui augmente l'adhérence.

Cet effet se produit aussi, spontanément et peu à peu, sous l'influence de l'armature; si bien que l'aimant peut, au bout de quelques jours, porter une charge plus que double de celle qu'il porte d'abord; phénomène connu depuis longtemps, mais qui n'avait pas encore reçu d'explication. Du reste, si l'on arrache le contact, l'aimant redescend immédiatement à sa force première; il peut même se trouver affaibli, ce que l'on peut expliquer par les secousses moléculaire et magnétique produites par l'arrachement brusque de l'armature.

Supposons maintenant qu'on approche parallèlement, des deux pôles à la fois d'un aimant en fer à cheval, un *portant* qui soit toujours à des distances égales de ces deux pôles. Ce portant prend d'abord des pôles opposés à ceux de l'aimant, avec une ligne neutre au milieu, et pour une certaine distance il ne donne aucun signe extérieur de magnétisme; puis il présente à chacune de ses extrémités le

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXVI, p. 65, et *Journal de physique*, t. V, p. 89.



magnétisme du pôle voisin, et en même temps, il y a, par l'effet du *magnétisme dissimulé*, une force portative considérable, qui augmente peu à peu, par la réaction du portant sur l'aimant, mais qui s'abaisse subitement quand on arrache ce portant.

Dans le cas d'une armature appliquée à un seul pôle, la quantité totale de magnétisme extérieur ne change pas, ce que perd l'aimant se retrouvant dans le fer; mais dans le cas des deux pôles, il y a perte, l'armature réunissant les deux bouts des files élémentaires, de manière à former des aimants fermés, sans pôles apparents.

**1531. Aimants feuilletés.** — M. Jamin a appliqué les résultats de ses recherches sur le magnétisme, à la construction d'aimants en fer à cheval d'une grande puissance portative<sup>1</sup>. Voici comment on construit ces aimants, dits *aimants feuilletés*. Deux armatures de fer doux *a, b* (fig. 1061), fixées solidairement à une petite distance l'une de l'autre, par des brides de cuivre, portent en-dessous des surfaces polaires bien dressées, sur lesquelles s'applique le portant *f*. En dessus, ces armatures s'amincissent de dedans en dehors, et se terminent par un bord tranchant. Elles sont réunies en haut par une longue bande d'acier recourbée et fixée par des vis à leur surface extérieure. D'autres lames, préalablement aimantées, sont introduites dans la première l'une après l'autre, et s'y appliquent par élasticité. Leurs longueurs sont calculées de manière que leurs extrémités s'appuient sur les armatures.

La force portative dépend d'une foule de circonstances, entre autres de la masse du portant. Si cette masse est trop faible, le portant prend des pôles opposés à ceux de l'aimant. Si on le prend de plus en plus grand, le magnétisme extérieur diminue et la force portative augmente. Par exemple, un aimant qui portait 247<sup>kil</sup>, pouvait en soutenir 305, quand on appliquait des lames de fer sur les faces du portant. Si la masse du portant est telle que le magnétisme extérieur disparaisse, on obtient le maximum de force portative, tout le magnétisme de l'aimant étant employé à la produire. Avec une plus grande masse, la force diminue.

Il faut aussi que les faces d'adhérence ne soient ni trop grandes ni trop petites, et enfin il serait inutile de dépasser un certain nombre de lames. Voici quelques résultats obtenus sur un aimant dont les lames avaient 1<sup>m</sup>,20 de longueur :

Nombres des lames.....	20	30	40	45	50	55
Forces portatives.....	175 <sup>kil</sup>	316	460	558	600	680

**1532. Aimants naturels armés.** — Les aimants naturels sont généralement faibles, mais on peut augmenter leur force dans une proportion étonnante, au moyen d'*armatures* convenablement disposées. La figure 1062 représente un

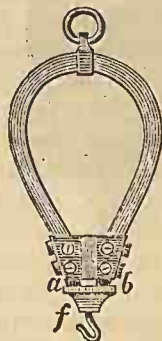


Fig. 1061.

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. LXXVI, p. 1153.

aimant naturel *armé*. Après avoir cherché la position des pôles de la pierre d'aimant A, on y dresse deux faces parallèles, sur lesquelles on applique aussi exactement que possible deux plaques de fer très-doux, qui les recouvrent entièrement. Ces plaques, fixées par des bandes de cuivre, et nommées *ailes* ou *jambes* de l'armature, sont terminées par des masses *a*, *a'*, ou *pieds*, qui s'avancent en dessous en s'appuyant exactement sur la face inférieure de l'aimant, et auxquelles s'applique le portant *cc'*. Le fluide neutre de l'aile est décomposé par l'action du pôle de la pierre d'aimant qui est de son côté; le fluide attiré réagit sur celui de l'aimant, dont il augmente la force. De plus, le magnétisme reçoit une meilleure direction, et l'on peut enfin utiliser en même temps les deux pôles; aussi, l'aimant peut-il soutenir jusqu'à 200 fois la charge qu'il portait avant d'être armé.

Pour arriver à de semblables résultats, il faut donner aux armatures une forme et des dimensions convenables; il faut que les ailes ne soient ni trop minces ni trop épaisses. C'est par tâtonnement qu'on arrive à trouver l'épaisseur la plus favorable, et l'on a reconnu qu'il y a avantage à les amincir à la partie supérieure. Les dimensions des pieds s'obtiennent aussi par tâtonnement; on les rétrécit par le bas, comme on le voit dans la figure 1062. Toutes les parties des armatures doivent être travaillées à la lime et non au marteau,

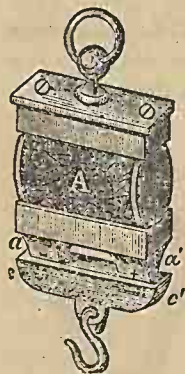


Fig. 1062.

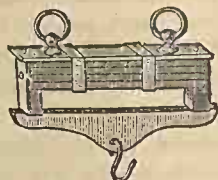


Fig. 1063.

afin de ne pas écrouir le fer doux.

Nollet a eu l'idée d'armer des aimants artificiels à la manière des aimants naturels; il leur a donné ainsi beaucoup de force. La figure 1063 représente un aimant armé de cette manière. Nollet en cite un qui soutenait six fois ce que pouvait porter un de ses pôles avant qu'il ne fût armé.

**1533. Influence de la température sur les aimants.** — Quand on échauffe les aimants, leur puissance diminue, soit d'une manière permanente, soit seulement passagèrement. Gilbert a reconnu le premier qu'un aimant porté au rouge perd son aimantation; la chaleur fait donc céder la force coercitive. Cependant, M. Faye, ayant déposé du fer pur en couche aigre et cristalline, sur une plaque de cuivre par un procédé électrique, et ayant aimanté cette couche de fer, l'a vu conserver son aimantation, à la chaleur rouge. — Æpinus, pour obtenir de forts aimants, plaçait les barreaux, après les avoir fait rougir, entre les pôles opposés de deux aimants puissants, et les laissait refroidir dans cette position; l'aimantation produite en l'absence de la force coercitive persistait après le refroidissement. — M. Hamann a eu l'idée de tremper les barreaux pendant qu'ils sont soumis à l'action des aimants destinés à les aimanter. Un barreau

trempe dans la position verticale conserve aussi l'aimantation produite par la terre. Nous avons vu les particularités que présente le platine allié à du fer, quand on le fait rougir (1524).

Coulomb a suivi le décroissement de la force magnétique d'un barreau à mesure que la température s'élevait, après l'avoir recuit, afin que la force coërcitive ne pût varier. L'ayant ensuite aimanté, puis chauffé à différentes températures, il le soumit à la méthode des oscillations, et arriva aux résultats suivants :

Températures.....	15° c.	50	100	264	425	637	850
Temps de 10 oscillations.	93 <sup>s</sup>	97,5	104	147	215	290	très-grand.

M. Kupffer a opéré à des températures élevées, en plaçant l'aimant au-dessus d'une aiguille, dont il observait les oscillations sous l'influence de la terre et de l'aimant porté à différentes températures. Il reconnut que la chaleur n'agit pas instantanément et demande un temps assez long pour produire tout son effet. Par exemple, ayant plongé un aimant plusieurs fois dans l'eau bouillante, en l'y laissant séjourner chaque fois pendant 10 minutes, il trouva qu'à chaque immersion il y avait diminution de la force magnétique, et ce n'était qu'à partir de la sixième que cette force ne variait plus.

M. Kupffer a aussi étudié l'effet de l'échauffement d'une seule moitié de l'aimant. Il le plaçait parallèlement à côté de l'aiguille, qui ne restait dans le méridien magnétique qu'autant que son milieu et celui de l'aimant étaient en face l'un de l'autre. Si l'on venait ensuite à affaiblir par la chaleur l'une des moitiés de l'aimant, sa ligne neutre se rapprochait du pôle opposé, et l'aiguille était déviée en obéissant à l'action de ce dernier pôle, et d'autant plus que l'échauffement était plus grand. Enfin, en observant par la méthode de Coulomb, la distribution du magnétisme suivant la longueur, dans une aiguille cylindrique (1514), M. Kupffer a reconnu que la chaleur diminue la force magnétique d'une manière prononcée près des extrémités que vers le milieu.

M. Christie a constaté que la plus grande partie du changement d'intensité par la chaleur a lieu instantanément; ce qui s'explique par l'accumulation de la puissance magnétique près de la surface (1517). Il a aussi reconnu que la force magnétique du fer doux augmente avec la température, au lieu de diminuer comme dans l'acier.

M. L. Dufour a étudié la diminution d'intensité des aimants, jusqu'à 260°<sup>1</sup> par la même méthode que M. Kupffer. Le barreau aimanté était plongé dans une cuve pleine d'huile, dont le couvercle était séparé de l'aiguille oscillante par un double écran rempli de ouate, qui la préservait de la chaleur de la cuve. L'intensité de la terre,  $F$ , étant prise pour unité, on a pour celle,  $m$ , du barreau  $m = F(n^2 - N^2) : N^2$ ;  $N$  et  $n$  étant le nombre d'oscillations de l'aiguille pendant le même temps, sous l'influence du globe et sous celle du globe et du

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (arch. des sciences), t. XXXI et XXXIV.

barreau (1508). — M. L. Dufour a reconnu qu'on peut représenter la force de l'aimant par la formule  $m = a - bt - ct^2$ , jusqu'à  $t = 100^\circ$ ; mais, au delà, la force diminue plus vite que ne l'indique cette formule. La diminution dépend aussi du barreau; elle est d'autant moins prononcée qu'il est plus fortement trempé.

M. L. Dufour a cherché à quelle température minimum le barreau perd toute son aimantation, et il a reconnu que, après avoir été porté au rouge cerise vif, il en présente encore des traces après le refroidissement; mais il pourrait se faire que cette faible aimantation se fût rétablie pendant le refroidissement, comme cela a lieu dans les expériences que nous allons passer en revue.

**1534. Variations passagères produites par la chaleur.** — Quand la température varie peu, elle peut modifier la force des aimants d'une manière passagère. La première observation à ce sujet est due à Canton. De Saussure a étudié ce phénomène au moyen d'un instrument qu'il appelait *magnétomètre*, moins précis que la balance de torsion, et qui consistait en un pendule magnétique (1488), dont il mesurait les déviations produites par l'aimant à étudier.

**1535. Manière de ramener les résultats à une même température.** — Les variations passagères de la force des aimants par l'action de la chaleur ont beaucoup d'importance dans les recherches sur le magnétisme du globe, et ont fort occupé les physiciens. M. Kupffer<sup>1</sup> ayant fait osciller des aiguilles aimantées sous l'influence de la terre, à différentes températures, a constaté que, de  $-1^\circ$  à  $+37^\circ,5$ , la chaleur diminue le nombre des oscillations proportionnellement aux accroissements de température; c'est-à-dire que chaque degré de plus diminue d'une même quantité le nombre des oscillations, ou augmente d'une même quantité la durée d'une oscillation. Par exemple, la durée de 800 oscillations d'une aiguille cylindrique de 59<sup>mm</sup> de longueur, a été augmentée de 0<sup>s</sup>,4 par degré. Il résulte de là que, si l'on appelle  $n_0$  et  $n_t$  les nombres d'oscillations à  $0^\circ$  et à  $t^\circ$ , pendant le même temps, et  $c$  une constante qui dépend de l'aimant considéré, le nombre des oscillations, en passant de  $0^\circ$  à  $t^\circ$ , sera diminué de  $cn_0t$ ; de sorte qu'on aura

$$n_t = n_0 (1 - ct),$$

formule qui donne le nombre d'oscillations à  $0^\circ$ , quand on connaît le nombre  $n_t$  d'oscillations à  $t^\circ$ . Cela suppose que l'état magnétique de l'aiguille n'est pas modifié d'une manière permanente par la chaleur.

MM. Gauss, Weber et Goldsmith, ont fait des expériences sur le même sujet, en cherchant les déviations imprimées par l'aimant à différentes températures, à une aiguille aimantée très-mobile disposée comme celle des *magnétomètres* (1564). Si, par exemple, un aimant produit une déviation de  $N$  divisions sur l'échelle de l'instrument, et que, l'ayant refroidi de  $t^\circ$ , cette déviation devienne  $N + n$ , l'accroissement de force  $x$  produite dans l'aimant dont la force était d'abord  $f$ ,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXX, p. 413.

s'obtiendra par la proportion  $N : n = f : x$ ; d'où  $x = fn : N$ ; et l'augmentation de force pour  $t^o$  seulement sera  $fn : Nt$ .

On a trouvé ainsi que : 1<sup>o</sup> la chaleur affecte plus fortement les aimants faibles que les aimants puissants; 2<sup>o</sup> les changements d'intensité ne suivent pas les mêmes lois dans le refroidissement et dans l'échauffement; 3<sup>o</sup> ces changements ne se produisent pas instantanément; d'abord rapides, ils continuent de plus en plus lentement, et longtemps après que la température a été modifiée.

**1536. Influence de la température au moment de l'aimantation.** —

Les expériences sur les changements passagers d'intensité des aimants sous l'influence de la chaleur, ont souvent présenté des anomalies, que M. L. Dufour a expliquées, en considérant la température à laquelle le barreau a été aimanté<sup>1</sup>. Il a constaté, ce qui a été confirmé par M. Wiedmann<sup>2</sup>, que le refroidissement au-dessous de la température à laquelle a été faite l'aimantation, affaiblit les aimants, comme l'échauffement au-dessus. Par exemple, le barreau ayant été aimanté à 55°, puis porté à 0°, les intensités magnétiques, en prenant celle de la terre pour unité, ont été 1,228 et 1,208. Un barreau aimanté à 6 ou 8°, a donné, à 4° et à — 25°, les intensités 5,08 et 4,90. La température d'aimantation correspond donc à un *maximum* d'intensité, à partir duquel il y a toujours un affaiblissement, dans quelque sens que la température varie. Le refroidissement altérant moins l'intensité que l'échauffement, il en résulte que le coefficient d'une formule de correction pour les températures supérieures au point d'aimantation, ne convient pas pour les températures inférieures.

Un second fait important, constaté par M. L. Dufour, c'est que les oscillations de la température *au-dessus* du point d'aimantation sont suivies d'un affaiblissement permanent du barreau, d'abord rapide, puis très-faible, sans pourtant qu'il paraisse jamais devenir nul. Quand on opère au-dessous de la température d'aimantation, l'aimant arrive promptement à un état stable, et l'intensité est dès lors constante pour une même température. De plus, l'aimant paraît insensible aux variations de température inférieures au point d'aimantation, et d'autant plus que l'aimantation a été faite à une température plus élevée. Si, par exemple, elle a eu lieu à 55°, les variations d'intensité pour 1° ne sont que 0,000066, et tout à fait insensibles même pour 20 à 30°. Il faut remarquer cependant que, d'après les expériences de M. Wiedmann, des variations fréquentes de température au-dessous du point d'aimantation donnent au barreau la propriété de s'affaiblir par l'échauffement, comme si le point d'aimantation avait été abaissé.

Il résulte de ce qui précède qu'une aiguille destinée à être transportée dans différents climats, devra être de préférence aimantée à une température supérieure à celles qu'elle aura à subir; et qu'il faudra préalablement faire varier 20 à 30 fois sa température, entre le point d'aimantation et la température la plus basse qu'elle pourra avoir à supporter.

<sup>1</sup> *Bibl. univ. de Genève* (arch. des sc.), t. XXXI, p. 405, et XXXIV, p. 295.

<sup>2</sup> *Annales de Pogg.*, t. C, p. 235, et *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> s., t. L et LIII.

## § 5. — DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

## I. Précautions à prendre dans les observations magnétiques.

**1537.** L'étude du magnétisme terrestre, indépendamment de son importance pour la navigation, à cause de l'usage de la boussole, présente un intérêt scientifique d'autant plus élevé qu'il s'agit d'un phénomène qui embrasse toute la surface du globe. Cette étude se réduit à l'observation de trois termes, qui sont la *déclinaison* de l'aiguille aimantée, son *inclinaison* et l'*intensité* du magnétisme terrestre. Des navigateurs ont profité de leur passage dans les différentes mers et des relâches sur les côtes de divers pays pour déterminer la valeur de ces trois termes; des voyages autour du monde ont même été entrepris dans le but spécial de recueillir des données relatives à ce grand problème. Après avoir obtenu un nombre considérable de résultats dans toutes les parties du monde, on a tracé sur des globes terrestres des lignes passant par tous les points où la déclinaison, l'inclinaison ou l'intensité présentent la même valeur à une même époque. Ces lignes, reproduites ensuite sur des cartes, permettent de comparer les résultats à une époque donnée, et d'en embrasser l'ensemble d'un seul coup d'œil. — La plupart des observations étant faites sur des navires, les masses de fer qu'ils contiennent occasionnent des erreurs qu'il faut savoir éviter ou corriger; telle est la question qui va d'abord nous occuper.

**1538. Influence du fer des vaisseaux sur l'aiguille aimantée.** — Le fer que contiennent les vaisseaux agit sur l'aiguille aimantée de trois manières différentes : 1° comme fer doux agissant sur les pôles de l'aiguille; 2° comme aimant permanent, le fer travaillé n'étant pas entièrement dépourvu de force coercitive; 3° comme formant, sous l'influence du globe, un aimant temporaire dans lequel la position des pôles dépend de l'orientation du navire. — Le premier effet est très-faible et peut être évité en éloignant toute pièce de fer de l'aiguille aimantée. Le deuxième n'a aussi que peu d'influence; s'il était seul et ne variait pas, on pourrait en tenir compte en faisant tourner le navire sur lui-même, et prenant la moyenne des positions extrêmes que prendrait alors l'aiguille par rapport au méridien, les diverses actions exercées par les pièces aimantées du navire, donnant un couple résultant, qui se combine avec celui de la terre. Le troisième effet est le plus important, d'autant plus qu'il change avec la latitude, en même temps que la direction et l'intensité de l'action magnétique terrestre (1503).

On a été longtemps avant de se douter des erreurs apportées aux indications des boussoles par le fer des vaisseaux, les anciens instruments étant peu sensibles; et le fer, moins employé dans les navires. Aujourd'hui que les caisses à eau sont en tôle, qu'on emploie des canons en fer, des ancres plus fortes et plus nombreuses, des chaînes au lieu de câbles..., les erreurs, dans les navires de

bois, peuvent atteindre 15 à 20°. Cependant, dès 1666, un hydrographe d'après, Guillaume Denys, faisait remarquer que deux boussoles placées en deux endroits différents d'un navire n'étaient pas d'accord. L'astronome Wales, qui accompagna Cook dans ses voyages, s'est spécialement préoccupé de l'influence du fer sur l'aiguille. Walker cite un rapport, fait, en 1794, par un maître timonier nommé Dewnie, qui signale cette influence, et dit qu'elle dépend du navire, tellement que deux navigateurs qui croient suivre la même route d'après leur boussole suivent rarement des directions parallèles. En 1801, le capitaine Flinders évalua les erreurs dans différentes orientations du navire, les trouva beaucoup plus grandes qu'on ne le croyait, et essaya d'y remédier.

Depuis, une foule de navigateurs, Ross, Parry, Duperrey, Sabine..., se sont occupés du même sujet. Parry éloignait toute pièce de fer de la boussole, remplaçait les canons de fonte de l'arrière par des canons de bronze, et atténuait ainsi les erreurs. Pour se rendre compte de leur importance, il comparait les indications de la boussole du navire, auquel il donnait successivement différentes orientations, à celles d'une autre boussole installée sur le rivage. Deux observateurs placés près des boussoles visaient l'un à l'autre, au moyen d'une lunette, à un signal donné, et chacun d'eux observait l'angle que faisait son aiguille avec l'axe commun des deux lunettes. La boussole (fig. 1066) est très-propre à ces sortes d'expériences. La plus grande différence de déclinaison des deux instruments, qui avait lieu quand le navire était dirigé de l'est à l'ouest, était de 4°, 15'; elle était presque nulle quand il était dirigé du nord au sud. Des expériences analogues, faites dans la baie de Baffin, où l'inclinaison était de 84°, 25', ont donné plus de 16° de différence dans la première orientation du navire, la différence étant toujours à peu près nulle dans la seconde.

**Méthode de Duperrey.** — Avant d'entreprendre son voyage de circumnavigation en vue d'observations magnétiques, Duperrey supprima les canons du gaillard d'arrière, et fit clouer et cheviller en cuivre l'espace autour de la boussole jusqu'à 3 ou 4<sup>m</sup> de distance. Ces précautions rendirent les erreurs faibles; car, ayant fait tourner la corvette sur elle-même, près de l'équateur, par une mer calme, la plus grande différence entre les angles formés par l'aiguille de déclinaison et le plan vertical passant par le soleil couchant fut de 1°, 25', quand le navire était dirigé de l'O.NO. à l'E.SE. Elle ne fut que de 25', aux îles Malouines, par 51° de latitude australe. L'inclinaison n'était aussi que très-peu altérée: sur 17 stations, de l'équateur à la latitude australe de 43°, la plus grande différence entre l'inclinaison à bord et l'inclinaison sur la côte voisine a été de 42', 4 à Payta. On a remarqué que les différences sont plus grandes, à égalité de latitude, au nord de l'équateur magnétique qu'au sud. De plus, l'inclinaison est généralement plus petite à bord qu'à terre dans l'hémisphère austral, contrairement à ce qui a lieu dans l'hémisphère boréal.

**1839. Méthode de Barlow.** — Barlow, après de longues recherches, publiées en 1823, est parvenu à évaluer directement les effets du fer des navires sur la boussole. Il commença par étudier l'action sur une petite aiguille aimantée,

de boules de fer (bombes, boulets) placées dans différentes positions et toujours à la même distance. Il reconnut que ces boules présentaient deux pôles placés sur un diamètre parallèle à la direction de la force magnétique de la terre. L'aiguille n'est pas influencée quand son point de suspension se trouve dans le plan de la ligne neutre de la boule de fer, ou dans le méridien magnétique qui passe par son centre; ce qu'il est facile d'expliquer si l'on suppose que l'aiguille est assez éloignée de la boule pour que l'action magnétique de cette boule forme un couple.

**Plaque de correction.** — Barlow reconnut, dès lors, que l'action du fer des navires provient de la polarité magnétique que lui communique la terre, et que l'effet résultant est le même que celui d'un aimant dont l'axe serait dans le méridien magnétique et changerait, par rapport à l'axe du navire, avec la position de ce dernier; il songea alors à produire les mêmes effets au moyen d'une masse de fer convenablement placée, qui, éprouvant les mêmes modifications magnétiques dans les changements de latitude, devrait toujours conserver la

même position pour produire ces mêmes effets. Il nomma cette masse de fer *compensateur magnétique* ou *plaque de correction*.

La plaque de correction se compose de deux disques de fer *c, c'* (fig. 1064), de 30<sup>cm</sup> environ de diamètre, séparés par une lame de bois et traversés, au centre, par une tige de cuivre *t* de 4<sup>cm</sup> de diamètre. Les deux plaques sont

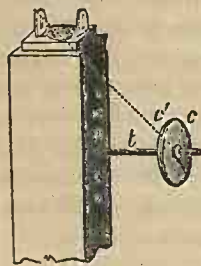


Fig. 1064.

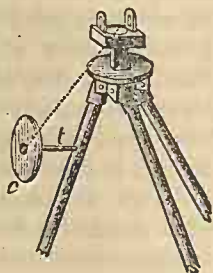


Fig. 1065.

pressées l'une contre l'autre par des écrous tournant sur cette tige et par trois petites vis placées près des bords. On commence par prendre note des déviations produites par l'action du fer du navire dans ses différentes positions, en comparant, comme ci-dessus, la boussole qui est à bord à une autre placée sur le rivage. On transporte ensuite la boussole du navire à la place de l'autre, et on la pose sur un socle de bois (fig. 1064) pouvant tourner sur lui-même, et percé de plusieurs trous. On cherche ensuite, par tâtonnement, dans quel trou et à quelle profondeur il faut enfoncer la tige de la plaque *cc'*, pour que l'aiguille aimantée éprouve, quand on fait tourner le socle, des déviations égales à celles qu'elle éprouvait à bord. On mesure ensuite exactement la distance du centre de la plaque à la verticale et à l'horizontale qui passent par le centre de l'aiguille. On reporte ensuite la boussole dans le navire, et l'on ajuste le *compensateur* sur le trépied qui la supporte, de manière qu'il ait la même position relative, comme on le voit en *ct* (fig. 1065). On voit que, la plaque ajoutant son effet à celui du fer du vaisseau, l'erreur sera doublée. On pourra donc toujours la connaître en



faisant deux observations de déclinaison : l'une, après avoir enlevé la plaque, l'autre, après l'avoir mise en place. La différence entre les deux résultats sera le double de l'erreur cherchée; on en prendra donc la moitié, et on la retranchera de la déclinaison observée sans la plaque, si celle-ci a augmenté la déclinaison, et on l'ajoutera dans le cas contraire.

Par cette méthode, on ne corrige les erreurs que d'une manière approximative, parce que : 1<sup>o</sup> l'état de la plaque de correction est lui-même modifié par le fer du vaisseau, et d'une manière qui varie avec son orientation; 2<sup>o</sup> la force coercitive qui peut exister dans les masses de fer change avec la température et avec le temps; 3<sup>o</sup> des différences imperceptibles en certains pays peuvent devenir sensibles dans des latitudes plus élevées, où l'influence que l'on veut combattre est beaucoup plus prononcée. Il est donc très-utile de régler la position de la plaque de correction quand on s'éloigne beaucoup des lieux où elle a été réglée d'abord; 4<sup>o</sup> le déplacement de masses de fer assez considérables, par exemple d'une ancre que l'on jette à la mer et de sa chaîne, suffit pour modifier la correction. Toutes ces causes d'incertitude sont énormément augmentées dans les navires blindés, ou dont la coque est en fer, ou enfin dans ceux qui portent de lourdes machines à vapeur.

Il résulte de là que, toutes les fois qu'il sera possible, il vaudra mieux observer à terre ou dans un canot remorqué à une grande distance par le navire; ou encore, comme l'a proposé M. Faye, placer momentanément la boussole sur la planche du loch, qui s'aligne dans la direction de la marche du navire, et fixer de loin, par un mécanisme spécial, l'aiguille qui s'est orientée, pour en examiner la position après l'avoir ramenée à bord.

Poisson a expliqué par le calcul l'effet du compensateur de Barlow, en montrant qu'une masse unique de fer convenablement placée peut annuler l'influence d'un nombre quelconque de masses de fer irrégulièrement distribuées dans un navire, quelle que soit la position de ce dernier.

**15-10. Influence du fer des vaisseaux sur les chronomètres.** — Les chronomètres qui servent à la détermination des longitudes renferment des pièces d'acier qui s'aimantent et sont influencées ensuite par le fer du vaisseau, de manière que leur marche est altérée quelquefois de 10<sup>s</sup> par jour. Le capitaine Buchan paraît avoir, le premier, observé ce phénomène, lors de son voyage au pôle Nord. Barlow et Evans ont reconnu que la marche des instruments est tantôt accélérée, tantôt retardée. M. Fisher a toujours obtenu une accélération en plaçant des masses de fer près de l'instrument, et cependant il paraît constant qu'il y a retard dans presque tous les cas. Un boulet placé à 54 ou 81<sup>cm</sup> peut porter ce retard à 4<sup>s</sup> par jour.

Des expériences de M. Fisher, et de M. Frodsham, sur des parties détachées d'un chronomètre, ont montré que la cause perturbatrice agit sur le balancier et son ressort; car elle n'agit plus quand on les fait en cuivre.

Pour éviter les erreurs dont il s'agit, il faut éloigner le chronomètre de toute masse de fer, ou le poser sur un support muni d'un compensateur de Barlow.

## II. De la déclinaison.

**1541. BOUSSOLES DE DÉCLINAISON.** — Les instruments destinés à mesurer la déclinaison aux différents points de la surface du globe se nomment *boussoles de déclinaison*. On les construit sous différents modèles. La figure 1066 représente la boussole de Lenoir, dont on s'est contenté pendant longtemps :  $rfr'$  est une boîte circulaire de cuivre<sup>1</sup>; au centre est suspendue, sur une pointe, une aiguille horizontale dont les extrémités parcourent une division en degrés. Une glace préserve l'aiguille des agitations de l'air. La boîte  $rfr'$  peut tourner autour

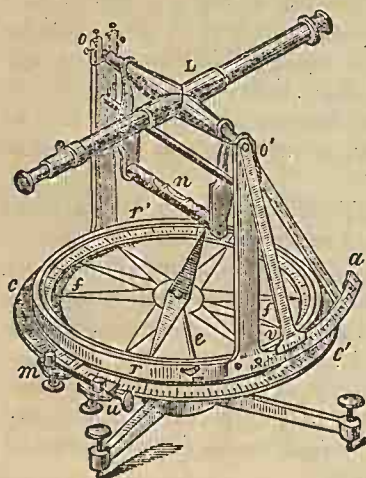


Fig. 1066. —  $\frac{1}{6}$ .

d'un axe vertical fixé en dessous à son centre, et engagé dans un tube porté par le pied de l'instrument; elle est munie de deux verniers opposés,  $m$ , qui parcourent les divisions d'un cercle horizontal  $cc'$  fixé par six bras au pied de l'instrument. Une pince, à vis de pression  $m$  et une vis de rappel  $u$  permettent de donner avec précision, à la boîte  $rfr'$  la position désirée. Cette boîte porte deux montants verticaux qui soutiennent une lunette à réticule  $L$ , mobile autour d'un arbre horizontal  $oo'$  parallèle au cercle  $cc'$ . Un niveau à bulle d'air  $n$ , soutenu par des crochets qui s'appuient sur deux parties de l'arbre  $oo'$  égales et tournées avec soin, sert à reconnaître si cet arbre est parfaitement horizontal. L'axe optique de la lunette décrit alors dans ses mouvements autour de  $oo'$ , un

plan vertical qui passe par le centre de la boîte  $rfr'$  et dont la trace sur le fond est marquée par une ligne diamétrale qu'on nomme *ligne de foi*. Le levier  $o'v$  fixé à l'extrémité de l'arbre  $oo'$ , et muni d'un vernier  $v$  qui parcourt les divisions du quart de cercle  $a$ , fait connaître l'angle que fait la lunette avec l'horizon.

La figure 1067 représente l'aiguille  $sn$  de la boussole, et  $SN$ , sa coupe verticale. Au centre de figure est un trou circulaire par lequel on peut l'ajuster exactement sur la chape  $c$ , ou l'en séparer à volonté. La chape est formée d'une agate creusée pour recevoir la pointe du pivot, et enchâssée dans un petit plateau de cuivre qui se relève autour d'elle, de manière à former un cylindre vertical

<sup>1</sup> On évite d'employer le laiton, parce que le zinc qui entre dans sa composition peut contenir des parcelles de fer. On a vu des boussoles où il y en avait tant que l'aiguille tournait avec la boîte de laiton, et pouvait s'arrêter dans toutes les positions.

exactement de même diamètre que le trou central de l'aiguille. Un levier  $e, e$  (fig. 1066 et 1067), terminé par un anneau qui entoure le pivot, s'élève, quand on appuie sur l'extrémité qui sort de la boîte  $rsr'$ , de manière à soulever la chape et à l'empêcher de porter sur la pointe quand on ne se sert pas de l'instrument.

Pour observer, on agit sur les vis calantes du pied, de manière que le niveau  $n$  soit horizontal dans toutes les positions de la boîte  $rsr'$ . On cherche ensuite l'angle que fait l'aiguille avec le plan vertical qui passe par une étoile connue. Pour cela, on fait tourner la boîte  $rsr'$  de manière à amener le centre du réticule sur l'étoile, et l'on observe l'angle que fait alors la ligne de foi, avec l'aiguille. Il reste ensuite à trouver, par les moyens astronomiques, l'angle que fait le vertical de l'étoile, à l'heure de l'observation, avec le méridien géographique. Cet angle est ajouté au premier angle observé, quand le méridien se trouve du même côté de l'aiguille que le plan vertical de l'étoile; on l'en retranche dans le cas contraire. — Au lieu d'une étoile, on peut viser une mire éloignée dont on a relevé d'avance la position par rapport au méridien.

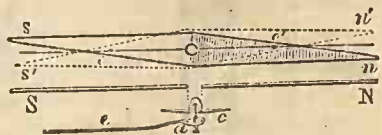


Fig. 1067.

**1542. Méthode de retournement.** — La direction que l'on observe est en réalité celle de l'axe de figure de l'aiguille. Mais il peut arriver que

cet axe ne coïncide pas avec son axe magnétique; par exemple, ce dernier peut être dirigé suivant  $oo'$  (fig. 1067). Pour éviter cette cause d'erreur, après avoir observé l'angle que fait l'axe de figure avec la ligne de foi, on enlève l'aiguille de dessus la chape, et on l'y remet après l'avoir retournée de manière que la face qui était en dessus se trouve en dessous. L'axe magnétique prendra spontanément la même direction que dans la première observation, mais l'axe de figure aura une position différente, que l'on trouve en faisant tourner l'aiguille  $ns$ , autour de  $oo'$ ; elle vient alors en  $n's'$ , et l'on voit que l'axe magnétique divise en deux parties égales l'angle des axes de figure  $ns, n's'$ . L'angle formé par l'axe magnétique avec la ligne de foi est donc la moyenne entre les angles que fait successivement l'axe de figure avec la même ligne, quand on retourne l'aiguille.

**1543. Boussole de déclinaison de Gambey.** — Dans cet instrument, beaucoup plus précis que le précédent, l'aiguille est remplacée par un petit barreau suspendu horizontalement par un paquet de fils de soie sans torsion. Ces fils, enroulés sur un petit treuil  $e$ , dont le support peut tourner sur lui-même, pour supprimer la torsion s'il y a lieu<sup>1</sup>, traversent une caisse vitrée  $v$ , portée par la boîte  $BB'$ . Cette boîte est mobile autour d'un axe vertical que

<sup>1</sup> On s'assure qu'il n'y a pas de torsion, en substituant à l'aimant un barreau de cuivre de même poids; ce qui se fait en enlevant la moitié de la boîte  $BB'$ .

soutient le pied de l'instrument, et porte deux verniers, dont un muni d'une vis de rappel, qui parcourent les divisions d'un cercle azimutal fixe  $e$ .  $L'$  est une lunette dont l'axe optique décrit un plan vertical quand son axe de rotation est horizontal, ce que l'on reconnaît au moyen du niveau placé au-dessus. L'aimant est un barreau de 500<sup>mm</sup> de longueur, de 15 de largeur et de 3,5 d'épaisseur, posé sur un double crochet suspendu aux fils de soie, de manière qu'on peut facilement le retourner sur lui-même. Il porte, à chaque extrémité, un anneau de cuivre avec fils croisés, représenté à part en  $A$ , et que l'on aperçoit par les ouvertures vitrées  $l, l$ . Deux autres ouvertures,  $t$ , servent à passer les doigts pour arrêter les oscillations, et il en existe encore deux autres, en dessous, par lesquelles on renvoie de la lumière pour éclairer les fils. En  $L$  est une lunette témoin.

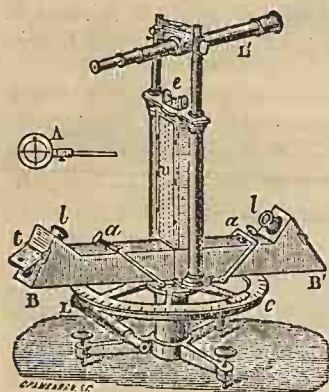


Fig. 1068.

Pour observer, on commence par viser une étoile connue, au moyen de la lunette  $L'$ , et l'on note la division qui correspond au vernier  $e$ . On remplace ensuite la lunette  $L'$  par un microscope, et l'on vise, par l'une des ouvertures  $l$ , le point de croisement des fils qui sont à l'extrémité de l'aimant, en faisant tourner la boîte  $BB$ , jusqu'à ce que ce point paraisse coïncider avec le centre du réticule du microscope. La quantité dont on fait tourner la boîte  $BB$  donne alors l'angle que fait l'axe de l'aimant avec le vertical de l'étoile. On fait une seconde observation en visant l'autre extrémité de l'aimant, et l'on prend la moyenne, afin d'éviter l'erreur qui pourrait provenir de ce que la ligne, passant par les centres des anneaux de cuivre, ne

serait pas exactement dans le plan vertical que décrit l'axe optique de la lunette. On recommence enfin, après avoir retourné l'aimant sur lui-même.

Au lieu de remplacer la lunette par un microscope, on applique au centre de l'objectif, ou lentille tournée vers le point visé, une seconde lentille plus petite, que l'on couvre d'un écran quand on vise une étoile, tandis qu'on la découvre en cachant la partie extérieure de l'objectif (ce qui change la lunette en microscope) quand on veut observer l'extrémité de l'aimant.

**1544. Boussole de M. A. Prazmowski.** — Ce petit instrument, éminemment portatif, a été notablement perfectionné d'après un autre, imaginé par Gauss; il est représenté (fig. 1069) posé sur une règle, qui est employée seulement quand on veut le faire servir aux mesures d'intensité.  $BA$  est une boîte de cuivre à vis calantes, au centre de laquelle est fixé le pivot de l'aiguille aimantée, qui est disposée comme dans la figure 1067. Un collier  $D$ , garni d'une glace sur laquelle on pose un niveau pour installer l'appareil, s'ajuste comme un couvercle, sur la boîte  $BA$ . Les extrémités de l'aiguille parcourent une

division en tiers de degré tracée sur un mince disque de verre fixé au collier D. Une petite lunette L, mobile dans un plan vertical parallèle à la ligne de foi, sert à viser une mire éloignée. La double opération se fait, du reste, comme avec la boussole (fig. 1066). On peut la répéter en retournant le collier de  $180^\circ$ , de manière à éliminer, dans la moyenne, l'influence des parcelles de fer que pourrait contenir l'instrument.



Fig. 1069. — 1/15.

**1545. Théodolite magnétique de M. Lamont.** — Cet instrument précis, très-commode pour les voyages, se compose d'un cercle horizontal gradué  $r$  (fig. 1070) porté par un pied à vis calantes, et dans lequel peut tourner un disque muni de deux verniers et soutenant la lunette à réticule L. Sur ce disque en est appuyé un autre,  $n$ , qu'on peut en rendre solidaire au moyen de deux petites vis, et qui porte l'aiguille aimantée et son système de suspension. Cette aiguille consiste en un petit barreau préservé des agitations de l'air par une enveloppe de verre  $ab$ , et suspendue à des fils de cocon sans torsion, fixés au haut d'un tube de cuivre  $t$  de  $20^{\text{cm}}$  de hauteur. Le barreau porte en dessous un miroir plan perpendiculaire à son axe magnétique.

Après avoir placé le cercle gradué bien horizontalement, en s'aidant du niveau qui se voit à droite du disque  $n$ , on tourne ce disque de manière que le barreau ne touche pas l'enveloppe  $ab$ , et l'on place la lunette de manière qu'en regardant à travers, on voie par réflexion, dans le miroir, l'image du réticule. Celui-ci est vivement éclairé par la lumière du ciel tombant, par l'ouverture  $c$ , sur une petite glace sans tain inclinée à  $45^\circ$ . On fixe alors les deux disques l'un à l'autre, et, au moyen de la vis de rappel  $u$ , on déplace

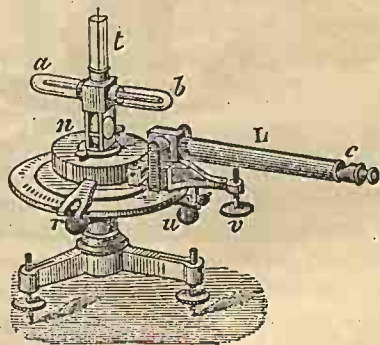


Fig. 1070. — 1/4.

lentement la lunette, jusqu'à ce que le réticule paraisse coïncider avec son image. La lecture des verniers fait connaître l'angle de l'aimant avec la ligne de foi du cercle divisé  $r$ . On enlève ensuite le système  $tn$  qui porte l'aimant, et l'on vise, avec la lunette, qui peut être plus ou moins inclinée au moyen de la vis  $v$ , une mire éloignée dont on a déterminé l'azimut.

Nous verrons plus loin comment cet instrument se prête à la mesure de l'inclinaison et de l'intensité magnétique de la terre.

Pour reconnaître si le plan du miroir suspendu à l'aimant est exactement perpendiculaire à son axe magnétique, on compare les indications de l'instrument à celles des *appareils fixes* des observatoires magnétiques, appareils que nous décrirons en parlant de ces sortes d'établissements (1562).

**1546. Théodolite magnétique de MM. Brunner.** — Cette boussole de voyage, dont nous empruntons le dessin à l'*Annuaire météorologique de Montsouris pour 1878*, présente deux cercles gradués A, D (fig. 1071), disposés

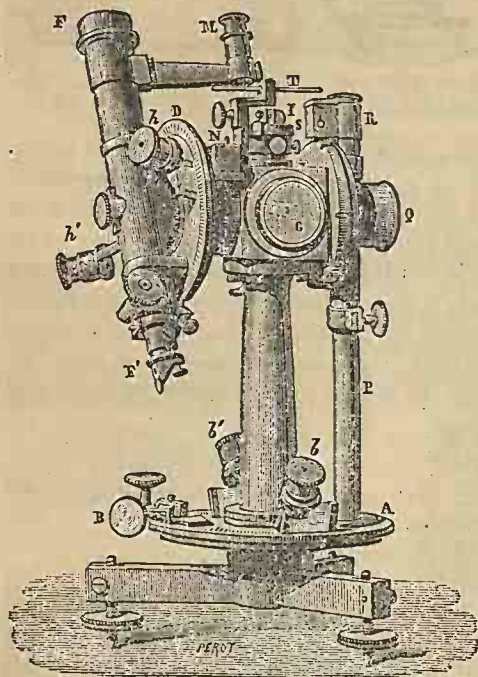


Fig. 1071.

comme ceux d'un théodolite. La lunette FF', qui se meut sur le cercle vertical D, entraîne le microscope M, qui lui est fixé parallèlement. Ce microscope porte un réticule, au moyen duquel on vise l'extrémité d'un petit barreau aimanté G renfermé dans une caisse cylindrique garnie de glaces. Le fil de suspension s'enroule sur un petit treuil I porté par une virole s, mobile sur elle-même et pouvant être déplacée par quatre vis de réglage, pour mettre le fil exactement dans le plan vertical que décrit l'axe du microscope.

Pour évaluer la déclinaison, on enlève les pièces P et NT, qui ne servent qu'à la détermination, de l'inclinaison et de l'intensité, et, après avoir bien installé l'instrument, on pointe le micros-

cope sur un repère tracé à l'extrémité de l'aiguille, et on lit l'angle que fait le plan du cercle D avec la ligne de foi du cercle horizontal A. La lunette FF' fait ensuite connaître la position du méridien géographique par la méthode ordinaire.

La déclinaison pouvant éprouver des variations sensibles pendant les deux ou trois heures que demandent les quatre observations nécessaires pour obtenir un résultat précis (1543), on n'obtient réellement que la valeur moyenne de la déclinaison pendant ce temps. M. Marié-Davy diminue la durée de l'opération en observant l'aiguille pendant qu'elle oscille encore. Pour reconnaître si l'amplitude des oscillations est la même des deux côtés de l'axe du microscope, il place au foyer, un micromètre sur verre divisé en dixièmes de millimètres.

**1547. Boussole marine.** — Cet instrument, connu aussi sous le nom de *compas des variations*, se compose d'une boîte cylindrique de cuivre BB (fig. 1072) à suspension de Cardan, c'est-à-dire mobile autour de deux axes horizontaux perpendiculaires l'un à l'autre, soutenus par deux anneaux, de manière que la base supérieure de la boîte BB reste horizontale pendant les oscillations du navire. L'anneau *aa'* est fixé, par des montants verticaux, à un plateau qui peut tourner sur lui-même. L'aiguille aimantée est suspendue sur une pointe fixée au fond de la boîte BB'; elle porte un disque de papier, rendu rigide par une mince lame de talc, sur lequel sont tracés la rose des vents et les degrés de la circonférence. Le zéro correspond à l'axe de l'aiguille aimantée, dont l'extrémité nord est indiquée par un signe particulier. Deux pinnules sont placées aux extrémités d'un même diamètre de la boîte : l'une, *f*, porte un fil vertical tendu au milieu d'une petite fenêtre ; l'autre, à laquelle on applique l'œil, est une plaque fendue verticalement, derrière laquelle est disposé un petit miroir *n* incliné à 45°. Le tain de ce miroir est enlevé suivant une ligne correspondante à la fente, de manière qu'on puisse voir le fil vertical de la pinnule *f*. — Pour observer, on fait tourner la boussole sur elle-même, et l'on vise à travers les deux pinnules *e*, *f'*, comme on le voit en *sn'*, au bas de la figure, une étoile *s* élevée de 15 à 20° au-dessus de l'horizon. En même temps, on aperçoit, dans le miroir *n'*, l'image de la ligne de foi tracée en dedans de la boîte, et la division de la rose qui coïncide avec cette ligne de foi. On voit ainsi d'un seul coup d'œil l'angle que fait l'aiguille aimantée avec le vertical de l'astre, et l'on détermine, par les moyens ordinaires, l'angle de ce vertical avec le méridien.

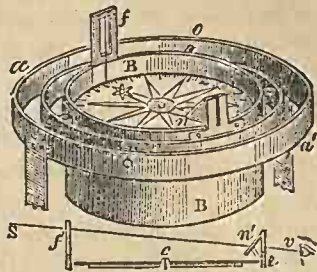


Fig. 1072. — 1/10.

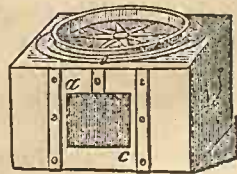


Fig. 1073.

Dans les boussoles destinées à indiquer seulement la direction de l'axe du navire, il n'y a plus de pinnules, et l'on observe simplement le *cap*, c'est-à-dire l'angle que fait l'aiguille avec cet axe. On en retranche ensuite, ou l'on y ajoute la déclinaison supposée connue.

Pendant la nuit, on éclaire la boussole (fig. 1073) par l'ouverture *ac*, au moyen d'une lampe dont la lumière traverse le disque divisé qui est translucide.

Dans les navires à hélice, la trépidation produite à l'arrière sur le propulseur agite continuellement l'aiguille; on évite cet inconvénient en la plaçant sur un flotteur posé sur un liquide. L'eau se congelant facilement et l'alcool s'évaporant, M. Santi a eu l'idée de les remplacer par la glycérine qui ne présente pas les mêmes inconvénients.

**Des aiguilles des boussoles.** — La forme de losange est la plus convenable ;

le poids étant alors moindre, à égalité de force magnétique (1518). Coulomb a reconnu que le frottement sur le pivot est proportionnel au poids de l'aiguille, quand la pointe est un peu usée; et, comme la force magnétique diminue moins rapidement que l'épaisseur, il y a tout avantage à employer des aiguilles minces. Quand elles ont une forme prismatique, la longueur est à peu près indifférente; car le moment et le poids sont proportionnels à cette longueur. La chape se fait en laiton, agate, verre, grenat; elle est creusée en dessous, et la cavité, tournée avec soin, a la forme d'un cône très-évasé. La pointe du pivot doit être un peu arrondie; l'angle au sommet est ordinairement de 15 à 20°. Pour les usages de la mer, où les agitations la fatiguent davantage, on la fait moins effilée, et on la fabrique en laiton, l'acier s'oxydant rapidement à l'air de la mer. On combat l'*inclinaison*, au moyen d'un petit contrepoids, qu'on éloigne du centre quand on s'avance notablement vers le pôle.

M. E. Duchemin a remplacé l'aiguille ordinaire par deux cercles concentriques d'acier réunis par une traverse non magnétique, et aimantés de manière que leurs pôles soient aux extrémités d'un même diamètre. Des expériences faites en 1875, à la demande du ministre de la marine, ont montré que cette *aiguille circulaire* est très-sensible, plus rebelle au roulis, et moins influencée par le fer du navire que l'aiguille ordinaire.

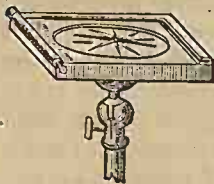


Fig. 1074. —  $\frac{1}{12}$ .

— La figure 1074 représente une *boussole d'arpenteur*. La ligne de foi est parallèle à l'un des côtés de la boîte, auquel est fixée une petite lunette à réticule ou une alidade à pinnules, qui sert à viser dans la direction que l'on veut comparer à celle de l'aiguille.

Il règne beaucoup d'incertitudes sur la découverte de l'action de la terre sur l'aiguille aimantée. La boussole était employée, en Europe, dans la navigation, au douzième siècle; on la désignait sous le nom de *guide-aimant*, *marinière* ou *marinette*. Guyot de Provins en parle, vers 1180, dans un petit poème en langue gauloise, et dit que l'aiguille tourne constamment sa pointe du côté de l'étoile polaire<sup>1</sup>. On a donc tout lieu de croire que la boussole a été connue d'abord en France, vers le commencement du douzième siècle, d'autant plus que la fleur de lis, qui marque le pôle nord de l'aiguille, a été adoptée dans tous les pays. Cependant, on en a attribué l'invention à Flavius Gioja d'Amalfi; mais il y a

<sup>1</sup> . . . . .  
Quand la mer est obscure et brune,  
Quand ne voit estoile ne lune,

Dont font à l'aiguille allumer.  
Puis n'ont-ils garde d'esgarer.  
Contre l'estoile va la pointe.



évidemment erreur, ce navigateur ayant vécu au quatorzième siècle. Tout ce qu'on peut lui accorder, c'est d'avoir suspendu l'aiguille à demeure sur une pointe, tandis que auparavant, on la faisait flotter sur l'eau au moment d'observer. On a prétendu aussi que les Chinois se dirigeaient au moyen de la boussole, à travers les steppes de la Tartarie, plus de mille ans avant notre ère. On s'appuie sur des documents publiés par Duhalde dans sa *Description de la Chine*, et sur divers passages de l'*Encyclopédie japonaise*, qui parlent de chars, portant une petite figure mobile, dont le bras étendu indiquait le sud. On ajoute que Marco Paolo, qui allait en Chine par la mer Rouge, avait pu en rapporter cette invention; mais ce célèbre voyageur ne revint en Europe qu'en 1295. Des critiques érudits ont soutenu, au contraire, que les Chinois ont connu la boussole par leurs relations avec les Européens, et que les documents dans lesquels ils s'en attribuent l'invention, ont été fabriqués après coup, par orgueil national. En effet, les Chinois font flotter l'aiguille sur l'eau, comme on l'a fait d'abord en Europe, et ils n'ont pas de mot particulier pour nommer l'instrument, qu'ils indiquent par une périphrase<sup>1</sup>.

Cependant de Humboldt admet que les Chinois ont connu l'art de se diriger au moyen de l'aimant, plus de mille ans avant notre ère, et qu'au troisième siècle, plus de sept cents ans avant l'introduction de la boussole en Europe, leurs jonques naviguaient sur l'océan indien en se servant de l'indication magnétique du sud<sup>2</sup>.

On trouve enfin, dans les œuvres d'Albert le Grand<sup>3</sup>, un passage tiré du *Traité des pierres* d'Aristote, actuellement perdu, d'où il résulterait que les anciens occidentaux auraient connu la direction de l'aiguille aimantée, et en auraient fait usage sur mer. La précieuse propriété, oubliée pendant des siècles, aurait été retrouvée au douzième siècle, peut-être d'après l'indication d'Aristote, dont les ouvrages furent révélés aux Européens, vers cette époque, par Albert le Grand, qui les a connus par une traduction arabe. Si, maintenant on admet que les Chinois et les Indiens ont connu la boussole avant les Européens, on conçoit comment Aristote aurait pu en avoir communication lors de la conquête de l'Inde par Alexandre le Grand. Mais le silence des auteurs anciens, qui ont cependant énuméré et décrit toutes les parties essentielles des différentes espèces de navires, autorise à regarder le passage cité comme apocryphe, d'autant plus que l'ouvrage d'Aristote *De Lapidibus* ne se trouve cité nulle part ailleurs.

**15-19. DE LA DÉCLINAISON EN DIFFÉRENTS LIEUX.** — La déclinaison n'est pas la même aux différents points de la surface du globe. Les premières observations suivies, sur ce sujet, ont été faites en 1599, d'après les ordres du prince de Nassau, par les navigateurs hollandais. On était encouragé dans ces sortes de recherches par l'idée que la déclinaison en un point donné pourrait en faire

<sup>1</sup> *Dissertation sur l'origine de la boussole*, par D.-A. Azuni, 4819.

<sup>2</sup> *Examen critique de l'histoire de la géographie*, t. III, p. 36.

<sup>3</sup> *Beati Alberti magni*, etc., op. t. II, de *Mineralibus tractatus* 2, cap. VI.

connaître la longitude ; mais la découverte des variations en un même lieu a fait renoncer à cette espérance. Halley, voulant vérifier certaines idées théoriques sur ces variations, entreprit un long voyage sur un navire que lui confia le gouvernement anglais, et, en réunissant ses observations à celles que l'on possédait déjà, il dressa des cartes sur lesquelles étaient tracées de 5° en 5° les lignes d'égalé déclinaison, ou *isogoniques*. Ces cartes firent sensation à l'époque où elles parurent, mais on n'avait pas tenu compte de l'influence du fer du vaisseau ; de plus, la déclinaison varie en un même lieu : elles se trouvèrent donc bientôt inexactes. Mountain et Dodson publièrent de nouvelles cartes en 1745 et 1746, et Hansteen, en 1787, fit paraître un Atlas magnétique plus complet que tout ce qui avait été fait jusque-là. Churchman, en 1794, dressa aussi de ces cartes, et essaya de trouver les lois de la déclinaison, en partant de l'existence de deux

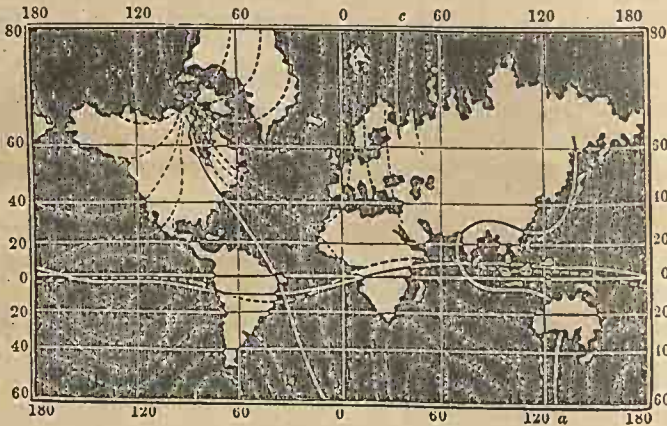


Fig. 1075.

pôles magnétiques, qu'il supposait tourner autour des pôles terrestres, celui du nord en 1096 ans, et celui du sud en 2289 ans.

**Lignes isogoniques.** — Barlow a publié, en 1823, un grand travail sur les déclinaisons aux divers points de la surface du globe. C'est d'après les premières cartes qu'il a dressées qu'a été faite la figure 1075. Les lignes ponctuées représentent des *lignes isogoniques*. On voit combien elles sont irrégulières ; mais il faut remarquer que leurs formes sont altérées, surtout dans les latitudes élevées, par le système de projection de Mercator, adopté dans cette carte.

**Ligne sans déclinaison.** — Parmi les lignes isogoniques, il faut remarquer les *lignes sans déclinaison*, c'est-à-dire la série des points sur lesquels l'axe de l'aiguille aimantée coïncide avec le méridien géographique. Une de ces lignes, représentées sur la figure en traits pleins, commence au nord-ouest de la baie d'Hudson, traverse le Canada, coupe l'Amérique méridionale près du

cap Saint-Roch, et vient rencontrer le méridien de Paris vers le 65<sup>e</sup> degré de latitude australe. Une deuxième ligne sans déclinaison, partant au sud, du point *a*, traverse la Nouvelle-Hollande, enveloppe dans une vaste sinuosité, du côté de l'ouest, les îles de l'Océanie et les deux Indes, puis remonte au nord, longe le Japon, et vient aboutir à la Sibérie. Une autre branche, dont on voit l'extrémité en *c*, traverse la mer Blanche. On pense qu'elle n'est que la continuation de la courbe de l'Océanie, à laquelle elle se joindrait à travers l'Asie continentale, où les observations manquent. Il y a donc deux lignes sans déclinaison; mais on peut les regarder comme se continuant l'une avec l'autre par les régions polaires, de manière à ne former qu'une seule courbe faisant le tour de la terre.

Entre les deux lignes sans déclinaison de la figure, c'est-à-dire dans l'océan Atlantique et dans l'ouest de l'ancien continent, la déclinaison est *occidentale*; en dehors, elle est *orientale*, et elle diminue à mesure qu'on s'approche de ces

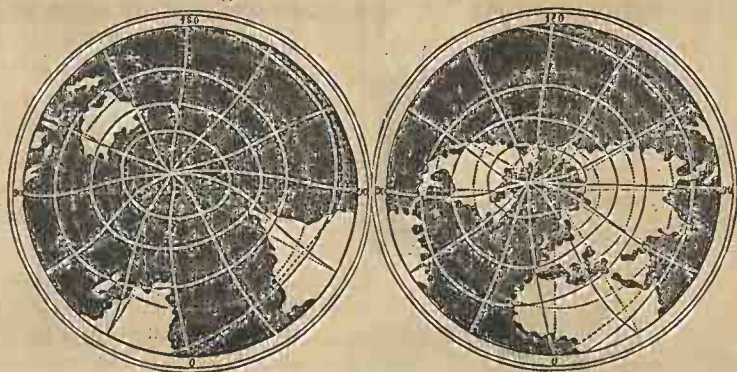


Fig. 1076.

lignes. Dans l'océan Pacifique, on remarque des courbes fermées enveloppant les îles Marquises, et dans lesquelles la déclinaison diminue à mesure que ces courbes se resserrent : ce sont les ovales de la mer du Sud, signalés par A. Erman. Il y en a de semblables, mais moins étendues, au nord-est de l'Asie; seulement, la déclinaison augmente de dehors en dedans.

Les lignes sans déclinaison se déplacent lentement de l'est à l'ouest; celle de l'océan Atlantique passait par Paris en 1666, et les déplacements ne sont pas les mêmes dans toute l'étendue d'une même courbe; car la déclinaison n'a pas varié sensiblement à la Nouvelle-Hollande depuis un grand nombre d'années, ni dans la partie occidentale des Antilles et au Spitzberg pendant tout un siècle. Les *lignes isogoniques* se déplacent en même temps que les lignes sans déclinaison. En général, quand une ligne isogonique passe de la mer sur une terre un peu étendue, elle s'y arrête longtemps et s'y courbe de plus en plus, les autres parties continuant à obéir au mouvement séculaire.

**1550. Méridiens magnétiques vrais et parallèles magnétiques.** — Duperrey, après son voyage autour du monde sur la corvette *la Coquille*, a publié de nouvelles cartes de déclinaisons, dans lesquelles il a figuré des courbes analogues aux *lignes isogoniques*, mais tracées de manière à faire connaître en chacun de leurs points la direction du méridien magnétique. Ces lignes, qu'il nomme *méridiens magnétiques vrais*, sont celles que l'on obtiendrait en transportant l'aiguille aimantée du nord au sud, de manière à suivre constamment la direction qu'elle indique. Ce sont des courbes à double courbure, tandis que les méridiens magnétiques proprement dits sont des grands cercles. Quelques méridiens magnétiques vrais ont été représentés en lignes pleines sur la carte à

projection polaire (fig. 1076). On reconnaît, à leur inspection, qu'il y a peu de points où l'aiguille aimantée se dirige exactement vers le nord. En réunissant ces points par une courbe, on retrouverait la ligne sans déclinaison. — Les inflexions prononcées des méridiens magnétiques vrais près des pôles, expliquent pourquoi la déclinaison varie si rapidement dans les régions polaires, quand on se déplace suivant un parallèle géographique.

Si l'on mène des courbes normales aux *méridiens magnétiques vrais* en chacun de leurs points, on obtient les *parallèles magnétiques* de Duperrey. On en voit quelques-uns dans la figure 1076.

**1551. Pôles magnétiques.** —

Hansteen avait déduit de la courbure des lignes isogoniques dans les régions polaires, qu'elles devaient converger, dans chaque hémisphère, vers deux *pôles magnétiques*, animés d'un mouvement très-lent de rotation, les uns de l'est à l'ouest, les autres en sens inverse. Barlow a trouvé qu'il n'y a réellement que deux pôles magnétiques. Celui de l'hémisphère boréal, le mieux connu, se reconnaît dans la figure 1075, au nord de la baie d'Hudson. Ces pôles, qui servent aussi de points de convergence aux méridiens magnétiques vrais de Duperrey, se voient dans la figure 1076, où les parallèles magnétiques se resserrent de plus en plus, de façon à les désigner d'une autre manière. En 1825, celui de l'hémisphère nord était à 79° de latitude et 78° de longitude orientale, et l'autre à 79° de latitude et 101° de longitude occidentale.

Il ne faut pas perdre de vue que tout le système des courbes magnétiques se déplace peu à peu, de sorte que l'état magnétique de la terre se modifie lentement.

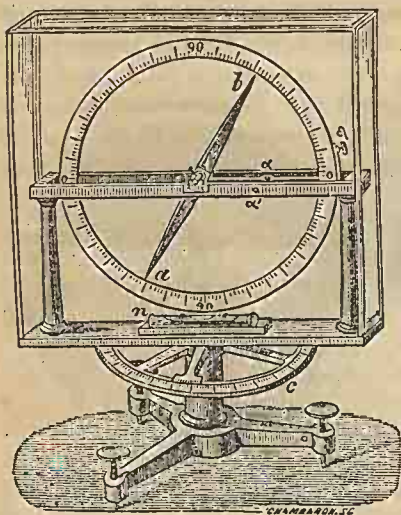


Fig. 1077. — 1/6.

Nous étudierons (1562) ces changements, qui ont déjà sensiblement modifié les plus anciennes cartes. Par exemple, il est possible que les deux pôles magnétiques du nord admis par Hansteen aient réellement existé, et que celui du nord de la Sibérie ait disparu peu à peu, d'autant plus qu'on y trouve un maximum d'intensité. D'après M. Marié-Davy, il semblerait même résulter de la diminution de la déclinaison à Paris que ce pôle tend à se reformer.

### III. De l'inclinaison.

**1552. BOUSSOLES D'INCLINAISON.** — Ces instruments ont reçu successivement de nombreux perfectionnements, notamment de D. Bernouilli. La figure 1077 représente le modèle le plus répandu. L'aiguille aimantée  $ab$  s'appuie, par un axe transversal d'acier passant par son centre de gravité et parfaitement cylindrique, sur deux lames parallèles en agate, portées par deux traverses horizontales que soutiennent deux colonnes. A ces traverses est fixé un cercle vertical gradué. Une cage de verre enveloppe cette partie de l'appareil, qui peut tourner autour d'un arbre vertical porté par le pied de l'instrument, de quantités angulaires mesurées par un vernier sur le cercle fixe  $c$ . Le niveau  $n$  sert à placer ce cercle horizontalement.



Fig. 1078.

La partie la plus délicate de l'instrument est la suspension de l'aiguille, dont la figure 1078 donne le détail :

$ab$  est l'aiguille, dont  $r, r,$  sont des coupes transversales ;  $o, o, o'$  sont les lames d'agate sur lesquelles roule son axe. On amène cet axe au centre du cercle, au moyen de deux petits leviers, dont les points d'appui sont en  $\alpha, \alpha'$  (fig. 1077), et que l'on voit en  $\alpha, \alpha, \alpha'$  (fig. 1078). Ces leviers portent des fourchettes  $f, f,$  que l'on fait monter en abaissant le bouton  $\beta$  (fig. 1077), de manière à soulever l'axe de l'aiguille, qu'on laisse ensuite descendre doucement sur les lames d'agate, au centre du cercle, en soulevant le bouton  $\beta$ .

Pour observer l'inclinaison, on commence par placer le cercle vertical dans le méridien magnétique, en cherchant la position pour laquelle l'aiguille fait le plus petit angle avec l'horizon, ou bien celle pour laquelle elle est verticale ; après quoi, l'on fait marcher le vernier, de  $90^\circ$ . On peut aussi faire deux opérations dans deux plans perpendiculaires entre eux (1506) ; mais M. Marié-Davy a remarqué que la composante perpendiculaire à ces plans peut rendre oblique l'axe de rotation, ce qui fait que la lecture est moins sûre.

L'influence du défaut de régularité dans l'aimantation est combattue par la méthode de retournement (1542). De plus, le centre de gravité pouvant ne pas se trouver exactement sur l'axe de rotation de l'aiguille, on répète les opérations dans la même position du cercle vertical, mais après avoir aimanté l'aiguille en

sens inverse, de manière que l'extrémité qui s'inclinait vers la terre se trouve en haut; et l'on prend la moyenne des angles obtenus dans les deux états d'aimantation. On fait donc quatre observations, dont on prend la moyenne. Du reste, les erreurs de lecture à chacune des extrémités de l'aiguille pouvant atteindre 20', chaque opération partielle doit être répétée plusieurs fois, et en plaçant le cercle vertical dans des positions différant de 180°.

La lecture des divisions sous les pointes de l'aiguille comporte des erreurs de 10 à 20'. Pour obtenir plus de précision, on éloigne cette aiguille *ab* (fig. 1079) du cercle *cc* parallèle au plan dans lequel elle se meut. Un bras *vv'* muni de verniers porte deux lunettes perpendiculaires à réticule *l, l'*, au moyen desquelles on vise avec précision des repères gravés aux extrémités de l'aiguille.

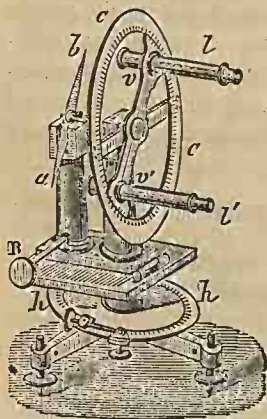


Fig. 1079.

En tournant le bouton *B*, on soulève une double fourchette, qui amène l'axe de rotation de l'aiguille dans le prolongement de l'axe du cercle *cc'*.

**1553. Inclinaison par les oscillations.** — On peut obtenir l'inclinaison par une méthode indirecte imaginée par Laplace, et susceptible d'une grande précision. On compte les oscillations que fait l'aiguille d'inclinaison

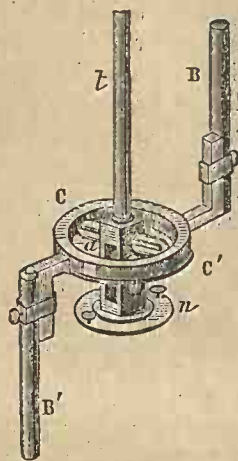


Fig. 1080.

pendant un certain temps dans le méridien magnétique, puis dans un plan perpendiculaire à ce méridien. Soient *n* et *n'* ces nombres d'oscillations, et *F* et *f* les forces qui les produisent; on aura (1508)  $n^2 : n'^2 = F : f$ ; *F* représentant la force magnétique du globe, et *f* sa composante verticale. On a aussi, en appelant *I* l'angle d'inclinaison,  $f = F \sin I$ , équation qui, combinée avec la précédente, donne  $\sin I = n'^2 : n^2$ .

**1554. Mesure de l'inclinaison au moyen de l'aiguille horizontale.** — Voici comment on opère avec le théodolite de M. Lamont (1545). Après avoir pointé la lunette sur l'aiguille comme pour obtenir la déclinaison, on entoure l'aiguille, *a* (fig. 1080), d'un anneau horizontal de cuivre *cc'* soutenant deux barreaux verticaux de fer doux *B, B'*, l'un en haut, l'autre en bas, et dont le plan est perpendiculaire au méridien magnétique. Ces deux barreaux reçoivent de la terre une aimantation proportionnelle à la composante verticale *v* de sa force magnétique, et ils agissent dans le même sens pour éloigner l'aiguille

du méridien magnétique. Au moyen de la lunette, on mesure la déviation produite  $\delta$ .

Soit  $I$  l'angle d'inclinaison, et  $F$  la force magnétique terrestre : ses composantes verticale et horizontale seront  $v = F \sin I$ , et  $h = F \cos I$ . La seconde donne une composante perpendiculaire à l'aiguille, égale à  $h \sin \delta$ , ou  $F \cos I \cdot \sin \delta$ , qui fait équilibre au couple produit par les barreaux  $B, B'$ , couple qui est proportionnel à  $v$ ; on a donc

$$F \cos I \sin \delta = kv = kF \sin I; \quad \text{d'où} \quad \text{tang } I = K \sin \delta.$$

Pour déterminer la constante  $K$ , après avoir mesuré  $\delta$ , on met dans la formule la valeur de  $I$  donnée par les appareils fixes d'un observatoire.

Comme les barreaux  $B, B'$  peuvent posséder une aimantation permanente et inégale, on répète l'expérience, après avoir tourné l'anneau de  $180^\circ$  sur lui-même; on recommence encore la double opération, après avoir retourné cet anneau face à face, et enfin on répète les quatre opérations après avoir renversé chaque barreau sur son support, où il se fixe au moyen de vis de pression.

Le théodolite de MM. Brunner (*fig.* 1071) se prête également à la mesure de l'angle d'inclinaison. La pièce  $NT$  étant toujours enlevée, on installe le barreau de fer doux  $P$  dans sa monture  $Q$ , autour de laquelle il peut tourner dans un plan parallèle au cercle  $D$ , et prendre quatre positions verticales ou horizontales, dans lesquelles il peut être arrêté par un ressort logé en  $R$ , et quatre entailles pratiquées sur le contour d'un disque vertical. Pour éviter l'influence des variations de température, on mesure les déviations de l'aiguille par le barreau, placé successivement dans les quatre positions, et on les introduit dans l'équation qui donne la tangente de l'inclinaison. Cette méthode d'observations croisées ne peut être employée que pour des latitudes moyennes, où aucune des deux composantes horizontale et verticale de l'action terrestre n'est trop faible.

#### 1555. INCLINAISON AUX DIFFÉRENTS POINTS DE LA SURFACE DU GLOBE. —

Nous avons vu que l'inclinaison augmente avec la latitude (1502). Relativement à ce terme, il y a à considérer la *ligne sans inclinaison* ou *équateur magnétique* et les *lignes isoclines*, sur lesquelles l'inclinaison est partout la même.

**Équateur magnétique.** — La première figure de cette ligne, sur laquelle l'inclinaison est nulle, a été donnée par Wilcke en 1768, puis elle a été modifiée par Lemonnier. On a cru d'abord, d'après les observations de Lacaille, W. Bayly, La Pérouse, de Humboldt, que l'équateur magnétique formait un grand cercle coupant la ligne équinoxiale en deux nœuds situés sur un même diamètre, et en faisant avec elle un angle de  $12^\circ$  environ. L'un des nœuds se trouvait dans la mer du Sud, par  $115^\circ$  de longitude occidentale, près de l'île de Gallego; l'autre, dans la mer des Indes, par  $295^\circ$  de longitude occidentale. Mais Biot, en discutant les observations de W. Bayly et de Cook, faites, en 1777, entre  $115^\circ$  et  $270^\circ$  de longitude, reconnut que l'hypothèse d'un grand cercle ne

s'accordait pas avec les faits ; car ces navigateurs trouvèrent, à l'ouest de l'île de Gallego, la ligne sans inclinaison, à  $3^{\circ}, 36'$  au sud de l'équateur, quand elle aurait dû être au nord. Cette ligne repasse donc dans l'hémisphère sud, après s'être un peu élevée vers le nord ; et il faut qu'il y ait quatre nœuds, dont deux très-rapprochés l'un de l'autre. Morlet<sup>1</sup>, en partant des données fournies par Cook, Eckberg, Panton, La Pérouse, etc., trouve qu'il n'y a que trois nœuds, l'équateur magnétique ne faisant que toucher la ligne équinoxiale à  $120^{\circ}$  de longitude occidentale, tandis que Hansteen admet qu'il passe dans l'hémisphère nord, pendant  $15^{\circ}$ , en remontant jusqu'à  $1^{\circ}, 30'$  de latitude, pour redescendre dans l'hémisphère sud, à  $23^{\circ}$  de la côte occidentale de l'Amérique.

On voit (fig. 1075) la ligne sans inclinaison représentée en ligne ponctuée, telle que Duperrey l'a tracée en 1825, après l'avoir traversée six fois<sup>2</sup> ; elle n'a que deux nœuds. La ligne pleine qui court dans son voisinage est une courbe normale en chacun de ses points aux *méridiens magnétiques vrais*, à laquelle Duperrey donne le nom d'*équateur magnétique*, réservant à l'autre le nom de *ligne sans inclinaison*. Il remarque que les points où cette dernière ligne s'écarte le plus de l'équateur géographique sont ceux où elle rencontre des terres. Dans le Grand Océan, ces deux lignes sont sensiblement parallèles, et peu éloignées l'une de l'autre.

Pour déterminer les points de la ligne sans inclinaison qui n'ont pas été rencontrés dans les voyages, Morlet et Duperrey se sont servis de la formule suivante, trouvée par Biot en partant de l'hypothèse de deux centres magnétiques qui existeraient dans l'intérieur du globe, à une petite distance du centre ; formule qui, transformée par MM. Boldwich, Malweid et Kraft, se présente sous la forme très-simple :

$$\text{tang } I = 2 \text{ tang } \lambda.$$

Cette formule, que nous démontrerons plus loin (1577), exprime que la tangente de l'inclinaison est égale au double de la tangente de la *latitude magnétique*  $\lambda$ , comptée à partir de la *ligne sans inclinaison*. La valeur de  $\lambda$  se déduit de celle de  $I$  au moyen de cette formule. Morlet a reconnu qu'elle est exacte quand on ne dépasse pas  $25^{\circ}$  à  $30^{\circ}$  de latitude ; car, si, de l'inclinaison en différents points d'un même méridien géographique, on déduit la position du point où l'équateur magnétique rencontre ce méridien, on trouve toujours le même résultat. Mais on trouve des résultats trop forts si l'on dépasse  $25^{\circ}$  à  $30^{\circ}$ .

La ligne sans inclinaison éprouve un déplacement très-lent, dans lequel les nœuds marchent vers l'ouest. Ce mouvement, signalé d'abord par Morlet, mais avec réserve, a été confirmé depuis. Les deux nœuds, placés à peu près sur un même diamètre de la terre, se sont avancés de  $10^{\circ}$  au moins de 1780 à 1836, en moyenne de  $10', 48''$  par an.

<sup>1</sup> *Mémoires des savants étrangers*, t. III.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXX, p. 337, et XLV, p. 371.



**1556. Lignes isoclines.** — Les *lignes isoclines* ou *isocliniques* correspondent à des inclinaisons d'autant plus grandes qu'on s'éloigne davantage de l'équateur magnétique. Wilcke, en 1768, en a donné une carte, modifiée plus tard par Lemonnier. Hansteen, en 1819, avait déduit de la figure de ces lignes l'existence de quatre pôles magnétiques (1551), hypothèse que Barlow, puis Duperrey, ont fait abandonner. Ross a rencontré, en 1832, sur la terre de Boothia-Félix, le point où l'aiguille d'inclinaison est verticale, et ce point coïncide sensiblement avec le pôle magnétique nord déterminé, par Duperrey au moyen des lignes isogoniques (1551).

De Humboldt a observé l'inclinaison dans l'océan Atlantique, la mer du Sud, l'Europe, l'Amérique, dans une zone allant de  $48^{\circ} 50'$  de latitude nord, à  $12^{\circ}$  de latitude sud; Gay-Lussac, dans différentes parties de l'Europe, dans l'Oural, l'Altai, la mer Caspienne; Gauss, J. Franklin, Forbes, Duperrey et Parry, dans les hautes latitudes. Voici les résultats généraux obtenus : dans les parties du globe où l'équateur magnétique est à peu près circulaire, c'est-à-dire dans l'Europe, l'Afrique, l'océan Atlantique et les côtes orientales de l'Amérique, l'inclinaison est sensiblement la même de part et d'autre et à égale distance de cette ligne. Mais, au nord et au sud des régions où l'équateur magnétique présente des inflexions, les lignes isoclines en présentent aussi, et leurs irrégularités sont d'autant plus prononcées qu'on s'avance davantage vers les pôles. Duperrey a fait remarquer que ces lignes expriment deux faits à la fois; car l'inclinaison est rapportée à l'horizon du lieu, et cet horizon est inégalement incliné sur l'axe du globe, aux divers points d'une même courbe, ces points n'ayant pas même latitude. Cette remarque, qui s'applique également à l'équateur magnétique, a beaucoup diminué l'importance qu'on attachait autrefois aux lignes isoclines.

De Humboldt<sup>1</sup> a imaginé de déterminer la latitude près des côtes du Chili et du Pérou, où règnent souvent des brouillards épais, en mesurant l'inclinaison et consultant une table donnant la latitude qui correspond à chaque angle. Cette méthode est d'autant plus utile dans ces parages, que le courant du sud au nord qui longe le Chili (II, 1401) rendrait difficile le retour vers le sud, d'un navire qui aurait dépassé le port. Pour obtenir de bons résultats, il faut que le navire coupe les lignes isoclines à peu près normalement. Gilbert avait longtemps auparavant conseillé de déterminer la latitude au moyen de l'inclinaison; mais, comme les lignes isoclines ne se confondent pas avec les parallèles géographiques, ce qu'il ignorait, on voit que cette méthode ne peut s'appliquer que dans quelques régions privilégiées.

Les lignes isocliniques éprouvent, comme l'équateur magnétique, des changements de forme extrêmement lents et peu prononcés.

<sup>1</sup> *Journal de physique* de Lamétherie (1804), t. LIX, p. 449.

## IV. Intensité du magnétisme aux divers points de la surface du globe.

1557. Graham, le premier, s'est occupé d'évaluer l'intensité du magnétisme terrestre, en 1722. Plus tard, de Saussure fit quelques expériences comparatives sur le mont Blanc et à Genève. Mais c'est à Borda que l'on doit les premières expériences suivies sur ce sujet; il faisait osciller une même aiguille aux différents lieux dont il voulait comparer les forces magnétiques. On procède aujourd'hui, soit au moyen de l'aiguille d'inclinaison, soit au moyen de l'aiguille de déclinaison.

1° **Oscillations de l'aiguille d'inclinaison.** — Si l'on déränge de sa position d'équilibre, de 3° à 4° au plus, une aiguille aimantée mobile dans le méridien magnétique, les forces magnétiques qui la font osciller restent toujours égales et parallèles entre elles, les oscillations sont isochrones et les forces sont proportionnelles aux carrés des nombres  $n, n'$  d'oscillations faites pendant le même temps, par une même aiguille dans deux pays différents. Si donc  $F$  et  $F'$  sont les forces magnétiques du globe en ces deux pays, on aura

$$F : F' = n^2 : n'^2.$$

Cette méthode exige de nombreuses précautions. Il est évident d'abord qu'elle ne donne que des rapports entre les intensités, les résultats dépendant du moment magnétique de l'aiguille. Il est donc essentiel que celle-ci conserve exactement son état magnétique pendant toute la durée du voyage; c'est pourquoi on la transporte dans un étui rembourré, pour la préserver de tout choc; et on la soustrait aux variations brusques de température. On a soin aussi d'emporter plusieurs aiguilles, qui se contrôlent mutuellement, et qui doivent donner des intensités partout dans les mêmes rapports. Enfin, on revient au point de départ, et l'on y répète les expériences, qui doivent donner les mêmes nombres d'oscillations qu'avant le départ, si l'état magnétique des aiguilles n'a pas été altéré. L'aiguille doit être suspendue bien exactement par son centre de gravité. Ce dont on s'assure avant de commencer la série des observations, en l'aimantant en sens inverse. Enfin, tous les résultats doivent être ramenés à une même température (1535); c'est ce qui n'a pas toujours été fait, et ce qui augmente les incertitudes déjà si nombreuses dans ces sortes de recherches.

1558. 2° **Oscillations de l'aiguille de déclinaison.** — L'aiguille de déclinaison ne donne que la composante horizontale  $f$  de la force magnétique du globe. En appelant  $I$  l'angle d'inclinaison au lieu d'observation, cette composante est  $h = F \cos I$ , et il suffit de mesurer  $h$  et  $I$  pour connaître  $F$ . Les oscillations sont isochrones, comme pour l'aiguille d'inclinaison, quand l'amplitude ne dépasse pas 3 ou 4°; ce qui montre que la composante normale de  $h$  est proportionnelle à l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique, ce que Coulomb

a vérifié au moyen de la balance de torsion : il a trouvé l'angle de torsion proportionnel à l'angle d'écart quand il ne dépassait pas 4°. Au delà, l'angle de torsion était proportionnel au sinus de l'angle d'écart.

Cela posé, on fait osciller l'aiguille horizontale en différents lieux, et l'on compte les oscillations accomplies pendant un certain temps. Soient  $n$  et  $n'$  les nombres d'oscillations en deux stations différentes,  $I, I'$  les angles d'inclinaisons, et  $F, F'$  les intensités cherchées, en ces deux stations; on aura

$$\frac{n^2}{n'^2} = \frac{h}{h'} = \frac{F \cos I}{F' \cos I'}, \quad \text{d'où} \quad \frac{F}{F'} = \frac{n^2 \cos I'}{n'^2 \cos I}.$$

L'emploi de l'aiguille de déclinaison offre des avantages sur celui de l'aiguille d'inclinaison; la première pouvant être suspendue d'une manière très-mobile par un fil de soie sans torsion suivant l'idée de Coulomb, comme on le voit dans l'instrument suivant dû à Hansteen et perfectionnée par Duperrey.

**Boussole des intensités.** —

L'aiguille aimantée est suspendue dans une boîte de bois (fig. 1081), par un fil sans torsion enroulé en  $f$  sur un petit treuil que porte un gros tube fixé au milieu d'une glace qui ferme la boîte. Une des extrémités de l'aiguille parcourt un arc divisé; l'autre porte un index  $o$  que l'on vise par une

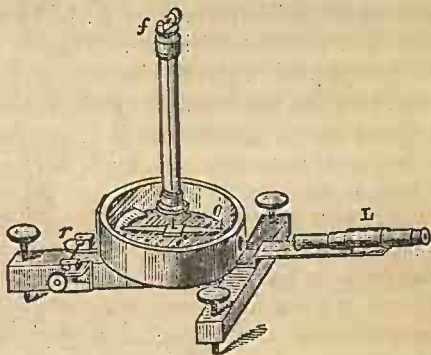


Fig. 1081.

ouverture, au moyen d'une lunette à réticule  $L$ , fixée à la boîte. La vis de rappel  $r$ , sert à faire tourner un peu cette boîte sur elle-même, pour amener le centre du réticule à coïncider exactement avec l'index  $o$ , quand il est en repos; et les vis calantes, à amener le fil de suspension à passer par le centre de l'arc divisé. On fait osciller l'aiguille, en la déplaçant au moyen d'un levier à chevilles qu'on pousse par-dessous la boîte. L'emploi de la lunette permet de compter les plus petites oscillations. — Cet instrument peut être remplacé avec avantage par un des théodolites magnétiques (1545 et 1546).

**1559. Méthode de Gauss.** — Cette méthode donne des résultats indépendants de l'état magnétique de l'aiguille. On présente à l'aiguille horizontale un petit barreau aimanté perpendiculaire au méridien magnétique et dans une direction qui passe par le point de suspension de cette aiguille. Celle-ci est déviée, d'une quantité  $\delta$  indépendante de son moment magnétique, l'action de la terre sur elle étant proportionnelle à ce moment, comme l'action du barreau. Gauss a prouvé,

par le calcul, que si l'on suppose la distance  $D$  des centres de l'aiguille et de l'aimant suffisamment grande, on a

$$\text{tang } \delta = \frac{aM}{h} \frac{1}{D^3} + \frac{B}{D^5}, \quad \text{qui se réduit à} \quad \text{tang } \delta = \frac{aM}{h} \frac{1}{D^3},$$

quand  $D$  dépasse le quadruple de la longueur des aimants.  $M$  représente le moment magnétique de l'aimant déviant, et  $h$  la composante horizontale  $F \sin I$  de la force terrestre. De l'une de ces formules, on tire la valeur de  $h$ , après avoir déterminé le moment  $M$  et les constantes  $a$  et  $B$ . Ces constantes s'obtiennent au moyen de deux expériences faites en un lieu où  $h$  est connu; et le moment  $M$ , se détermine par la méthode des oscillations, ce moment étant proportionnel au carré du nombre d'oscillations.

Pour faire l'expérience en voyage, on peut employer la boussole de M. Prazmowski (1544). On voit, sur la figure, l'aimant déviant, placé à gauche sur une règle divisée qui sert à mesurer  $D$ . — Le théodolite de M. Lamont (1545) se prête aux mêmes expériences. On appuie la règle qui porte l'aimant déviant sur le support de l'aiguille aimantée, perpendiculairement au méridien magnétique. Du reste, pour combattre l'effet d'une aimantation irrégulière du barreau, il faudra faire 4 observations de  $\delta$ , en retournant ce barreau bout à bout, et en le plaçant tantôt d'un côté, tantôt de l'autre de l'aiguille.

Dans le théodolite de MM. Brunner (1546), la pièce  $P$  étant enlevée, on place l'aimant déviant en  $T$  de manière que son milieu soit dans le méridien magnétique qui passe par le point de suspension de l'aiguille. Dans ce cas, la déviation  $\delta'$ , est donnée par la formule

$$\text{tang } \delta' = \frac{1}{2} \frac{aM}{h} \frac{1}{D^3} = \frac{1}{2} \text{tang } \delta.$$

Pour obtenir  $M$  au moment de mesurer  $\delta$  ou  $\delta'$ , on met l'aimant déviant à la place de l'aiguille et on en compte les oscillations.

**2560. Augmentation de l'intensité avec la latitude.** — C'est à l'Académie des sciences de Paris que sont dues les premières recherches suivies sur l'intensité magnétique des divers points du globe. Dans les instructions rédigées pour le voyage de La Pérouse, elle recommanda d'observer les oscillations de l'aiguille aimantée; et Paul de Lamanon, qui faisait partie de l'expédition, reconnut que *l'intensité magnétique augmente avec la latitude*. Rossel, qui accompagnait d'Entrecasteaux dans son voyage à la recherche de La Pérouse, fit des observations analogues. De Humboldt découvrit, de son côté, la loi de l'accroissement d'intensité avec la latitude, lors de son voyage dans les régions équinoxiales de l'Amérique, en 1798, et leva les doutes qui existaient sur ce sujet. Il remarqua une valeur minimum sur l'équateur magnétique, dans le Pérou septentrional, valeur qu'on s'est accordé généralement depuis à prendre pour unité; et c'est ce qui a été fait dans le calcul des nombres du tableau suivant :

LIEUX d'observation.	ANNÉES	LATITUDES	INTENSITÉ magnétique	LIEUX d'observation.	ANNÉES	LATITUDES	INTENSITÉ magnétique
Saint-Antoine.	1802	0°,0	1,087	Bruxelles. . .	1829	50°,52' N	1,374
Carthagène. . .	1801	40,25 N	1,294	Berlin . . . . .	1829	52,51	1,366
New-York. . . .	1822	40,43	1,803	Christiania. . .	1820	59,55	1,419
Naples. . . . .	1805	40,50	1,274	Pétersbourg. .	1828	59,66	1,410
Lyon. . . . .	1805	45,46	1,333	Baie de Baffin.	1518	62,43	1,590
Paris. . . . .	1800	48,52	1,348	Spitzberg. . . .	1523	79,40	1,567

Ed. Sabine, de 1818 à 1820, a étudié l'intensité dans les régions polaires, et depuis, une foule d'observateurs ont fait de même dans toutes les parties du monde. D'après Sabine, l'intensité est égale à 1,624 au pôle magnétique nord près des îles Melville, tandis qu'au pôle magnétique austral, situé sur la terre Victoria, près du volcan Erebus, Ross l'a trouvée égale à 2,052. Le minimum d'intensité, 0,706, a été observé par A. Erman à 19° 59' de latitude sud et à 10° 2' de longitude est. A New-York, il existe une anomalie singulière : l'intensité atteint 1,803.

**Lignes isodynamiques.** — Ces lignes passent par les points de la surface du globe où l'intensité magnétique est la même. De Humboldt en a tracé quelques-unes dans l'Amérique équinoxiale, et, en 1826, Haansteen en a publié une carte pour l'hémisphère nord. Ces lignes diffèrent notablement des lignes *isoclines*, et sont beaucoup plus irrégulières ; elles peuvent même les couper à angle droit, comme cela a lieu au Pérou. Haansteen a remarqué aussi une ressemblance assez frappante entre les lignes *isodynamiques* et les lignes *isothermes*, ressemblance confirmée depuis par Brewster et Duperrey, et qui porte à penser que les intensités magnétiques dépendent de la chaleur. Haansteen avait conclu aussi, de la configuration des lignes d'égale intensité comme de ses lignes *isogoniques* (1556), qu'il existe deux pôles magnétiques au nord. Mais Duperrey, qui a publié des cartes de lignes *isodynamiques* pour les deux hémisphères, dans lesquelles il en a tracé neuf, n'a trouvé qu'un seul pôle. Les lignes deviennent ovales en approchant du pôle nord de la terre, à peu près comme les lignes *isothermes*, mais ne se séparent pas en deux courbes distinctes, et le pôle déterminé par l'intensité est renfermé dans un espace très-allongé allant de la Nouvelle-Sibérie aux grands lacs de l'Amérique du Nord. Cependant, quelques physiciens, entre autres Gauss, admettent dans chaque hémisphère deux points où l'intensité est maximum. Ces points coïncideraient avec les *pôles du froid*, et non avec les pôles magnétiques déterminés par la déclinaison et l'inclinaison.

Parmi les lignes *isodynamiques*, il y a à considérer celle du minimum d'intensité. Duperrey a reconnu qu'elle ne coïncide pas avec la ligne sans inclinaison, comme on l'a cru d'abord. Du reste, il n'a donné ses cartes qu'avec réserve, à

cause des nombreuses incertitudes de ce genre d'observations, et aussi des changements produits dans l'intensité, en chaque lieu, par les variations de température.

Biot, en partant de l'existence de deux centres magnétiques placés très-près l'un de l'autre dans l'intérieur du globe supposé homogène, a trouvé que les intensités  $i$  aux différentes latitudes,  $\lambda$ , sont données par la formule  $i = \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}$ . Pour la vérifier, Duperrey a pris pour intensité aux différentes latitudes, la moyenne des intensités observées sur le parallèle géographique

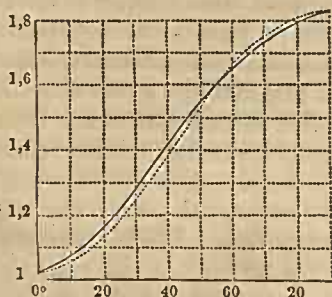


Fig. 1082.

qui leur correspond, et il a trouvé des résultats sensiblement d'accord avec ceux que donne la formule. Ces derniers sont un peu plus faibles, jusqu'à la latitude de 55° environ, puis un peu plus forts. La différence est au plus de 0,015 de la valeur prise pour unité. Dans la figure 1082, les ordonnées de la ligne pleine représentent les intensités observées, et celles de la ligne ponctuée, les intensités que donne la formule aux latitudes représentées par les abscisses.

**1561. Intensités dans les hautes régions de l'atmosphère.** — Il semble résulter des observations de de Humboldt

dans les Andes, et de M. Kupffer dans le Caucase, que l'intensité magnétique diminue à mesure qu'on s'élève au-dessus du niveau de la mer. Cependant, Biot et Gay-Lussac, dans leur voyage aérostatique, ne trouvèrent pas de diminution sensible dans la durée de l'oscillation de l'aiguille aimantée; mais comme la température était très-basse dans les hautes régions, et que la correction n'a pas été faite, ce résultat négatif semble confirmer le décroissement de l'intensité quand la hauteur augmente.

#### V. Variations de l'aiguille aimantée en un même lieu.

**1562. Observatoires magnétiques.** — La direction et l'intensité de la force magnétique du globe éprouvent, en un même lieu, divers changements, et sont soumises à des variations *séculaires, annuelles et diurnes*, et à des *perturbations accidentelles*.

Pour étudier ces diverses variations, on a construit des établissements spéciaux, dans lesquels on les observe d'une manière suivie. C'est à de Humboldt qu'est due la première idée de ces *observatoires magnétiques*. En considérant la perpétuelle agitation de l'aiguille aimantée, il conçut l'idée d'observations poursuivies pendant cinq ou six jours consécutifs, la réalisa à Berlin, en 1806 et 1807, conjointement avec M. Oltmanns, et constata l'existence de perturbations beaucoup plus nombreuses qu'on ne l'avait cru jusque-là.

En 1828, il fit élever un petit observatoire magnétique, et institua des observations simultanées, à Berlin, à Paris, et dans les mines de Freiberg à 66<sup>m</sup> de profondeur. En 1829, une expédition, ordonnée par l'empereur de Russie, fournit l'occasion d'établir des stations magnétiques sur une vaste échelle. Des observatoires furent en effet construits, sous la direction de M. Kupffer, dans toute l'Asie septentrionale, jusqu'à Pékin. En 1832, F. Gauss imagina les nouveaux appareils dont nous allons parler, et fonda l'*union magnétique*, dont Göttingue fut le centre, et d'où partait l'indication des jours où l'on devait observer simultanément d'une manière continue. En 1836, l'Angleterre entra dans l'union, et en 1839 fut résolue, l'expédition au pôle austral, commandée par Ross, et dans laquelle furent faites des observations simultanées en huit ou dix stations différentes. Aujourd'hui, il existe des observatoires magnétiques dans toutes les parties du monde, en Russie, en Sibérie, à Pékin, à la Nouvelle-Hollande, à Van-Diemen, à Ceylan, au Cap, à l'Ile-de-France, au Canada, à Sainte-Hélène, etc. Les observatoires anglais ont été choisis dans les positions les plus diverses; les uns près des pôles magnétiques, d'autres près de la ligne sans déclinaison. Les principaux furent établis à Toronto (Canada), Makerston (Écosse), Bombay, Sainte-Hélène, le Cap, Hobartown (Ile de Van-Diemen).

Un observatoire magnétique consiste en une salle rectangulaire de 11<sup>m</sup> envi-

ron de longueur dans le sens du méridien magnétique, dans la construction de laquelle il n'entre pas de fer, et dont on éloigne à l'extérieur toute masse de fer un peu considérable. Sur le plancher est tracée par le centre de la salle, la direction du méridien magnétique. Plusieurs bases solidement fondées, sont destinées à recevoir les instruments fixes d'observation.

**1563. Boussole des variations en déclinaison.** — Pour observer les très-petites déclinaisons, telles que les variations diurnes, les perturbations, on s'est servi d'abord de la *boussole des variations*, instrument doué d'une sensibilité extrême, dont la figure 1083 représente un modèle construit par Gambay, d'après les idées de Coulomb. Dans la boîte BB' fixée sur une table de marbre, oscille un barreau aimanté suspendu par des fils de soie sans torsion. Ces fils traversent la caisse vitrée V, et s'enroulent sur un petit treuil  $\tau$ . Les extrémités de l'aimant, dont on voit la moitié en  $ao$ , portent une petite plaque d'ivoire  $a$  divisée en quarts de millimètres. On observe les plaques d'ivoire, à travers les glaces  $cc'$ , au moyen de microscopes à réticule  $mm'$ , glissant dans

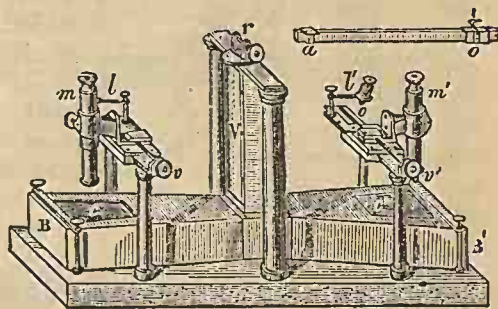


Fig. 1083.

des coulisses, quand on fait tourner les vis de rappel  $v, v'$ . Des verniers, dont les loupes  $l, l'$ , facilitent la lecture, glissent le long de divisions en millimètres. On place d'abord l'axe de la boîte dans le méridien magnétique, et l'on amène les microscopes au-dessus des repères. On observe ensuite les déplacements de l'aiguille, soit en comptant les divisions de la plaque d'ivoire qui passent sous le réticule du microscope, soit en suivant, avec ce dernier qu'on peut faire marcher avec la vis de rappel, le repère, dont on évalue le déplacement au moyen du vernier.

**Lunette magnétique de De Prony.** — De Prony a employé, pour mesurer les plus petits changements de déclinaison, une longue aiguille aimantée suspendue par des fils de soie plate, et portant une lunette placée dans le sens de sa longueur, et avec laquelle on vise une échelle éloignée. Les plus petits déplacements de l'axe de la lunette, et, par suite, de celui de l'aiguille, deviennent sensibles.

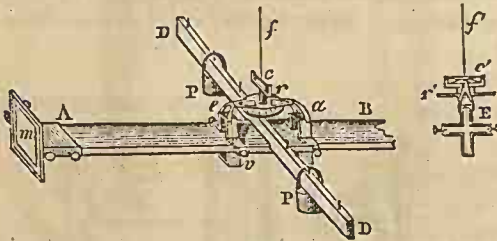


Fig. 1084.

Gauss a imaginé pour les observatoires, de nouveaux appareils d'une sensibilité extrême, au moyen desquels on peut suivre en un même lieu les plus petites variations du magnétisme terrestre<sup>1</sup>. Ces

appareils sont de trois sortes. Les premiers, nommés *déclinomètres* ou *magnétomètres unifilaires*, sont destinés principalement à mesurer la déclinaison absolue. Les autres servent particulièrement à faire connaître les variations de l'intensité magnétique du globe : les uns, nommés *magnétomètres bifilaires*, en donnent la composante horizontale; les autres, nommés *magnétomètres-balance*, la composante verticale.

**1564. Déclinomètres.** — Le déclinomètre de Gauss consiste en un barreau aimanté AB (fig. 1084), suspendu par un faisceau  $f$  de 200 fils de cocon sans torsion, s'enroulant sur un petit treuil fixé au plafond, au-dessus de la trace du méridien magnétique. L'aimant est porté par un étrier de cuivre très-mince, disposé comme on le voit dans la coupe transversale E, de manière que l'aimant puisse s'y placer de champ ou à plat. L'étrier, muni de vis de pression  $v$ , porte une espèce d'anse  $era$  qui repose sur un cercle divisé  $r, r'$ , soutenu par le fil de suspension  $f$ , et au moyen duquel on peut faire disparaître la torsion, s'il y a lieu. Un pivot, qui traverse l'anse à frottement, porte une goupille  $c, c'$ , à laquelle est attaché le fil de suspension. L'aimant porte une barre de bois DD, à laquelle on suspend, sur des pointes et à des distances variables, des

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série (1834), t. LVII, p. 5.



poids de 500<sup>gr</sup>, P, P, pour augmenter le moment d'inertie du système oscillant.

Pour observer les plus petits déplacements de l'aimant, on se sert d'un miroir *m* fixé normalement au barreau, et dans lequel on voit, par réflexion, une règle horizontale divisée, placée au pied d'un théodolite, et dont on observe l'image à travers la lunette de cet instrument; comme nous l'avons expliqué à propos de l'élasticité de flexion (I, 511).

Le barreau aimanté n'est presque jamais en repos; le moindre déplacement est accompagné d'oscillations, dont on ne peut attendre la fin, surtout si l'on veut observer des changements rapides

de déclinaison. Pour obtenir la position d'équilibre du barreau, on observe deux positions extrêmes successives, pendant qu'il fait des oscillations très-petites, et on prend la moyenne; mais, si la déclinaison varie, l'amplitude n'est pas la même de chaque côté de la position d'équilibre. Dans ce cas, si l'on désigne par *T* l'heure pour laquelle on veut avoir la déclinaison, et par *t* la durée d'une oscillation, on observe la position du barreau aux

$$T - \frac{1}{2} t \text{ et } T + \frac{1}{2} t,$$

et l'on prend la moyenne. Du reste, l'usage du déclinomètre exige de nombreuses précautions, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

La figure 1085 représente, d'après l'Annuaire de l'Observatoire de Montsouris pour 1878, le déclinomètre construit par M. Eichens. L'aimant, de 96<sup>mm</sup> de longueur, est posé sur des

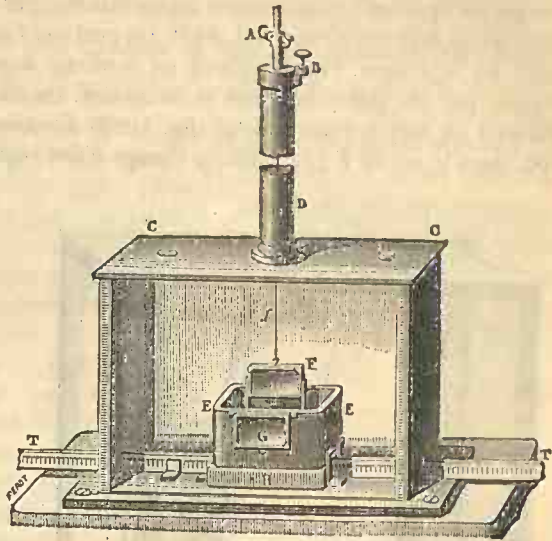


Fig. 1085.

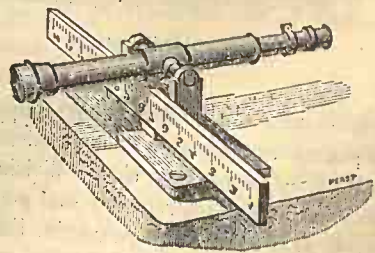


Fig. 1086.

crochets au-dessous d'un miroir plan F, qui lui est parallèle et est suspendu à un faisceau de fils de soie sans torsion. Ce faisceau est attaché à une crémaillère A, que porte un anneau gradué B. L'aimant oscille dans une boîte de cuivre, dont les parois épaisses en amortissent les oscillations, par une action inductive dont nous avons déjà fait mention (II, 843). On peut voir l'aimant à travers la glace G, pour les repérages. Tout l'appareil est renfermé dans une cage de cuivre CC fermée par des glaces en avant et en arrière. On observe les déplacements de l'aimant au moyen d'une lunette (fig. 1086) dite *viscur*, à travers laquelle on voit, dans le miroir F (fig. 1085), l'image d'une règle divisée placée trans-

versalement sous la lunette (fig. 1086); on observe quelle division de l'image coïncide avec le fil médian vertical du réticule de cette lunette.

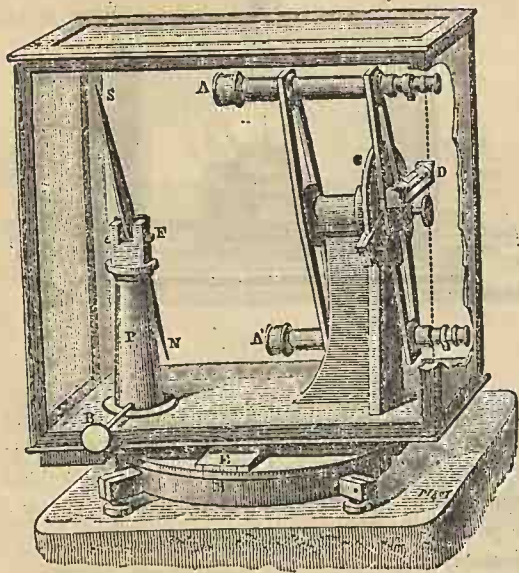


Fig 1087.

salement sous la lunette (fig. 1086); on observe quelle division de l'image coïncide avec le fil médian vertical du réticule de cette lunette.

**1565. Boussole des variations en inclinaison.** — Les variations de l'inclinaison en un même lieu étant très-faibles, il faut des instruments très-déliés pour les rendre sensibles. La figure 1087 représente l'appareil construit pour l'Observatoire de Montsouris par MM. Brunner, et dont nous empruntons le dessin à l'*Annuaire* de 1878. L'aiguille SN, qui n'est pas soumise au retournement, s'appuie sur un couteau. On en observe les déplacements au moyen de deux microscopes A, A' munis à leur foyer, de micromètres sur verre, dont chaque division correspond à une variation de 1' dans la déclinaison. Ces microscopes sont portés par un double bras qui se meut sur un cercle gradué C. Un autre cercle, EII, sert à orienter l'appareil. La position du méridien magnétique varie, comme la déclinaison; mais les écarts ordinaires de celle-ci, qui ne dépassent pas 10', ne peuvent apporter qu'un changement insensible de 3" dans l'inclinaison.

**1566. Variations de la composante horizontale.** — Les variations de l'intensité de cette composante peuvent se déduire de la déviation du déclino-

mètre, produite par un aimant déviant convenablement placé. On voit (*fig. 1085*) une partie TT d'une longue règle placée dans le méridien magnétique, et sur laquelle glisse un aimant déviant perpendiculaire à cette règle. De la déviation produite par cet aimant, on pourrait déduire l'intensité, au moyen de la formule  $\tan \delta = \frac{1}{2} \frac{M}{h} \frac{1}{D^3}$  (1559). Pour en suivre les variations, il suffit d'observer les déplacements du miroir F (*fig. 1085*) dans le viseur (*fig. 1086*).

**Magnétomètre bifilaire.** — Cet appareil, dû à Gauss, indique avec une grande sensibilité les plus faibles variations de la composante horizontale. Voici d'abord le principe sur lequel il repose. Considérons une barre horizontale, suspendue par deux fils égaux et parallèles et fixés à des distances égales de son centre de gravité. Cette barre reste en équilibre quand les fils sont parallèles; mais, si l'on vient à la faire tourner dans un plan horizontal, les fils devenant obliques, la barre est soulevée, et tend, par conséquent, à reprendre sa première position. L'effort qu'il faut faire pour la retenir se nomme *force de direction*. On démontre que cette force est proportionnelle : 1° au sinus de l'angle d'écart; 2° à la distance des fils; 3° au poids de la barre, et qu'elle est en raison inverse de la longueur des fils.

Supposons maintenant que la barre soit remplacée par un aimant et que le plan des fils soit dans le méridien magnétique : l'aimant sera en équilibre dans ce plan, son pôle nord tourné vers le nord; et, si on l'en écarte, sa force directrice s'ajoutera à celle des fils, pour l'y ramener. Si le pôle nord est tourné vers le sud, il y aura encore équilibre stable, si la force directrice de l'aimant est moindre que celle du système de suspension. Mais ce ne sera plus que la différence de ces forces qui agira pour ramener le système à sa position d'équilibre. Enfin, si l'aimant est placé obliquement au plan des fils parallèles, l'équilibre n'aura lieu que lorsque l'aimant fera un certain angle avec le méridien magnétique, angle qui dépend de la force directrice, et qui, par conséquent, varie avec l'intensité du magnétisme terrestre. Gauss fait en sorte que l'aimant soit à peu près perpendiculaire au méridien magnétique, afin que cette dernière action soit la plus efficace possible.

Voici comment est disposé l'appareil : l'aimant AA' (*fig. 1088*), qui pèse plusieurs kilogrammes, est placé dans un étrier surmonté d'une bande de cuivre

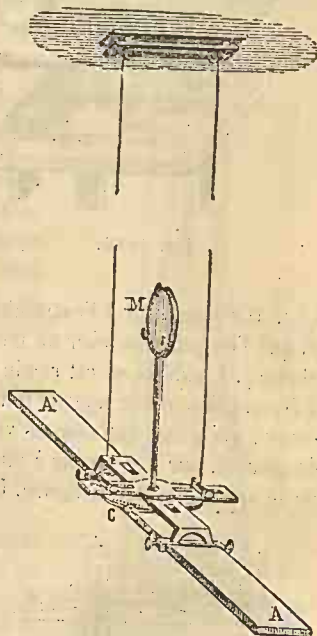


Fig. 1088.

portant deux petits treuils, autour desquels s'enroulent les extrémités d'un fil d'acier. Ce fil passe sur deux poulies fixées au plafond, afin que la tension des deux moitiés verticales soit la même. L'angle du barreau avec le plan des fils, quand ils sont parallèles, se mesure sur le disque divisé C. Entre les deux treuils est fixé un miroir vertical M pouvant s'orienter à volonté, dans lequel vient se réfléchir la règle divisée placée au pied d'un théodolite. La moindre variation de

la composante horizontale fait changer la position de l'aimant, et l'appareil est tellement sensible, qu'il permet d'apprécier  $\frac{1}{22000}$  de cette intensité. Mais, pour que les observations soient comparables, il faut que l'état magnétique de l'aimant ne change pas, et il faut faire la correction relative à la température.

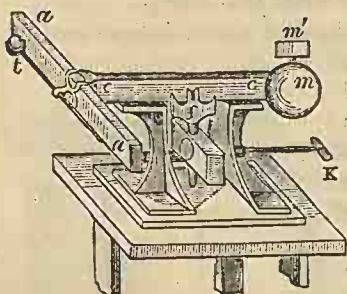


Fig. 1089.

(fig. 1089) est fixé à l'extrémité d'un couteau *cc* reposant sur des plans d'agate, et que l'on peut soulever au moyen de la clef *K*, par l'intermédiaire de la fourchette *f*. L'aimant *aa* est rendu horizontal au moyen d'un contrepois en forme d'écrou glissant sur une vis horizontale fixée au couteau du côté sud. Un autre écrou, qui glisse sur une vis verticale, sert à faire varier la position du centre de gravité, que l'on amène à être sur l'axe magnétique de l'aimant. Ces deux vis ne se voient pas sur la figure. Le thermomètre *t* sert à compenser l'influence de

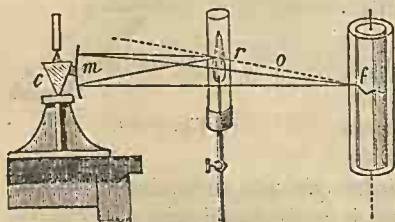


Fig. 1090.

la chaleur : quand la température s'élève, l'aimant s'affaiblit; mais la colonne de mercure, en s'allongeant, déplace le centre de gravité du système vers le nord, de manière à compenser la force magnétique perdue. On observe les changements de position de l'aimant au moyen de deux microscopes à réticule visant des repères tracés à ses deux extrémités.

Souvent, dans les observatoires, on ne mesure pas directement les variations de l'inclinaison, à cause des incertitudes des méthodes, mais on les déduit des variations des intensités des composantes horizontale *h* et verticale *v* de la force terrestre, au moyen de la relation  $\tan i = v : h$ .

**1568. Appareils enregistreurs.** — Les appareils que nous venons de décrire sont souvent disposés de manière à enregistrer leurs propres indications

au moyen de la photographie. — Par exemple, au couteau *cc* du magnétomètre balance (*fig.* 1089) est fixé un miroir sphérique concave *m*, en avant duquel brûle une flamme *r* (*fig.* 1090) entourée d'une cheminée opaque, qui laisse passer par une fente un faisceau de rayons lumineux; le faisceau forme par réflexion un foyer *f*, qui tombe sur une feuille de papier photographique appliquée sur un cylindre que fait tourner un mouvement d'horlogerie. Un manchon cylindrique de verre enveloppe le papier, pour en conserver l'humidité. Si le miroir ne bouge pas, le foyer marque une circonférence sur le papier, et une courbe sinueuse, si le miroir change de position. Les indications du *déclinomètre* s'enregistrent de la même manière, au moyen d'un petit miroir sphérique fixé à l'aimant au-dessous du point d'attache du fil de suspension; seulement, le cylindre tournant est horizontal.

Au lieu de faire réfléchir le faisceau lumineux divergent, par un miroir sphérique, on peut avec avantage le recevoir sur une lentille, qui le concentre en un foyer. Un petit miroir plan *m'* (*fig.* 1089) reçoit alors obliquement le faisceau convergent qui sort de la lentille, et renvoie le foyer sur le cylindre recouvert de papier photographique.

La figure 1091 représente un appareil construit par M. Salleron, pour l'Observatoire de Montsouris, qui enregistre les mouvements d'un aimant horizontal, suspendu par un fil assez long pour qu'il ait été nécessaire de soutenir par des jambes de force *C, C*, le tube qui porte la suspension *A*. Le miroir, renfermé avec l'aimant dans une caisse de cuivre *E*, lui est parallèle et reçoit la lumière qui a traversé la lentille, par une ouverture garnie d'une glace, et la réfléchit sur le papier sensible. Deux barreaux égaux en fer doux *f, f'* font de l'appareil une boussole des *variations en inclinaison* (1554). Un appareil semblable, sauf qu'il n'y a pas de barreaux de fer doux, enregistre les variations de la déclinaison.

**1569. VARIATIONS DE LA DÉCLINAISON.** — La déclinaison éprouve des variations *séculaires*, et des variations périodiques, *annuelles* ou *diurnes*.

**Variations séculaires.** — Les premières observations un peu précises de la déclinaison ont été faites en Angleterre en 1176, puis en 1580 à Paris, où ont été trouvés les résultats suivants :

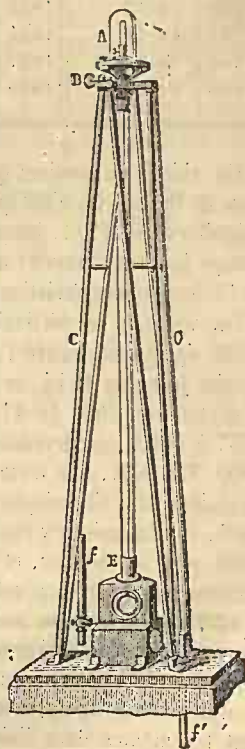


Fig. 1091.

ANNÉES	DÉCLINAISONS	ANNÉES	DÉCLINAISONS	ANNÉES	DÉCLINAISONS	ANNÉES	DÉCLINAISONS
1580	11°30' Est	1813	22°28'	1832	22°3'	1865	18°47'
1618	8-0	1814	22-34 max.	1835	22-4	1866	18-42
1666	0-0	1816	22-25	1848	20-41	1868	18-24
1680	2-40 Ouest	1818	22-26	1850	20-34	1874	17-56
1700	8-12	1822	22-11	1854	20-11	1873	17-33
1767	19-16	1824	22-23	1858	19-36	1874	17-30
1780	20-35	1827	22-20	1860	19-22	1875	17-26
1805	22-5	1829	22-12	1864	18-56	1876	17-20

Ce tableau ne contient qu'un petit nombre des valeurs obtenues à l'Observatoire de Paris<sup>1</sup>. Ce n'est que tardivement qu'on a pris la précaution de retourner l'aiguille (1542), et, jusqu'en 1862, on n'opérait ni aux mêmes heures ni aux mêmes jours de l'année; de sorte que les résultats ne sont pas tous débarrassés de l'influence des variations diurnes et annuelles.

On voit que la déclinaison, d'abord orientale, a diminué à Paris jusqu'en 1666, époque où Picard l'a trouvée nulle; devenue occidentale, elle a augmenté ensuite jusqu'en 1814, et elle a toujours été depuis en diminuant. A Londres, la déclinaison était de 11° 15' à l'est en 1576; elle a été trouvée nulle de 1657 à 1662, est devenue occidentale, et a atteint son maximum, 24° 36', en 1800. En 1831, elle n'était plus que de 24°. — Comme exemple de variations séculaires dans l'hémisphère austral, nous citerons les observations du Cap. En 1605, la déclinaison y était de 0° 30' à l'est; elle est devenue nulle de 1605 à 1609, puis occidentale, et a atteint son maximum, 25° 40', vers 1791. — Des variations séculaires, résultent les déplacements des *lignes isogoniques*.

**1570. Variations annuelles.** — La déclinaison éprouve, chaque année, des variations périodiques, découvertes en 1786 par Cassini. Elles semblent dépendre de la position du soleil d'un côté ou de l'autre de l'équateur; mais les changements de température de l'aiguille n'en sont pas la cause; car les résultats sont les mêmes dans l'obscurité des caves de l'Observatoire de Paris, où la température est fixe. Voici quels sont ces résultats: pendant les mois d'*avril, mai, juin, juillet*, compris entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, l'extrémité *nord* de l'aiguille rétrograde vers l'*est*; pendant les neuf mois suivants, la marche générale est vers l'*ouest*, l'amplitude à Paris est de 15' à 18'. Pour établir cette loi, on prend les moyennes des déclinaisons *maximum* et *minimum* de chaque jour, d'où l'on déduit les moyennes mensuelles. Le mouvement annuel a été observé à Londres, en 1800, par Gilpin, qui a trouvé un *maximum* de déclinaison vers l'équinoxe de printemps, et un *minimum*, au solstice d'été;

<sup>1</sup> *Annuaire de l'Observatoire météorologique de Montsouris pour 1878*, p. 175.

seulement, l'amplitude est beaucoup plus petite qu'à Paris. M. Beaufoy a trouvé la variation mensuelle à peu près nulle, de 1818 à 1820, époque où la variation séculaire était aussi à peu près nulle, parce qu'on était près de l'époque du maximum. En 1800, la variation séculaire était plus faible qu'en 1786, d'où Arago a conclu que l'amplitude des variations annuelles croît et diminue en même temps que l'étendue du mouvement séculaire.

**1571. Variations diurnes de la déclinaison.** — Les variations diurnes, découvertes en 1722 par Graham, sont étudiées avec assiduité dans les observatoires. En Europe, l'extrémité nord de l'aiguille aimantée marche vers l'ouest à partir du lever du soleil, jusqu'à une ou deux heures après-midi, puis elle revient sur ses pas, et reprend sa première position vers 10 heures du soir. On voit que la déviation vers l'ouest est la plus grande aux heures de la plus forte chaleur. L'amplitude de ces mouvements est très-petite, et différente d'un jour à l'autre; tantôt elle atteint 20' à 25', tantôt elle ne dépasse pas 5 ou 6'; elle dépend aussi de l'aiguille aimantée dont on fait usage.

**Variations diurnes en différents pays.**

— L'amplitude des variations est d'autant plus faible qu'on se rapproche davantage de l'équateur magnétique. Ainsi, dans l'île de Rawak, la déviation n'est que de 3' ou 4' au plus. Les courbes de la figure 1092 donnent une idée des amplitudes des variations diurnes à Hobartown, III; Toronto, TT; le Cap, CC, et Sainte-Hélène, SS.

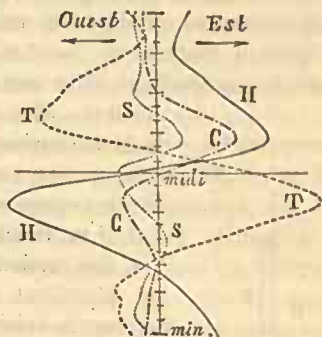


Fig. 1092.

**1572. Lois générales des variations périodiques de la déclinaison.** — Le P.

Secchi, en comparant les nombreux résultats recueillis dans les observatoires magnétiques, principalement dans ceux des Anglais et des Russes, résultats coordonnés et publiés, les premiers par Sabine, et les autres par M. Kupffer, est arrivé à formuler les lois suivantes<sup>1</sup> :

1<sup>o</sup> Les variations diurnes de la déclinaison suivent en chaque lieu le temps local; elles sont donc en rapport avec la position du soleil, comme on l'avait déjà constaté pour l'Europe;

2<sup>o</sup> Le pôle de l'aiguille tourné du côté du parallèle que décrit le soleil, fait chaque jour une double excursion : 4 à 5 heures avant midi, ce pôle est au maximum de distance du méridien magnétique vers l'ouest; de là il marche vers l'est avec une vitesse croissante, qui atteint son maximum à peu près au moment où le soleil passe par le méridien magnétique. Une ou deux heures après, l'aiguille s'arrête pour revenir sur ses pas jusqu'au coucher du soleil. — Pendant la nuit, quand le soleil passe au méridien inférieur, la même oscillation se répète, mais

<sup>1</sup> Il nuovo cimento, t. I, p. 60, et Annales de chimie et de phys., 3<sup>e</sup> série, t. XLIV, p. 246.

avec une moindre amplitude. — Les heures limites changent avec les saisons; elles avancent généralement en été et retardent en hiver.

Les *amplitudes* sont à peu près proportionnelles aux arcs parcourus par le soleil le jour et la nuit sur le parallèle qu'il décrit, ce qui est indiqué par les courbes de la figure 1092, qui représentent les moyennes variations diurnes de la déclinaison, pour les localités situées à différentes latitudes et désignées plus haut (1571).

Il résulte de la seconde loi que les mouvements de l'un des pôles de l'aiguille dans un hémisphère sont les mêmes que ceux de l'autre pôle dans l'hémisphère opposé; ou bien que le pôle nord de l'aiguille prend des mouvements inverses aux mêmes heures et sur le même méridien, dans les deux hémisphères, comme le montrent les courbes TT et HII (fig. 1092): Magdonald 'avait déjà remarqué ce fait, et Arago en avait conclu qu'il doit y avoir une ligne sans variations diurnes, dans le voisinage de l'équateur. Cette ligne n'a pas été déterminée, on sait seulement qu'elle ne se confond ni avec l'équateur géographique, ni avec l'équateur magnétique. — Les heures limites dépendant de la position du méridien magnétique, elles sont différentes aux lieux qui n'ont pas même déclinaison; — elles dépendent aussi de la déclinaison du soleil, et varient, par conséquent, aux diverses époques de l'année.

3<sup>o</sup> Les variations observées sont une combinaison de celles qui dépendent de la position horaire du soleil, et de celles qui dépendent de sa déclinaison ou distance à l'équateur, et forment la variation annuelle.



Fig. 1093.

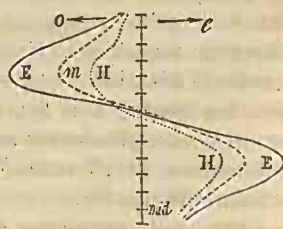


Fig. 1094.

On reconnaît l'influence de la déclinaison du soleil, en construisant la courbe pour deux déclinaisons opposées. La figure 1093 représente les courbes moyennes des variations diurnes pendant l'été et pendant l'hiver, à Sainte-Hélène. Les courbes sont opposées parce que le soleil passe d'un côté à l'autre du parallèle de cette île. Quand le lieu n'est pas entre les tropiques, il n'y a pas opposition dans les résultats, mais seulement changement dans l'amplitude. Par exemple, la courbe moyenne à Toronto étant *m* (fig. 1094), celle de l'été est *E E*, et celle de l'hiver *H H*; le passage d'une de ces courbes à l'autre se fait très-brusquement, au voisinage des équinoxes.

**1573. VARIATIONS DE L'INCLINAISON.** — L'inclinaison éprouve, comme la déclinaison, des variations *séculaires*, *annuelles* et *diurnes*; mais généralement beaucoup plus faibles.

Depuis l'année 1671 que l'on observe l'inclinaison à Paris, elle a constamment diminué, comme on le voit dans le tableau qui suit :



ANNÉES	INCLINAISONS	ANNÉES	INCLINAISONS	ANNÉES	INCLINAISONS	ANNÉES	INCLINAISONS
1671	75°0'	1810	68°50'	1839	67°13'	1865	65°58'
1754	72-15	1816	68-40	1844	67-9	1866	65-54
1776	72-25	1820	68-20	1849	66-44	1867	65-47
1780	74-48	1824	68-7	1851	66-25	1868	65-45
1791	70-52	1826	68-0	1862	66-5	1869	65-44
1798	69-51	1831	67-41	1863	66 0,9	1875	65-37
1806	69-12	1835	67-24	1864	65-1,2	1876	65-36

Il résulte des observations faites à Londres à partir de 1720, que l'inclinaison y va aussi en diminuant.

Des variations de l'inclinaison résultent les déplacements séculaires des lignes isoclines et de l'équateur magnétique. Les changements de position de cette dernière ligne peuvent servir à calculer les variations de l'inclinaison en un même lieu, au moyen de la formule  $2 \operatorname{tang} \lambda = \operatorname{tang} I$ , (1555). La valeur de  $\lambda$ , pour un même lieu, varie quand l'équateur magnétique se déplace, il faut donc que  $I$  varie aussi, et l'on pourra en calculer la valeur par cette formule, en la supposant exacte pour la latitude considérée. Arago et de Humboldt ont trouvé ainsi, en partant du mouvement de l'équateur magnétique, de 1778 à 1820, une diminution de 5' par an dans l'inclinaison, et seulement de 3', 5, pour les années comprises entre 1820 et 1855.

**Variations périodiques de l'inclinaison.** — Les *variations annuelles* de l'inclinaison ont été étudiées principalement par Hansteen, qui a reconnu, en prenant les moyennes d'un grand nombre d'observations, que l'inclinaison est de 15' environ plus grande en été qu'en hiver. Le même observateur a pu distinguer des *variations diurnes* : il a trouvé que l'inclinaison est de 4 à 5' plus grande avant midi qu'après.

En déduisant les *inclinaisons*, des intensités des composantes horizontale et verticale (1553), le P. Secchi a reconnu que, en général, les variations diurnes de l'inclinaison suivent des phases analogues à celles de la déclinaison, mais avec une avance de trois heures.

**1574. VARIATIONS DE L'INTENSITÉ.** — L'intensité magnétique du globe éprouve-t-elle, en un même lieu, des variations *séculaires*? D'après Gauss, qui employait une méthode indépendante de l'état de l'aimant mis en expérience, l'intensité magnétique n'a pas varié à Göttingue et dans quelques autres lieux, pendant plusieurs années; mais l'intervalle de temps embrassé est trop court pour qu'on puisse rien conclure. Il est peu probable, du reste, que la direction de la force magnétique varie sans que l'intensité n'éprouve quelque changement.

**Variations périodiques de l'intensité.** — Dans les observatoires magnétiques, on étudie les variations des composantes *horizontale* et *verticale*. Le

P. Secchi a déduit du dépouillement d'un très-grand nombre d'observations, les lois générales suivantes :

1<sup>o</sup> Le magnétomètre bifilaire est soumis à une variation horaire qui est la résultante de deux variations élémentaires, l'une diurne et l'autre semi-diurne. L'amplitude de la variation d'intensité semi-diurne augmente avec la latitude, et est nulle à l'équateur. Les phases par lesquelles elle passe dépendent de la distance angulaire du soleil au méridien magnétique. — Dans les stations à latitudes moyennes, la courbe qui représente les variations du *magnétomètre bifilaire* est semblable à celle du *déclinomètre*, mais avec un retard de 6 heures. La période semi-diurne est à peine indiquée à Sainte-Hélène; elle est ensuite d'autant plus distincte que la latitude est plus élevée.

2<sup>o</sup> Les variations de la composante verticale suivent les mêmes périodes que celles de la composante horizontale, avec cette différence essentielle que les *maximum de l'une correspondent, en général, aux minimum de l'autre, et réciproquement.*

**Force totale.** — Des composantes horizontales et verticales, on déduit les forces magnétiques totales; mais les lois que suivent ces dernières sont peu connues, les observations n'étant pas assez nombreuses, surtout près de l'équateur, et de plus les circonstances locales semblant avoir une très-grande influence. Cependant, on a remarqué une période semi-diurne à Toronto : le *maximum principal* a lieu à 5 heures, le *minimum principal* entre 15 et 16 heures, le 2<sup>o</sup> *maximum* entre 18 et 20 heures, et le 2<sup>o</sup> *minimum* entre 22 et 25 heures. Au Cap, les variations sont à peu près complémentaires de celles de la déclinaison.

Hansteen, qui avait remarqué dans la *composante horizontale* un minimum vers 11<sup>h</sup> du matin, et un maximum vers 5<sup>h</sup> du soir, et des variations dans les intensités moyennes d'un mois à l'autre, le minimum ayant lieu en mai et juin, et le maximum vers les équinoxes, attribue ces résultats aux variations diurnes et mensuelles de l'inclinaison, dont dépend la composante; de sorte que l'intensité du globe n'éprouverait pas de variations diurnes et annuelles sensibles. Cette opinion est confirmée par cette circonstance que les variations des composantes horizontale et verticale ont lieu en sens inverse. On peut interpréter de même ce résultat, obtenu par Quételet, que l'intensité de la composante horizontale a un peu augmenté de 1828 à 1833, pendant que l'inclinaison diminuait.

**1575. PERTURBATIONS DE L'AIGUILLE AIMANTÉE** — L'aiguille aimantée éprouve assez souvent des déviations accidentelles, sensibles surtout sur l'aiguille de déclinaison, pour revenir au bout de quelques heures à sa première position. Ces mouvements, que les marins désignent sous le nom d'*affolements* de l'aiguille, n'atteignent pas généralement un degré, mais peuvent, en certains moments, osciller dans une amplitude de plusieurs degrés. Parmi les causes qui les produisent, on cite depuis longtemps les tremblements de terre, les éruptions volcaniques et les aurores boréales. On n'a que peu d'observations relativement aux deux premières causes, qui, du reste, ne se font sentir qu'à de faibles

distances. Nous citerons la suivante : M. Mermet, à Marseille, ayant placé un petit aimant sur sa pointe, dans la matinée du 19 mai 1866, le vit osciller brusquement verticalement et horizontalement sans cause apparente, et 14 minutes après, avait lieu un tremblement de terre que ces mouvements avaient annoncé.

**Influence des aurores boréales.** — La coïncidence entre les aurores boréales et certains mouvements de l'aiguille aimantée, a été signalée en 1740 par Celsius et Hiorter. Nous décrirons plus tard l'aurore boréale; il nous suffira, pour le moment, de dire qu'elle se montre dans l'atmosphère du côté du pôle, le plus souvent, sous la forme d'un arc à contours diffus, qui s'étend peu à peu, et dont s'échappent des rayons en aigrettes animés de mouvements plus ou moins rapides. Pendant le phénomène, l'aiguille de déclinaison est déviée, même dans les pays où il n'est pas visible; de manière qu'on peut souvent, à l'inspection de l'aiguille, annoncer la présence d'une aurore boréale dont on ne voit encore aucun signe. La déviation est de 20' au plus dans nos climats, mais, plus près du pôle, elle devient plus grande, et le phénomène présente un plus vif éclat. On a remarqué d'abord que le point culminant de l'arc se trouve dans le méridien magnétique de l'aiguille considérée, et le centre d'une couronne qui se forme souvent à l'opposé de l'arc, sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. L'aiguille reste assez tranquille quand l'arc lumineux est immobile; mais quand il darde des rayons, elle oscille, quelquefois de plusieurs degrés, et d'autant plus que le météore est plus brillant. Quand il ne présente qu'une lumière incertaine et diffuse, l'aiguille n'est pas agitée ou ne l'est qu'à peine. Généralement, la déclinaison varie à l'avance, et prédit ainsi le phénomène; d'autres fois elle ne commence à changer que quelque temps après la formation de l'arc lumineux.

Nous ajouterons que l'intensité horizontale, d'après les observations de Gauss et Weber faites avec le bifilaire, éprouve généralement des variations accidentelles qui ne le cèdent ni en étendue, ni en fréquence à celles de la déclinaison.

**1576. Tempêtes magnétiques.** — Les perturbations qui ne peuvent se rattacher aux causes précédentes, ne sont assez bien connues que depuis l'établissement d'observatoires magnétiques, où l'on observe régulièrement l'aiguille aimantée. — Les appareils de Gauss ont d'abord mis en évidence ce résultat, inaperçu avec les aiguilles faibles, que le magnétisme terrestre est dans un état continuel de fluctuation, comme les flots de la mer. C'est pourquoi quand on étudie les variations diurnes, annuelles et séculaires, il faut, pour faire disparaître les anomalies; avoir soin de calculer les moyennes d'un très-grand nombre d'observations.

Un autre fait très-remarquable, est la simultanéité fréquente, dans les pays les plus éloignés de perturbations accidentelles, désignées sous le nom de *tempêtes magnétiques*. Par exemple, Sabine cite une tempête magnétique qui s'est fait sentir simultanément à Toronto, au Cap, à Prague et à Van-Diemen, et cette coïncidence est telle, qu'on pourrait s'en servir pour déterminer la

différence de longitude des stations. Arago, qui avait institué, dès 1820, des observations horaires à Paris, avait déjà reconnu ce résultat, en les comparant à celles qui étaient faites aux mêmes instants à Kazan. De Humboldt et M. Oltmanns, lors de leurs observations de 1806, ont constaté l'existence d'orages magnétiques, revenant parfois aux mêmes heures pendant plusieurs nuits de suite.

Il existe aussi des perturbations locales, qui ne s'étendent qu'à de petites distances. De Humboldt en cite un cas qui se manifesta dans les mines de Saxe, sans être sensible à Berlin. D'autres tempêtes magnétiques, observées simultanément depuis la Sicile jusqu'à Upsal, sont restées inaperçues d'Upsal à Altena.

Pour étudier ces phénomènes et rechercher quelle part il faut faire aux influences locales, Gauss et de Humboldt ont fixé des époques auxquelles on suit la marche des appareils d'une manière presque continue, dans les différents observatoires qui font partie de l'union magnétique. Aujourd'hui, on adopte six époques, ou *termes d'observations*, auxquelles on observe pendant 24 heures, de 3 minutes en 3<sup>m</sup>. Un annuaire spécial, commencé par Gauss et Weber, rend compte chaque année des résultats obtenus, en présente le tracé graphique, et donne la description des appareils nouvellement installés, ou des modifications de détail qu'ils peuvent avoir reçues.

Il résulte du nombre considérable d'observations déjà enregistrées, que les perturbations sont moins prononcées aux basses latitudes que vers le nord. Par exemple, le 30 juin 1836, il y eut une anomalie notable qui donna 6' de déviation à Catane, 12' à Milan, 13',5 à Munich, 16' à Leipzig, 20' à Marbourg, 26' à Göttingue, et 29' à La Haye.

**Relation avec les mouvements atmosphériques.** — Les perturbations magnétiques qui ne se rattachent pas aux aurores boréales sont restées longtemps sans explication. Mais on a fini par reconnaître qu'elles dépendent de grands mouvements atmosphériques, particulièrement de *cyclones* (II, 1484). M. Kaemtz avait remarqué une relation entre la déclinaison et la direction du vent, et M. Marié-Davy a constaté depuis, toutes les fois que les documents n'ont pas fait défaut, l'existence, pendant les tempêtes magnétiques, de perturbations atmosphériques peu éloignées, et qui atteignaient bientôt la station où l'on observait. Le P. Secchi a aussi remarqué de semblables coïncidences, et elles sont aujourd'hui en assez grand nombre pour qu'on puisse annoncer avec quelque assurance l'arrivée d'une tempête venant de l'Atlantique, quand l'aiguille aimantée est agitée de mouvements irréguliers. Mais pour ne laisser échapper aucun de ces avertissements précieux, il faut observer les boussoles sans interruption, et c'est ce que permettent de réaliser les appareils enregistreurs établis dans les observatoires.

#### VI. Hypothèses relatives aux lois du magnétisme terrestre.

1577. Nous avons vu (1503) comment Gilbert, en regardant la terre comme un aimant, a expliqué dans leur ensemble, des actions exercées par le globe sur

les aimants et sur le fer. Quand on eut étudié plus en détail la distribution irrégulière du magnétisme terrestre, on chercha à se rendre compte des résultats des observations, et particulièrement des variations de la déclinaison d'un lieu à un autre. L'hypothèse la plus simple consiste à supposer, comme le faisait Euler, qu'il y a dans l'intérieur du globe deux centres d'action magnétique  $a, a'$  (fig. 1095), disposés de chaque côté du centre, et sur un diamètre  $mm'$  oblique à son axe de rotation  $ns$ . On voit qu'une aiguille aimantée placée sur le méridien  $neis$ , qui contient les deux axes  $mm', ns$ , se dirigera dans le plan de ce méridien, qui sera par conséquent une *ligne sans déclinaison*. Mais si l'aiguille est placée en un point  $D$  pris hors du méridien  $neis$ , elle se dirigera dans le plan  $mDm'$ , et par conséquent fera, avec le méridien  $nDs$  qui passe par le point  $D$ , un angle de *déclinaison*  $mDn$ . Les points  $m, m'$  où la direction  $aa'$  rencontre la surface de la sphère, sont les *pôles magnétiques*. On voit, en effet, qu'en ces points l'aiguille devra se diriger suivant  $mm'$ , c'est-à-dire verticalement. Si nous menons le

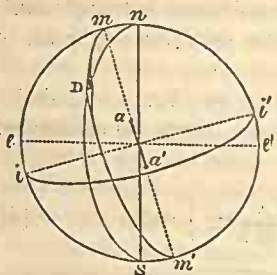


Fig. 1095.

grand cercle  $ii'$  perpendiculaire à  $aa'$ , nous aurons l'équateur magnétique.

Biot, en partant de l'hypothèse qui précède, a trouvé les formules qui lient l'inclinaison et l'intensité, à la latitude magnétique. Pour trouver ces formules, soient  $A$  et  $B$  (fig. 1096) les centres magnétiques,  $oe$  l'équateur

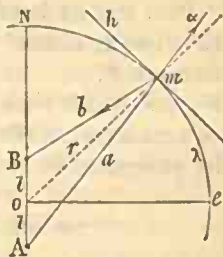


Fig. 1096.

magnétique, et  $\lambda = em$  la latitude magnétique d'un point  $m$ , dont les distances aux centres  $A$  et  $B$  sont  $a$  et  $b$ , et enfin  $l$  la distance  $Ao = oB$ , distance très-petite par rapport au rayon  $r$  du globe, et dont nous négligerons les puissances devant celles de  $r$ . Si nous désignons par  $I$  l'action de chacun des centres  $A$  et  $B$  à l'unité de distance, sur l'un des pôles d'une aiguille aimantée, les actions exercées quand cette aiguille sera en  $m$ , seront  $\frac{1}{b^2}$  et  $-\frac{1}{a^2}$ , la première attractive, et la seconde répulsive. En appelant  $V$  la somme des composantes verticales de ces forces, et  $H$ , la somme de leurs composantes horizontales suivant  $mh$ , l'inclinaison  $I$  et l'intensité  $i$ , seront données par les formules

$$\text{tang } I = V : H, \quad i^2 = H^2 + V^2.$$

Cherchons donc les valeurs des composantes  $V$  et  $H$ .

Les forces  $1 : b^2$  et  $1 : a^2$  ont pour composantes horizontales :

$$\frac{1}{b^2} \cos \overline{Bmh}, \quad -\frac{1}{a^2} \cos \overline{amh}; \quad \text{et} \quad \frac{1}{b^2} \sin \overline{Bmh}, \quad -\frac{1}{a^2} \sin \overline{amh}, \quad [1]$$

pour composantes verticales. Il reste à évaluer les angles, et les distances  $a$  et  $b$ , en fonction de  $\lambda$  et de  $r$ .

Cherchons d'abord la distance  $Am = a$ . Le triangle  $Amo$  donne

$$a^2 = l^2 + r^2 - 2rl \cos \overline{Aom} = l^2 + r^2 + 2rl \sin \lambda,$$

en remplaçant  $\overline{Aom}$  par  $\overline{Aom} - 90^\circ$ . En négligeant  $l^2$  devant  $r^2$ , il vient

$$a^2 = r^2 + 2rl \sin \lambda; \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{a^2} = \frac{1}{r^2 + 2rl \sin \lambda} = \frac{1}{r^2} \left( r^2 - 2rl \sin \lambda \right), \quad [2]$$

en faisant la division, et négligeant les termes qui contiennent les puissances de  $l : r$ . En changeant  $l$  en  $-l$ , on aura de même

$$b^2 = r^2 - 2rl \sin \lambda; \quad \text{et} \quad \frac{1}{b^2} = \frac{1}{r^2} \left( r^2 + 2rl \sin \lambda \right). \quad [3]$$

Pour trouver la valeur de  $\cos \overline{Bmh} = \sin omB$ , considérons le triangle  $omB$ . Ce triangle donne  $\sin \overline{omB} : l = \cos \lambda : b$ . Or on a, en négligeant le terme en  $l^2$ ,

$b^2 = r^2 - 2lr \sin \lambda = (r - l \sin \lambda)^2 - l^2 \sin^2 \lambda$ ; ou  $b = r - l \sin \lambda$ ; on aura donc, en effectuant la division et négligeant les termes qui contiennent les puissances de  $l : r$ ,

$$\sin \overline{omB} = \cos \overline{Bmh} = \frac{l \cos \lambda}{b} = \frac{l \cos \lambda}{r - l \sin \lambda} = \frac{l}{r} \cos \lambda \quad [4]$$

$$\text{et} \quad \sin \overline{Bmh} = \sqrt{1 - \cos^2 \overline{Bmh}} = \sqrt{1 - \frac{l^2}{r^2} \cos^2 \lambda} = 1 \quad [5]$$

en négligeant le terme en  $l^2 : r^2$ . On trouve de même, en remplaçant  $l$  par  $-l$ ,

$$\cos \overline{cmh} = -\frac{l}{r} \cos \lambda, \quad \text{et} \quad \sin \overline{cmh} = 1 \quad [6]$$

portant les valeurs [2], [3], [4], [5], [6] dans les formules [1], et faisant les sommes des composantes horizontales et verticales  $H$  et  $V$ , on trouve

$$H = 2rl \cos \lambda, \quad V = 4rl \sin \lambda, \quad \text{d'où}$$

$$\text{tang } I = \frac{V}{H} = 2 \text{ tang } \lambda, \quad i^2 = H^2 + V^2 = 4r^2 l^2 \cos^2 \lambda + 16 r^2 l^2 \sin^2 \lambda,$$

et  $i = \sqrt{4 + 3 \sin^2 \lambda}$ , en prenant pour unité l'intensité  $4r^2 l^2$  qui correspond à  $\lambda = 0$ . Nous avons vu jusqu'à quel point ces formules représentent les résultats de l'observation (1555 et 1560).

**1578. Irrégularités.** — L'hypothèse d'un aimant intérieur rend compte de l'ensemble des phénomènes, mais elle n'explique pas les irrégularités nombreuses de la distribution du magnétisme à la surface de la terre. Ainsi, l'équateur

magnétique, les lignes sans déclinaison, isoclines, isodynamiques, devraient être des cercles, ce qui n'est pas ; de plus, ces courbes se déplacent. On est porté à attribuer leurs irrégularités au défaut d'homogénéité de l'aimant terrestre. Lahire a fait une expérience curieuse qui montre l'influence de cette cause : Il tailla en forme de sphère un aimant naturel pesant près de 50<sup>kil</sup> et détermina son axe magnétique ; il reconnut ensuite qu'une petite aiguille aimantée portée aux différents points de sa surface, ne s'arrêtait pas, le plus souvent, dans le plan de l'axe, et s'en écartait d'un côté ou de l'autre, quelquefois de 26°.

Tobie Mayer, en 1760, supposa que l'axe des centres magnétiques *a, a'* (fig. 1095) ne passait pas par le centre du globe, mais à une distance de ce point égale au septième du rayon. Haansteen suppose quatre centres formant deux aimants courts et inégaux ; d'où les quatre pôles magnétiques qu'il admettait à la surface du globe. Biot considère, avec les centres A, B (fig. 1096), un troisième centre, sorte de point conséquent situé au-dessous des archipels de la mer du Sud, et beaucoup plus faible que les deux autres ; et les résultats auxquels il arrive s'accordent assez bien avec ceux de l'observation.

Gauss a publié une remarquable et savante théorie mathématique, dans laquelle il rejette tout centre d'action, et regarde chaque partie du globe comme renfermant du magnétisme libre agissant sur chaque point de sa surface. Il établit des formules à l'aide desquelles il obtient la résultante de toutes les actions sur un point donné. Des calculs numériques appliqués à 91 localités lui ont donné des résultats d'accord avec ceux de l'observation. Dans le cours de ses calculs, Gauss a été conduit à attribuer à chaque huitième de mètre cube de la terre une force magnétique moyenne égale à celle d'un barreau d'acier aimanté pesant un demi-kilogramme.

**Magnétisme des roches.** — Dans cette théorie, les irrégularités dans la distribution du magnétisme sont attribuées à des attractions locales. De semblables attractions existent, en effet, et Melloni a montré que la plupart des roches volcaniques sont magnétiques. On connaît des collines, de petites montagnes, qui ont, comme les aimants, des pôles et une ligne neutre. De Humboldt en cite une, le Heidelberg, près de Zell, dirigée du S.-O. au N.-O., dont le versant S.-E. possède les propriétés du pôle nord d'un aimant, et le versant N.-O., celles du pôle sud. L'action sur l'aiguille aimantée se fait sentir à 8 à 10 mètres. La montagne est formée de couches parallèles à son axe longitudinal, et la roche qui la compose renferme des parcelles de fer oxydulé, qu'on en peut séparer en la pulvérisant et la remuant avec un aimant. Dans certaines parties, ces parcelles sont visibles à l'œil nu.

**1579. De l'explication des variations.** — Pour expliquer les variations séculaires, Halley imaginait dans l'intérieur du globe un noyau magnétique tournant très-lentement. Æpinus le supposait fixe, mais il admettait que le fluide magnétique se déplaçait peu à peu dans son intérieur.

Pour expliquer les variations diurnes de la déclinaison, Duperrey remarque que l'aiguille est perpendiculaire à la ligne isodynamique sur laquelle elle se

trouve. Or, la chaleur diminuant l'intensité magnétique de la terre, que le soleil chauffe d'orient en occident, la ligne isodynamique, dans notre hémisphère, se renfle vers le nord, d'abord à l'est de la station; et, pour que l'aiguille lui reste normale, il faut que son extrémité nord s'avance vers l'ouest. Quand le soleil a dépassé le méridien, le sol se refroidit à l'est de l'aiguille, et s'échauffe à l'ouest, où se forme le renflement, et l'aiguille revient sur ses pas. Dans l'hémisphère austral, les mouvements sont inverses, la courbe isodynamique se renflant vers le pôle sud. Près de l'équateur magnétique, ou mieux de la ligne du minimum d'intensité, la succession des mouvements dépend de la saison, suivant que le soleil est au nord ou au sud de la station. La période nocturne s'expliquerait de la même manière par le renflement des lignes isodynamiques vers l'équateur, à cause de l'augmentation d'intensité par le refroidissement. Quant aux perturbations, elles seraient dues à une distribution irrégulière et accidentelle de la chaleur.

Les variations magnétiques dépendant de la position du soleil, Biot avait pensé qu'on pouvait les expliquer en supposant que le soleil agit comme un aimant puissant très-éloigné. Le P. Secchi a repris et développé cette hypothèse, tout à fait inutile, puisque nous venons de voir que la chaleur solaire suffit à expliquer les phénomènes.

MM. Sabine, Gautier, Wolf avaient remarqué une ressemblance singulière entre une période à peu près décennale trouvée par M. Schwabe dans la fréquence des taches solaires et une période semblable établie par M. Lamont dans l'amplitude des variations diurnes de la déclinaison. Mais M. Broun, en remontant jusqu'aux observations magnétiques de Cassini, commencées en 1783, a montré que les deux périodes sont loin d'être égales et diffèrent de plus de six mois.

Disons enfin qu'il résulte de la comparaison d'un grand nombre d'observations de E. Sabine à Toronto et de M. Kreil que les positions de la lune ont une légère influence sur les trois éléments du magnétisme terrestre. Cette influence, dont la plus grande, relative à la déclinaison, ne dépasse guère 38", présente deux maximum et deux minimum pendant les vingt-neuf jours et demi du mois lunaire. Ici, il ne peut plus être question d'actions calorifiques, et l'on y voit l'effet du magnétisme terrestre agissant sur la lune, qui ensuite réagit sur le magnétisme du globe, comme un morceau de fer doux induit par un aimant réagit ensuite sur ce dernier.

Nous voyons, d'après cet aperçu des hypothèses par lesquelles on a tenté d'expliquer les particularités du magnétisme terrestre, que la question est loin d'être résolue. Nous verrons dans l'*électro-magnétisme* comment tous ces phénomènes s'expliquent naturellement par des mouvements d'électricité sur la terre et dans son atmosphère. Dans cette nouvelle théorie, les fluctuations et les changements perpétuels de l'état magnétique du globe se conçoivent facilement, et sont bien en rapport avec l'extrême mobilité de l'agent électrique.



## CHAPITRE II

## ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Succina.... Ceterum digitorum accepta  
caloris anima trahunt in se palcas ac folia  
arida quæ levia sunt : ac ut magnes lapis,  
ferri rumenta quoque.

C. PLINII, II. N. lib. xxxvii, c. 12.

§ 1. — DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LE FROTTEMENT  
ET THÉORIES ÉLECTRIQUES

I. Du développement de l'électricité par le frottement.

**1580. Phénomènes généraux.** — Quand on frotte le verre, la résine, le soufre....., avec une étoffe, du cuir, des feuilles de plomb..., les corps frottés acquièrent la propriété d'attirer certains corps, tels que de légers morceaux de papier, de liège, de moelle de sureau, des lambeaux de feuilles d'or, des barbes de plume, etc. (fig. 1097). Si le corps frotté est assez gros et qu'on en approche le doigt, on entend un léger pétilllement, et l'on aperçoit, dans l'obscurité, une étincelle plus ou moins vive. Enfin, quand on promène ce corps près du visage ou des mains, on ressent une impression particulière, que Hauksbée comparait à celle que produit une toile d'araignée. En passant la main sur la surface du corps frotté, on fait disparaître les propriétés que le frottement lui avait communiquées.

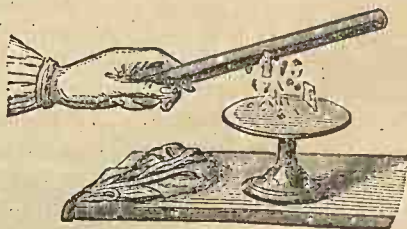


Fig. 1097.

La cause de ces phénomènes a reçu le nom d'*électricité*, du nom grec de l'ambre jaune ou succin (ἤλεκτρον), sur lequel la propriété attractive a d'abord été observée. De ce mot, on a tiré une foule de termes dérivés, dont le sens se comprendra facilement quand nous aurons à les employer. Il faut remonter

jusqu'à Thalès de Milet, 600 ans avant notre ère, pour trouver les premiers essais sur l'attraction qu'exerce l'ambre frotté<sup>1</sup>. Ce phénomène, dont Théophraste fait mention dans son *Traité des pierres précieuses*, était l'unique fait d'électricité connu des anciens, et l'ambre et le jayet les seules substances sur lesquelles ils l'eussent observé. Au seizième siècle, Gilbert fit sortir la science de l'électricité de sa longue enfance, comme il avait fait pour le magnétisme; il constata la propriété de s'électriser, dans la plupart des pierres précieuses, les résines, la gomme laque, le soufre, le verre, etc., et il remarqua qu'on l'observe difficilement quand le temps est humide. Depuis, une foule d'observateurs, Wilke, Otto de Guericke, Hauksbée, Gray, Dufay, Nollet, Franklin, Wilson, Æpinus, Beccaria, Cavallo, etc., augmentèrent la liste des corps électriques.

**Électroscopes.** — Pour expérimenter, on approche simplement le corps frotté, de corps légers placés sur une table (fig. 1097); ou bien on emploie le pendule électrique (fig. 1099), formé d'une balle de moelle de sureau suspendue à un fil. On se sert encore de l'aiguille électrique (fig. 1098), qui n'est autre chose qu'un petit levier mobile, sur une pointe et terminé par deux balles métalliques. Ces divers instruments se nomment des électroscopes.

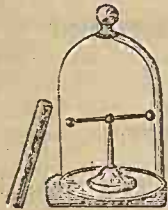


Fig. 1098.

Otto de Guericke, expérimenta avec des globes de verre ou de soufre qu'il faisait tourner rapidement sur eux-mêmes, pendant qu'un aide appliquait les mains sur leur surface, afin d'exercer un frottement énergique; il réalisa ainsi la première machine électrique. Dès lors, les expériences se multiplièrent, et, suivant l'expression de Romas, « les physiciens eurent, dans le cours de quelques années, beaucoup plus d'idées justes de l'électricité que les anciens philosophes n'en avaient conçu de fausses dans l'espace de 2000 ans. » C'est alors que Otto de Guericke découvrit l'étincelle électrique qui jaillit d'un corps électrisé quand on en approche le doigt. Boyle remarqua que les attractions semblent s'exercer à travers les corps, par exemple, à travers les parois d'une cloche (fig. 1098). Newton avait déjà constaté qu'une lame de verre frottée d'un côté attirait de l'autre. Boyle remarqua aussi que les corps frottés paraissent lumineux dans l'obscurité, et répandent une légère odeur, qu'il comparait à celle du phosphore ou de l'acide nitrique. Il démontra que l'ambre attire dans le vide imparfait, et qu'un corps électrisé est attiré par un corps à l'état naturel; il entrevit ainsi le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, que Newton devait développer plus tard.

**1531. Propagation de l'électricité dans certains corps.** — Pendant longtemps on a divisé les corps en corps *idio-électriques*, pouvant s'électriser par

<sup>1</sup> De Humboldt a vu avec surprise les enfants des Sauvages des bords de l'Orénoque, race des plus dégradée, s'amuser à faire attirer des corps légers par certaines graines lisses et aplaties, après les avoir vivement frottées.

le frottement, et corps *anélectriques*, qui ne le pouvaient pas. Mais cette distinction ne tarda pas à disparaître, pour être remplacée par une autre. Gray, aidé de Weller, découvrit par hasard, en 1722, 125 ans après Gilbert, que la vertu électrique peut se propager dans certains corps. Ayant frotté un tube de verre fermé par un bouchon de liège, il vit que le bouchon attirait quoiqu'il n'eût pas été frotté. Il en conclut que la faculté d'attirer lui avait été communiquée par le verre. Il s'icha alors dans le bouchon, une tige de sapin terminée par une boule d'ivoire, et reconnut que la faculté d'attirer s'était propagée jusqu'à la boule. Voulant savoir jusqu'où pouvait aller une pareille transmission, il se plaça à une fenêtre élevée et suspendit au bouchon un long fil de fer. Ayant ensuite frotté le tube de verre, il vit l'extrémité inférieure du fil de fer attirer des corps légers qu'on en approchait. Cette transmission de la vertu attractive se fait avec une rapidité telle qu'on peut la regarder comme instantanée; c'est pourquoi Boyle, en 1670, l'attribua à un *fluide* extrêmement subtil, se répandant dans certains corps avec une excessive rapidité, et auquel les physiciens donnèrent le nom de *fluide électrique*.

L'électricité ne se répand pas également dans tous les corps; les corps dits *anélectriques* se prêtent à la propagation, tandis que les corps *idio-électriques* s'opposent au passage du fluide. C'est encore le hasard qui mit Gray sur la voie de cette découverte. Il étudiait la transmission de l'électricité, d'un tube de verre frotté à une boule d'ivoire, par une corde tendue horizontalement et soutenue par un cordon de chanvre. Il n'obtint d'abord aucun résultat; mais Weller ayant eu l'idée heureuse de remplacer le fil de suspension par un fil de soie, la boule attira des corps légers dès que le tube de verre eut été frotté. Le fil de soie s'étant rompu, fut remplacé par un fil de laiton qui se trouvait là par hasard, et la boule d'ivoire ne donna plus aucun signe d'électricité, jusqu'à ce que le fil de soie eût été rétabli. En suspendant ensuite une longue corde par des cordons de soie, les deux observateurs purent conduire l'électricité à 765 pieds de distance, sans que l'attraction parût diminuée. Ils attribuèrent alors l'insuccès antérieur, à ce que le fluide électrique se perdait par le fil de laiton ou de chanvre, tandis que la soie s'opposait à son passage. Des expériences multipliées leur montrèrent ensuite que les corps doivent être divisés en *bons conducteurs*, qui laissent passer facilement l'électricité et en *mauvais conducteurs* dans lesquels ce fluide ne peut se propager que très-difficilement.

**1582. Tous les corps s'électrisent par le frottement.** — Six ans après, Dufay qui faisait échange de ses découvertes avec Gray, fit voir que tous les corps sont susceptibles de s'électriser par le frottement, quand on prend la précaution de tenir ceux qui sont bons conducteurs, par l'intermédiaire de substances non conductrices. Ainsi, on peut électriser un cylindre de métal quand il est séparé de la main par un tube de verre. Dès lors, on essaya d'électriser toutes sortes de corps, même le corps des animaux. Simpson électrisa un chat, en passant la main sur son dos; les poils se hérissaient, étaient attirés par la main, et, dans l'obscurité, par un temps sec, chaque friction était accompagnée d'une lueur.

Les cheveux longs, surtout les blonds, s'électrisent par le passage du peigne, qui produit une lueur très-distincte. Brydone parvint à rassembler sur des conducteurs suspendus à des fils de soie, l'électricité dégagée sur un chat. Il tira des étincelles de deux personnes, montées sur des blocs de résine qui s'opposaient à la perte de l'électricité, et dont l'une passait le peigne dans les cheveux de l'autre, qui n'avaient reçu ni poudre ni pommade depuis plusieurs mois. Antérieurement, Gray avait transmis le fluide électrique d'un bloc de résine, au corps d'un enfant couché sur des cordons de soie tendus horizontalement, et avait vu les corps légers attirés par ses mains; et Dufay avait excité une admiration générale en tirant des étincelles du corps d'un individu ainsi suspendu.

Quand l'air est bien sec, l'électricité peut apparaître d'une manière tout à fait inattendue. Par exemple, on a vu, à New-York, des personnes s'électriser en marchant sur des tapis de laine, au point de donner des étincelles en touchant des corps bons conducteurs. La maison était faite de matériaux peu conducteurs et très-secs. — Colladon a vu, dans plusieurs filatures, à Mulhouse, le frottement des mèches de coton glissant dans des anneaux métalliques, produire beaucoup d'électricité; quand l'air était sec, cette électricité se conservait, et les filaments flottant dans l'air s'amassaient en houppes sur les parties saillantes des métiers, au point d'en entraver le jeu. Dans les usines, on voit souvent le frottement des courroies de renvoi engendrer assez d'électricité pour produire des étincelles, surtout quand les machines reposent sur de l'asphalte, qui les isole.

Les liquides produisent de l'électricité par le frottement sur des solides qu'ils ne mouillent pas: du mercure bien sec agité dans un verre, produit des lueurs dans l'obscurité, et le verre est électrisé. Dans l'expérience de la pluie de mercure (I, 38), on peut tirer des étincelles de la virole supérieure, on aperçoit des lueurs assez vives, et le tube de verre attire les corps légers, après avoir reçu de l'électricité des gouttelettes de mercure qui l'ont touché dans leur chute. Picard a remarqué, le premier, des lueurs dans le tube du baromètre quand on y déplace brusquement le mercure. Hauksbée reconnut qu'il en est de même quand le vide est incomplet, et attribua, le premier, ces lueurs à l'électricité.

Le frottement des gaz produit aussi de l'électricité. Hauksbée obtint des lueurs vives en faisant passer de l'air par bulles à travers du mercure placé sous le récipient de la machine pneumatique. Wilson électrisait des lames de verre au moyen du vent d'un soufflet, par un temps bien sec. L'expérience réussit de même sur la résine, la gomme laque; et les résultats sont bien plus marqués quand l'air que l'on insuffle est mêlé de poussière. L'air qui sort d'un fusil à vent produit une lueur quand la bourre contient un peu de poussière. En général, toutes les fois que deux corps sont frottés l'un par l'autre, il se dégage de l'électricité. Il n'y a que le cas de deux liquides ou de deux gaz qui laisse du doute; mais les circonstances sont telles dans ce cas, qu'il serait presque impossible d'apercevoir l'électricité, s'il s'en dégageait.

**1583. Des corps bons ou mauvais conducteurs.** — Tous les corps pouvant s'électriser par le frottement, on ne peut plus les diviser en anélectriques

et idio-électriques ; mais on doit les distinguer en *bons conducteurs* et en *mauvais conducteurs* de l'électricité. Ces derniers se nomment aussi *corps isolants*, parce qu'on s'en sert pour séparer de la terre les corps bons conducteurs sur lesquels on veut conserver l'électricité, qui, sans cette précaution, se perdrait dans le sol. Le globe terrestre, considéré à ce point de vue, porte le nom de *réservoir commun*.

Parmi les corps isolants, nous citerons la *gomme laque*<sup>1</sup>, le diamant, les pierres précieuses transparentes, les résines, le soufre, l'ambre, le verre, la porcelaine, la gutta-percha, le caoutchouc, et surtout le caoutchouc durci ou *ébonite*, la soie... L'air sec est mauvais conducteur ; sans cela, les phénomènes électriques nous seraient inconnus.

Les bons conducteurs sont les métaux, la plombagine, le coke, le corps des animaux, le lin, le chanvre, les liquides, excepté les huiles. Le charbon de bois présente une particularité importante à remarquer : calciné, il conduit bien, tandis qu'il est mauvais conducteur dans son état ordinaire. Nous savons qu'il en est de même pour la chaleur, et l'on peut dire, en général, que les *corps solides qui sont bons ou mauvais conducteurs pour la chaleur sont dans le même cas pour l'électricité*.

Les pierres, les briques, le bois, surtout quand il est sec, le coton, la moelle de sureau, conduisent imparfaitement l'électricité, et isolent quand il s'agit de faibles charges.

Les vapeurs, particulièrement la vapeur d'eau, conduisent bien ; aussi, l'air devient-il conducteur quand il est humide, ce qui rend alors les expériences d'électricité très-difficiles. Le verre, qui est très-hygrométrique (II, 1440), cesse d'isoler quand il se recouvre d'humidité ; il faut alors le dessécher au moyen de linges chauds. Dans les appareils électriques, on a soin de l'enduire de gomme laque, qui est peu hygrométrique, et qu'on applique dissoute dans l'alcool. Cependant, M. Gaugain a reconnu que la gomme laque cesse d'isoler quand l'air est très-humide. Les meilleurs supports isolants se font en caoutchouc durci.

**1581. Causes qui modifient la conductibilité des solides.** — Le pouvoir conducteur d'un même corps peut varier avec sa structure. Ainsi, le diamant est isolant, tandis que la plombagine conduit bien. Le verre pulvérisé et la fleur de soufre conduisent assez bien. La cire et le suif conduisent à l'état liquide, mais non à l'état solide. La glace froide et sèche isole, tandis que la neige et l'eau conduisent bien. Nous avons cité le cas du charbon calciné ou non.

<sup>1</sup> La gomme laque est une espèce de résine rouge-brun provenant d'un suc desséché qui s'écoule, sous forme d'un liquide laiteux, des tiges de plusieurs arbres de l'Inde (*Ficus indica*, *Ficus religiosa*, *Rhamnus jujuba*...), quand ils sont piqués par la femelle d'un certain insecte (*Coccus lacca*). L'animal reste renfermé et se multiplie dans ce liquide, qui durcit peu à peu. On sépare la substance résineuse pure en dissolvant dans l'alcool froid, filtrant et évaporant. La cire à cacheter est de la gomme laque mêlée d'un peu de térébenthine, et colorée avec du vermillon ou d'autres matières. Elle nous venait autrefois de l'Inde par l'Espagne, d'où lui est venu son nom de *cire d'Espagne*.

**Influence de la chaleur.** — La chaleur rend les corps isolants conducteurs. Par exemple, le verre brûlant, le soufre, la gomme laque, les gaz même, très-chauds, conduisent l'électricité. Si l'on place une lampe métallique à alcool allumée et isolée à 2<sup>m</sup> au-dessous d'un corps électrisé, elle attire les corps légers; ce qu'elle ne fait pas lorsqu'elle est éteinte. Nous verrons que la chaleur diminue, au contraire, la conductibilité des métaux.

## II. Théories électriques. — Électrisation par influence.

**1585. DES DEUX MODES D'ÉLECTRISATION.** — Dufay, qui a prouvé que tous les corps peuvent s'électriser, a aussi distingué deux manières d'être de l'électricité, en s'appuyant sur les expériences qui suivent. On prend un *pendule électrique*, formé d'une balle de moelle de sureau, *a*, suspendue à un fil de soie (fig. 1099), et l'on en approche un morceau de résine électrisé. La balle est attirée; mais, dès qu'elle a touché la résine, l'attraction se change en répulsion. Ce résultat, observé d'abord par Otto de Guericke, ne se produit qu'après que la balle, qui est isolée, a emprunté à la résine une partie de son électricité, comme on peut s'en assurer directement en approchant la main de cette balle, qui en est aussitôt attirée. Si on la décharge en la touchant avec la main, elle est de nouveau attirée par la résine, puis repoussée après le contact. Si alors on approche un bâton de verre électrisé, de la balle repoussée par la résine, elle est attirée, et plus vivement que si elle était à l'état naturel.

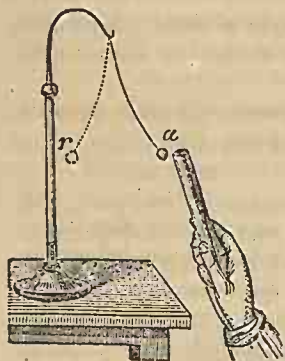


Fig. 1099.

De même, si l'on fait toucher la balle au verre électrisé, elle est repoussée; mais elle est alors attirée par la résine électrisée. La balle, dans un même état, est donc repoussée par l'un des corps électrisés, et attirée par l'autre; d'où l'on a conclu que le verre est électrisé par le frottement autrement que la résine. On a supposé alors qu'il y avait deux espèces d'électricités; celle qui se trouve sur le verre a reçu le nom d'*électricité vitrée* ou *électricité positive*, et l'autre, le nom d'*électricité résineuse* ou *électricité négative*, et on les désigne par les signes (+) et (-). Nous allons voir que l'espèce d'électricité que reçoit un même corps dépend de la nature de la substance avec laquelle on le frotte; c'est pourquoi, pour que la définition des deux électricités soit complète, il faut dire que *l'électricité vitrée est celle qui se dégage sur le verre, et l'électricité résineuse, celle qui se dégage sur la résine, quand on les frotte modérément avec de la laine.*

**1586. Actions mutuelles des deux électricités.** — Remarquons que lorsqu'il y a répulsion, les deux corps en présence sont chargés de la même

électricité, et d'électricités différentes quand il y a attraction. Or, il était naturel d'admettre que les actions mutuelles des corps électrisés n'étaient que la conséquence des actions exercées par les deux fluides l'un sur l'autre. On a donc dit, comme pour le magnétisme, que *les fluides de même nom se repoussent et que les fluides de nom contraire s'attirent*. Cette loi peut se vérifier sur deux pendules électriques, qui se repoussent quand ils sont électrisés de la même manière, et s'attirent quand ils sont électrisés d'une manière contraire.

Si l'on approche d'un pendule électrisé par la résine, un corps quelconque électrisé, il y a nécessairement attraction ou répulsion. Dans le premier cas, le corps sera électrisé comme le verre, et dans le second, d'une manière contraire.

**1587. Production simultanée des deux états électriques.** — Après qu'on eut distingué les deux modes d'électrisation, Wilke reconnut qu'ils se produisent toujours en même temps; l'un des fluides se portant sur le corps frotté, l'autre sur le corps frottant. Et si, le plus souvent, on n'aperçoit qu'un seul fluide, c'est que l'autre se perd dans le *réservoir commun*, le corps qui le reçoit n'étant pas isolé. Si l'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux tenus par des manches de verre (*fig. 1100*), et qu'on les sépare ensuite brusquement, on les trouve électrisés d'une manière opposée, ce que l'on reconnaît au moyen du pendule électrique préalablement chargé d'une électricité connue.

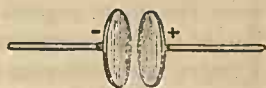


Fig. 1100.

Quand on frotte l'un contre l'autre deux corps de même nature, il peut se faire qu'on n'aperçoive qu'une seule électricité. C'est que l'autre s'est perdue par quelque voie qu'on finit toujours par découvrir. Par exemple, si, comme l'a fait Bergmann, on frotte deux plumes d'oie l'une contre l'autre, elles s'électrisent toutes les deux positivement; et deux bandes de flanelle frottées en croix prennent souvent l'une et l'autre le fluide négatif, comme l'a constaté Faraday. Dans ces deux cas, le fluide de nom contraire à celui que l'on observe est emporté par les parcelles de matière détachées par le frottement; ce que l'on reconnaît en recevant ces parcelles sur une plaque de métal isolée, sur laquelle on constate ensuite la présence de cette électricité.

La nature de l'électricité que prend un corps dépend de celui avec lequel on le frotte, celui-ci tendant aussi à prendre une électricité plutôt que l'autre. C'est ainsi que le verre s'électrise positivement quand il est frotté avec de la laine, et qu'il peut l'être négativement quand on le frotte avec une peau de chat ou de lièvre garnie de son poil, ou avec des pierres précieuses plus dures que lui. Dans la liste qui suit, les substances frottées avec celles qui les suivent s'électrisent *positivement*, et *négativement* avec celles qui les précèdent.

- |                      |                   |                       |
|----------------------|-------------------|-----------------------|
| (+) 1. Peau de chat. | 6. Papier.        | 11. Soufre.           |
| 2. Verre poli.       | 7. Soie.          | 12. Mercure.          |
| 3. Laine.            | 8. Gomme laque.   | 13. Métaux polis.     |
| 4. Plume.            | 9. Résine.        | 14. Gutta-percha.     |
| 5. Bois.             | 10. Verre dépoli. | 15. Coton-poudre (—). |

On montre que le mercure est plus négatif que le soufre, la résine,.... en plongeant des bâtons de ces substances dans du mercure sec; on les retire électrisés *positivement*. — Les corps les plus *négatifs* sont la *gutta-percha*, le papier *pyroxyle*, et surtout le *coton-poudre*.

Le verre poli est plus négatif que la peau de chat garnie de son poil; mais, d'après M. Hagenbach, s'il en est ainsi quand on le frotte alternativement dans deux sens opposés, si on le frotte toujours dans le même sens, il s'électrise *positivement* avec la peau du dos, et négativement avec celle du cou et des pattes. Frotté légèrement avec la peau des pattes de derrière, il prend l'état positif, et si l'on frotte en appuyant fortement, l'état négatif.

**Influence de l'état de la surface.** — Un même corps frotté avec la même substance peut recevoir l'une ou l'autre électricité, suivant l'état de sa surface. C'est ainsi que la porcelaine et le verre polis, frottés avec du drap, s'électrisent *positivement*, et quand ils sont *dépolis*, *négativement*. Si, comme l'a fait Canton, on frotte avec du drap non isolé un bâton de verre dépoli sur la moitié de sa longueur, la moitié polie s'électrise *positivement*, et l'autre *négativement*. — Si l'on frotte deux plaques de verre l'une sur l'autre, chacune d'elles peut prendre l'électricité négative; mais si l'une des plaques est dépolie, c'est elle qui prend toujours le fluide négatif.

Il suffit d'une modification invisible de la surface du verre pour qu'il prenne le fluide négatif. M. Heintz <sup>1</sup> ayant frotté un tube de verre avec de la poudre fine d'émeri humide, puis l'ayant lavé avec soin, vit ce tube prendre l'état négatif quand il le frottait légèrement avec du drap, quoique sa surface ne présentât aucun changement apparent. En frottant plus fortement, l'état positif reparaisait. — Le verre, le cristal de roche, le spath d'Islande, le spath pesant, le gypse exposés à une flamme quelconque, surtout celle de l'hydrogène, puis lavés et nettoyés avec soin, acquièrent la propriété de s'électriser négativement avec le drap, le cuir, la soie et même les métaux. La modification produite à la surface n'est pas due à la chaleur seule; car, un bâton de verre qui a été chauffé dans un tube bien fermé continue de donner de l'électricité positive. Elle n'est pas due non plus à des actions chimiques produites sur le verre par la flamme; car l'acide carbonique très-chaud et la vapeur d'eau ne produisent aucun effet, tandis que la flamme de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène rendent le verre négatif. Un bâton de verre plongé dans un acide concentré, puis lavé avec soin, prend encore l'électricité négative, quand on le frotte modérément. Les alcalis ne produisent pas ces sortes d'effets.

Un minéral, la *cyanite*, présente cette particularité que certains échantillons s'électrisent *positivement* et d'autres *négativement*. Un même cristal peut même présenter, sur ses différentes faces, des tendances électriques opposées; c'est pour cela que Haüy a donné à cette substance le nom de *disthène*.

Un ruban de soie blanc frotté sur un ruban noir prend l'état positif, et le ruban

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, par M. A. De la Rive, t. III, p. 742.



noir, l'état négatif; ce que Inghenhouz attribuit à une âpreté communiquée au ruban noir par la teinture. Cigna ayant passé sur deux bandes de soie blanches superposées, l'angle d'une règle d'ivoire, trouva celle de dessus électrisée négativement, et celle de dessous positivement. Un ruban de soie frotté par un ruban identique passant transversalement sur un de ses points prend l'état négatif, et le ruban mobile l'état positif.

**1588. Influence de la chaleur.** — M. Dessaigne a découvert que la chaleur donne aux corps une tendance à prendre le fluide négatif<sup>1</sup>. Si l'on frotte l'un sur l'autre deux disques de verre identiques, mais dont l'un soit plus chaud que l'autre, le plus chaud prend le fluide négatif. Si l'on frotte un bâton de verre avec une feuille de plomb, il s'électrise positivement; mais si, en pressant fortement, on vient à l'échauffer, il s'électrise négativement. On peut s'expliquer maintenant ce fait remarqué par Bergmann, que, de deux surfaces de même nature, celle qui reçoit le plus de frottement s'électrise négativement : c'est qu'elle s'échauffe le plus. On voit donc pourquoi, dans les expériences ci-dessus, le ruban noir, le ruban blanc frotté par la règle, le ruban fixe sur lequel on en fait glisser un autre en travers prennent l'état négatif.

**1589. DES THÉORIES ÉLECTRIQUES.** — Depuis Gilbert, plusieurs physiciens, Dufay, Hauksbée, Nollet ont proposé sur l'électricité des hypothèses dans lesquelles on suppose surtout l'existence d'effluves sortant des corps électrisés et combinant leur action avec celle du milieu ambiant. Ces conceptions vagues et obscures ont été abandonnées dès qu'il s'est agi d'expliquer d'autres faits que les attractions électriques. Franklin a ensuite proposé une théorie qui a été accueillie avec transport et à laquelle on revient aujourd'hui, après l'avoir perfectionnée et pour ainsi dire épurée. Puis est venue celle de Symmer, ou des deux électricités, que nous allons d'abord exposer telle qu'on l'enseigne encore généralement.

**Théorie de Symmer.** — Dans cette théorie, on admet l'existence de deux fluides particuliers, l'électricité positive et l'électricité négative. Chacun d'eux repousse le fluide de même espèce et attire celui d'espèce contraire. On admet, en outre, que tous les corps contiennent, en quantité indéfinie, les deux électricités, réunies de manière à former un troisième fluide nommé *électricité neutre*. Le frottement, par un mode d'action qui nous est inconnu, décomposerait le fluide neutre en séparant les deux électricités, de manière que l'une d'elles se porte sur le corps frotté, et l'autre sur le corps frottant. Ces électricités sont en quantités égales sur deux disques identiques et isolés que l'on a électrisés en les frottant l'un contre l'autre; car, si l'on rapproche les deux disques l'un de l'autre, on voit jaillir une étincelle, et tout rentre à l'état neutre. Chacune de ces électricités se comporte comme un fluide très-subtil, tendant à se répandre en vertu de la répulsion qui existe entre ses parties; se répandant, en effet, sur les corps bons conducteurs, avec une rapidité extrême, que nous étudierons plus

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 33.

tard, et ne pouvant se mouvoir que très-difficilement dans les corps mauvais conducteurs.

On voit que la théorie de Symmer repose sur une hypothèse, celle de l'existence de deux fluides particuliers, auxquels on attribue des propriétés qui ne sont que la traduction des phénomènes. Ces fluides doivent être considérés comme une sorte de symbolisme, une espèce de formule servant à représenter les faits. Tout ce qu'on peut dire avec certitude, c'est que certaines actions exercées sur les corps y développent des forces agissant d'une manière opposée. Cependant l'hypothèse des deux fluides, non-seulement rend compte des phénomènes qui ont servi à l'établir, mais encore se plie naturellement à l'interprétation d'une foule d'autres, et elle a permis de prévoir des faits que l'expérience a ensuite vérifiés. On peut donc dire que les choses se passent comme si ces fluides existaient; et comme la théorie de Symmer se plie facilement au langage des raisonnements, nous en ferons habituellement usage, tout en faisant voir le plus souvent comment celle de Franklin, dont nous allons indiquer le principe, permet d'expliquer les mêmes phénomènes.

**Théorie de Franklin.** — Dans cette théorie, on n'admet qu'une seule espèce d'électricité, dont les parties se repoussent entre elles, et qui est unie aux molécules des corps, en quantité dépendant de leur nature, et constituant, pour chacun d'eux, un état d'équilibre naturel dans lequel le fluide ne produit aucun effet extérieur. Vient-on à augmenter cette dose d'électricité, le corps est électrisé *en plus* ou *positivement*; vient-on, au contraire, à lui enlever une partie de son électricité naturelle, il est électrisé *en moins* ou *négativement*. Le frottement fait passer de l'électricité, d'un des corps mis en présence sur l'autre corps, de sorte qu'ils sont électrisés, l'un en plus, l'autre en moins; si on les fait alors communiquer, l'équilibre se rétablit. Ce système a longtemps joui d'une grande faveur. Son côté faible était dans l'explication des actions exercées par les corps électrisés en moins; car Æpinus l'ayant soumis au calcul trouva que, pour expliquer la répulsion des corps ainsi électrisés, il faudrait admettre une répulsion entre les molécules des corps solides. Æpinus imagina alors un autre système dans lequel il n'admettait aussi qu'un seul fluide, mais qui n'eut pas la vogue de celui de Franklin. Les expériences de Dufay, confirmées par Kinnersley, firent songer à admettre deux fluides, et c'est alors que Symmer développa la théorie qui porte son nom.

**1590. Théorie de l'Éther électrique.** — L'opinion d'un seul fluide électrique est actuellement généralement adoptée, quoiqu'on ait continué d'employer le langage commode de l'hypothèse de Symmer, et la différence entre l'état *positif* et *négatif* d'un corps est regardée comme analogue à celle qui existe entre le *chaud* et le *froid*. On a donc conservé le point de départ de Franklin; mais les physiciens, en s'appuyant sur un nombre immense de faits accumulés depuis l'époque du célèbre électricien, ont développé et sensiblement modifié son système.

D'abord, on a reconnu qu'il n'est pas nécessaire de supposer un fluide parti-

culier, et que l'éther, dont les vibrations constituent la chaleur et la lumière, suffit pour expliquer les phénomènes électriques. Répandu dans tout l'espace, doué d'une force d'expansion, d'une élasticité et d'une répulsion pour lui-même caractéristiques, l'éther est contenu dans les corps sous deux états différents : une partie remplit les pores des corps avec la même densité qu'à l'extérieur, et l'autre est condensée autour des molécules avec une densité qui varie d'une substance à l'autre, comme le prouvent, ainsi que nous le verrons, les phénomènes lumineux. Chaque corps contient ainsi une certaine quantité d'éther, constituant un état d'équilibre qui lui est particulier. Si, par le frottement ou tout autre moyen, on rompt cet équilibre, de l'éther emprunté aux atmosphères qui enveloppent les molécules de l'un des corps, vient augmenter la densité des atmosphères qui entourent les molécules de l'autre corps, qui est électrisé *en plus*, tandis que le premier, qui a cédé une partie de son éther, est électrisé *en moins*. C'est autour des molécules que le mouvement de départ ou d'accumulation de l'éther se produit ; et, si certains points du système des deux corps mis en présence gagnent de l'éther, d'autres en perdent une quantité égale. Ce déplacement de molécule à molécule se fait facilement dans les corps bons conducteurs, mais très-difficilement dans les mauvais conducteurs. Quand le mouvement est intense, il est accompagné de vibrations de l'éther, comme il s'en produit également dans l'écoulement des fluides pondérables, et cela explique naturellement la chaleur et la lumière qu'engendre souvent l'écoulement de l'électricité.

Il résulte de là et de ce point d'appui, que l'éther en mouvement prend, pour ainsi dire, sur les molécules des corps, que les déplacements de ce fluide qui constituent ou précèdent les phénomènes électriques, ne peuvent avoir lieu sans l'intervention de la matière pondérable. Nous verrons, en effet, que le vide *complet* intercepte le passage de l'électricité, pendant que la rareté des milieux gazeux favorise ce passage. On peut comparer ce qui se passe ici à l'écoulement de l'eau à travers un siphon formé d'une bande de toile imbibée : le mouvement est d'autant plus facile que les mailles du tissu sont plus lâches, tout en restant capillaires ; mais il s'arrêterait si le tissu était interrompu en quelque endroit. C'est ainsi que l'écoulement électrique est supprimé dans le vide, c'est-à-dire là où la matière manque. Cet écoulement, quand il se fait à travers un fil conducteur, constitue ce que l'on appelle un *courant électrique*.

Cette explication de l'électricité par les déplacements ou les changements de densité de l'éther dans les corps pondérables se prête facilement à l'interprétation des phénomènes ; et, s'il y a des cas où la science ne fait encore qu'entrevoir l'explication désirée, on peut montrer du moins, généralement, qu'il n'y a pas contradiction entre le principe théorique et les faits et lois résultant de l'expérience. On voit aussi que l'éther reste le seul fluide impondérable conservé dans la science ; les effluves, la matière subtile, les fluides magnétiques, le fluide lumineux, le calorique, les fluides électriques ayant été tour à tour abandonnés.

A mesure que nous avancerons dans l'étude de l'électricité, nous verrons comment la théorie par l'éther permet de rendre compte des phénomènes. Nous

allons immédiatement étudier l'électrisation produite à distance dans les corps bons conducteurs, effet qui a été regardé longtemps comme une confirmation de la théorie de Symmer; mais nous verrons avec quelle simplicité on l'explique dans la théorie d'un seul fluide.

**1591. INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE, OU ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.** —

Considérons un cylindre métallique isolé AB (fig. 1101), au-dessous duquel on a suspendu, par des fils de lin, des couples de balles de sureau *a, b, c, c', b', a'*. Si l'on approche de ce cylindre un corps électrisé V, on voit aussitôt les balles de sureau de chaque couple s'écarter l'une de l'autre, et d'autant plus qu'elles sont plus rapprochées des extrémités; celles qui sont vers le milieu restent seules en repos. D'où l'on conclut que les extrémités du cylindre AB sont électrisées. On reconnaît, en outre, en approchant des pendules *a, a'*, un bâton de verre électrisé positivement, que l'extrémité A est électrisée d'une manière contraire

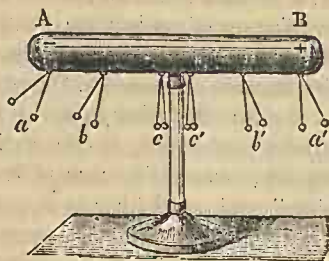


Fig. 1101.

au corps V, tandis que l'extrémité B est électrisée de la même manière. Ce résultat est aussi indiqué par l'inclinaison des balles *a* et *a'*, dont les premières se portent vers le corps V, tandis que les autres, un peu moins écartées, s'en éloignent.

Voici comment ces résultats s'expliquent

dans la théorie de Symmer : le fluide neutre contenu dans le corps AB est décomposé par l'influence de l'électricité du corps V, laquelle attire le fluide de nom contraire et repousse le fluide de même nom, de manière à les séparer en vainquant leur attraction mutuelle. Ces fluides ne dépassant pas les extrémités A et B, parce que l'air, qui est mauvais conducteur, les arrête. C'est là ce qu'on désigne par *électrisation par influence* ou *induction électrostatique*.

Si l'on éloigne le corps V, ou si on lui enlève son électricité, les fluides séparés sur AB se recombinaient aussitôt en obéissant à leur attraction mutuelle, et tout y rentre à l'état neutre. On peut mettre à la suite de AB un ou plusieurs conducteurs semblables, dans lesquels la décomposition se fera de la même manière mais sera naturellement moins intense. Le phénomène est analogue à la décomposition du *fluide magnétique neutre* du fer doux sous l'influence d'un aimant (1595); seulement, tandis que les fluides magnétiques ne se déplacent pas, il y a ici transport des deux électricités aux extrémités du corps AB; et si l'on forme ce corps, comme l'a fait Wilke, de deux parties, que l'on sépare pendant l'induction, chacune d'elles emporte l'électricité qu'elle a reçue.

L'action exercée par le corps V sur les pendules *a*, ayant donné lieu à des

objections, M. Riess dispose le conducteur AB verticalement (*fig. 1102*), de manière que le pendule *a* ne puisse plus être écarté du conducteur AB par l'action de l'électricité du corps V, qui au contraire tend à le rapprocher; si bien qu'on voit souvent le pendule *a* s'écarter moins que le pendule *a'*. La lame de verre *v* est destinée à montrer l'induction à travers une lame isolante. Remarquons enfin que, l'électricité attirée en B réagissant à son tour sur celle du corps induisant V, l'attire et la condense dans les points les plus rapprochés de A.

**Limite de l'électrisation par influence.** — L'induction ne peut séparer que des quantités limitées de fluide positif et négatif. En effet, quand une certaine quantité de fluide neutre a été décomposée, les électricités déjà accumulées en A et B exercent sur les éléments de fluide neutre, des actions opposées à celles du corps induisant V, et quand ces électricités sont en quantité suffisante, elles contrebalancent l'action de V, et la résultante des trois actions est nulle en chaque point du cylindre AB. Cet état d'équilibre est atteint instantanément, et la quantité décomposée dépend de la distance; si l'on rapproche le corps V, les pendules s'écartent davantage, et ils se rapprochent si on l'éloigne. La quantité décomposée dépend aussi de la longueur du cylindre AB, l'électricité qui est repoussée en B agissant, pour s'opposer à une nouvelle décomposition, d'une distance d'autant plus grande que le cylindre est plus long. Ce résultat peut se vérifier en ajoutant un autre cylindre isolé à la suite du cylindre AB; on voit aussitôt les pendules *a* s'écarter davantage.

Si l'on fait communiquer le cylindre AB avec le sol pendant que la décomposition a lieu, les pendules *c'b'a'*, retombent (*fig. 1101*), tandis que les pendules *a* s'écartent davantage. C'est que l'électricité positive de AB a été repoussée dans le sol; tandis que l'électricité négative est maintenue par attraction, et s'accumule plus près de l'extrémité A, n'étant plus sollicitée par le fluide positif de B. De plus, la quantité d'électricité négative augmente instantanément par une nouvelle décomposition de fluide neutre, l'électricité qu'il y avait d'abord ne suffisant plus, quand elle est seule, pour empêcher une nouvelle décomposition en contrebalançant l'action de V. Du reste, quand le nouvel état d'équilibre est établi, il y a toujours moins d'électricité négative en A qu'il n'y en a de positive en V, parce que l'électricité de V agit sur le fluide neutre de AB à une plus grande distance que le fluide négatif qui est en A.

Il est à remarquer qu'on obtient le même résultat en établissant la communication avec le sol par l'extrémité A. Pour expliquer, dans ce cas, la disparition du fluide positif, remarquons qu'il se fait une décomposition par influence dans le fluide neutre du conducteur qui établit la communication; le fluide positif

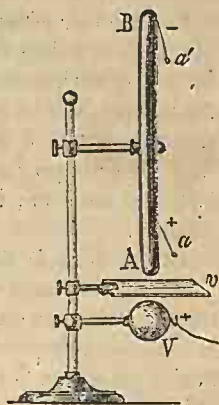


Fig. 1102.

provenant de cette décomposition est repoussé dans le sol, et le fluide négatif vient en A, où il y en a déjà assez pour l'équilibre; l'excédant se répandra donc sur le corps AB, et, arrivé en B, détruira le fluide positif qui s'y trouve, en formant du fluide neutre. — Pour confirmer cette explication, M. Riess fait toucher au point A un long conducteur isolé, et voit les pendules *a* s'écarter et les pendules *a'* se rapprocher en partie seulement, la décomposition dans le long conducteur étant limitée parce que l'électricité repoussée ne se perd pas dans le sol. Si ce conducteur est très-court, il ne fait qu'emprunter une partie de l'électricité de l'extrémité A, et les pendules *a* se rapprochent un peu.

Si, après avoir fait communiquer le corps AB avec le sol, puis avoir supprimé la communication, on enlève le corps V, l'électricité négative se répand sur le corps AB, et les pendules s'écarteront également aux deux extrémités, mais, évidemment, moins que ne le faisaient d'abord les pendules *a*.

Lorsque l'air est humide, on voit souvent, quand on enlève le corps V pendant que les deux fluides sont encore sur AB, les pendules *a*, *a'* continuer à s'écarter un peu, ordinairement par du fluide contraire à celui de V. C'est qu'une partie du fluide repoussé s'est écoulée par l'air humide et les supports. Cependant, quand il y a beaucoup d'électricité, le fluide en excès peut être contraire à celui de V, la perte par l'air étant moindre en B qu'en A où l'électricité appuie plus fortement sur l'air, l'action de V y étant plus intense à cause de la moindre distance.

**1592.** Dans la théorie de Franklin, on explique l'induction de la manière suivante : si le corps V (fig. 1101) est électrisé positivement, il repousse l'électricité naturelle du corps AB, qui se trouve ainsi électrisé *en plus* à l'extrémité B et *en moins* à l'extrémité A, et quand on établit la communication avec le sol, l'excès qui est en B s'écoule dans le réservoir commun. — Si le corps V est électrisé *en moins*, le fluide naturel de AB se porte vers le corps V où la répulsion est moindre, et l'extrémité B est électrisée *en moins*; et si l'on établit la communication avec le sol, du fluide se porte du sol au point B pour y rétablir l'équilibre naturel, de sorte que sur le corps AB il y a un excès d'électricité. — On voit facilement pourquoi le déplacement est réduit à une quantité limitée de fluide, la partie d'abord accumulée à une des extrémités s'opposant, par répulsion, à l'arrivée d'une nouvelle quantité de ce fluide.

**1593. Remarques.** — L'électricité accumulée en A (fig. 1101 et 1102) et retenue par l'attraction de celle de V, ne peut être reconnue avec sûreté en se servant d'un petit disque métallique fixé au bout d'une tige isolante, et que l'on applique sur le point à explorer; l'électricité de V modifiant par induction l'état électrique de ce disque dès qu'il a quitté la surface du cylindre AB. De là la confusion dans les conséquences que divers physiciens entre autres Melloni et M. Volpicelli ont voulu tirer d'expériences ainsi faites, soutenant que l'électricité de nom contraire à celle du corps V ne produit pas d'action, et même qu'il y a du fluide de même nom sur toute la surface AB, tant que le corps V reste à proximité. MM. Belli, Ohm, Riess, ... ont montré combien est erronée cette opinion, que l'écart des pendules *a* suffit, du reste, à renverser.

Le principe de l'électrisation par influence a été découvert par Canton en 1738. Antérieurement, on avait bien observé quelques phénomènes qui s'y rapportent; par exemple, Gray avait vu une corde isolée attirer par une de ses extrémités, quand on approchait de l'autre, sans la toucher, un corps électrisé; mais on y avait fait peu d'attention. Il résulte d'une lettre des missionnaires de Pékin arrivée en France en 1755, qu'ils avaient découvert, de leur côté, l'électrisation par influence. Cigna, Franklin, Beccaria, Volta, et surtout Wilcke et *Æpinus*, en ont ensuite fait une étude attentive. On a souvent à invoquer ce principe fécond, et nous allons voir comment il sert à expliquer les attractions et répulsions électriques, le jeu des électroscopes les plus simples, l'étincelle électrique et le fonctionnement des machines électriques.

**1594. Induction dans les mauvais conducteurs.** — L'électrisation par influence se produit difficilement à travers les corps mauvais conducteurs, dans lesquels l'électricité ne peut se déplacer, à moins que le corps, fortement électrisé, ne puisse vaincre la résistance au déplacement. Alors les fluides restent séparés après qu'on a enlevé le corps V. Il y a ici analogie avec ce qui se passe dans l'action d'un aimant sur l'acier doué de force coercitive (1500). Cette analogie se soutient dans le fait suivant, remarqué par *Æpinus* : quand on frotte l'extrémité d'un tube de verre, on trouve à une certaine distance, du fluide négatif, puis du fluide positif jusqu'à l'extrémité opposée.

Matteucci a découvert, dans les mauvais conducteurs, un autre genre d'action, sur lequel nous reviendrons quand nous étudierons le mouvement de l'électricité dans ces sortes de corps; il consiste en ce que l'induction produit dans les molécules des corps mauvais conducteurs, une décomposition électrique qui constitue ces corps dans un état analogue à celui du fer doux soumis à l'influence d'un aimant; car les fluides séparés dans les molécules n'en peuvent sortir pour se transporter dans le corps, et ces molécules rentrent à l'état neutre dès qu'on éloigne le corps induisant. Cependant, si ce dernier était fortement chargé, les fluides séparés dans les molécules du premier pourraient en sortir et apparaître à l'extérieur.

### III. Explication des attractions et répulsions. Électroscopes. Étincelle.

**1595. Attractions et répulsions d'après la théorie de Symmer.** — Les actions électriques ont lieu entre les fluides électriques; la matière des corps ne se déplace donc qu'en vertu d'une cause qui leur fait suivre l'électricité qu'ils contiennent.

**I. Actions sur les corps électrisés.** — Il y a deux cas à examiner : le corps électrisé sollicité par un autre corps électrisé, est mauvais conducteur ou il est bon conducteur.

1<sup>o</sup> Si le corps est mauvais conducteur, l'électricité adhère à ses molécules, et les force à suivre ses mouvements.

2° Si le corps électrisé, B (fig. 1103), est bon conducteur et soumis à l'action d'un corps A chargé de la même électricité, le fluide de B est repoussé en *m*, où il s'arrête en appuyant sur l'air mauvais conducteur, de manière à contrebalancer en partie la pression que cet air exerce en *m*. L'excès de pression en *n* force donc le corps B à s'éloigner de A. — Si les deux corps étaient chargés d'électricités contraires, on verrait de même que le corps B devrait s'avancer vers A.

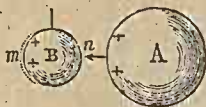


Fig. 1103.

## II. Attraction sur les corps à l'état naturel. —

1° Supposons que le corps à l'état neutre *b* (fig. 1104), bon conducteur et isolé, soit soumis à l'action d'un corps *a* électrisé positivement. Le fluide neutre de *b* sera décomposé par influence, et l'électricité négative, attirée en *n*, agira sur l'air, de manière à détruire une partie de sa pression. Le fluide positif repoussé en *m* en fera autant de son côté, mais moins fortement, la distance au corps *a* étant plus grande; la pression atmosphérique sera donc moins contrebalancée en *m* qu'en *n*, et l'excès de pression en *m* poussera le corps *b* vers le corps *a*. Comme le mouvement est produit ici par une différence d'action, on voit pourquoi l'attraction est faible. — Si le corps *b* n'était pas isolé, le fluide repoussé s'écoulerait dans le sol, et l'attraction serait beaucoup plus vive. Aussi, un pendule électrique dont le fil est de lin est-il bien plus sensible que lorsque ce fil est de soie.

Il peut arriver qu'un corps conducteur électrisé, *b*, soumis à l'action d'un autre corps *a* chargé de la même électricité, soit attiré au lieu d'être repoussé. C'est qu'il y a décomposition par influence de l'électricité neutre de *b*; le fluide repoussé va se joindre à celui que possède déjà ce corps, et le fluide attiré se porte vers *a*. Quand il y a attraction, l'action de ce dernier fluide sur l'air l'emporte, à cause de la moindre distance, sur celle qu'exerce le fluide repoussé, quoiqu'il soit en plus grande quantité. Le magnétisme nous a présenté un phénomène analogue (1500).

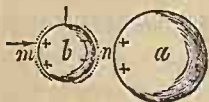


Fig. 1104.

2° Si le corps *b* est mauvais conducteur, la décomposition par influence ne peut s'effectuer, et il n'y a pas attraction. Cependant, quand l'action électrique est énergique, la résistance au déplacement des fluides est vaincue, l'attraction se manifeste et les fluides restent séparés quand on enlève le corps A. Il y a encore analogie avec ce qui se passe dans les corps magnétiques possédant de la force coercitive.

**1596. Attractions et répulsions électriques dans la théorie d'un seul fluide.** — Une des principales causes qui avaient fait renoncer à la théorie de Franklin était la difficulté d'expliquer la répulsion mutuelle des corps électrisés en moins. Il suffit pour lever cette difficulté d'admettre que le fluide unique, l'éther, agit par attraction sur la matière pondérable, ce que prouve, du reste, sa condensation autour des molécules des corps, attestée par les phénomènes de l'optique.



Voici comment M. Briot, en partant de là, rend compte des attractions et répulsions électriques <sup>1</sup>.

Considérons d'abord un élément de volume  $v$ , contenant une masse  $M$  de matière pondérable et une masse électrique  $\mu$ , et cherchons son action sur une masse  $\mu'$  d'électricité placée à une distance  $r$ . Nous verrons bientôt que les actions électriques varient, comme l'attraction universelle, en raison composée des masses d'électricité et en raison inverse des carrés des distances. Si donc on désigne, pour l'unité de distance, par  $f_a$  l'attraction de l'unité de masse pondérable sur l'unité d'électricité, et par  $f_e$  l'action répulsive de l'unité d'électricité sur l'unité d'électricité, l'action de  $M$  sur  $\mu'$  sera  $f_a \frac{M\mu'}{r^2}$ , et celle de  $\mu$  sur  $\mu'$ , —  $f_e \frac{\mu\mu'}{r^2}$ ; le signe (—) indiquant qu'il y a répulsion. La résultante des deux actions sera

$$[1] \quad f_a \frac{M\mu'}{r^2} - f_e \frac{\mu\mu'}{r^2} = \frac{\mu'}{r^2} (f_a M - f_e \mu).$$

Si l'on a  $f_a M = f_e \mu$ , d'où  $f_a : f_e = \mu : M$ , la résultante sera nulle, et l'élément  $v$  sera dit à l'état naturel, ou à l'état neutre. On voit que cet état a lieu quand  $M$  et  $\mu$  sont dans un certain rapport. Comme  $\mu$  est très-petit par rapport à  $M$ , on voit aussi que  $f_e$  est très-grand par rapport à  $f_a$ .

Considérons maintenant deux éléments de volume  $v, v'$  contenant les masses pondérables  $M, M'$ , et les quantités d'électricité  $\mu, \mu'$ . La résultante des actions exercées entre les deux éléments  $v, v'$ , proviendra de quatre actions et sera, en y comprenant la gravitation, dont nous représenterons par  $F$  le coefficient rapporté aux unités,

$$[2] \quad F \frac{MM'}{r^2} + f_a \frac{M\mu'}{r^2} + f_a \frac{M'\mu}{r^2} - f_e \frac{\mu\mu'}{r^2}.$$

Si  $\mu$  et  $\mu'$  sont les quantités d'électricité naturelles, on a  $\mu = M f_a : f_e$ ,  $\mu' = M' f_a : f_e$ , et, en portant ces valeurs dans [2], la résultante se réduit à

$$\frac{MM'}{r^2} \left( F + \frac{f_a^2}{f_e} \right), \text{ ou } \varphi \frac{MM'}{r^2}$$

en représentant par  $\varphi$  la quantité constante entre parenthèses.

Supposons maintenant que les quantités d'électricité soient

$$\mu + m = \frac{f_a M}{f_e} + m \quad \text{et} \quad \mu' + m' = \frac{f_a M'}{f_e} + m';$$

<sup>1</sup> *Théorie mécanique de la chaleur* (1869), p. 251.

il faudra, pour avoir l'effet résultant, remplacer, dans [2],  $\mu$  et  $\mu'$  par ces quantités, et il viendra, toutes réductions faites

$$\frac{MM'}{r^2} \left( F + \frac{fa^2}{fe} \right) - \frac{f_c mm'}{r^2}, \quad \text{ou} \quad \varphi \frac{MM'}{r^2} - \frac{f_c mm'}{r^2}.$$

Le premier terme représente la gravitation, et le second, l'effet électrique, devant lequel le premier est négligeable pour les faibles masses sur lesquelles on expérimente. On voit que si  $m$  et  $m'$  sont de même signe, c'est-à-dire si les deux éléments de volume sont tous les deux électrisés *en plus*, ou tous les deux *en moins*, l'action est répulsive, si  $m$  et  $m'$  sont de signes contraires, c'est-à-dire si l'un des éléments est électrisé *en plus* et l'autre *en moins*, le deuxième terme est positif, ce qui indique qu'il y a attraction.

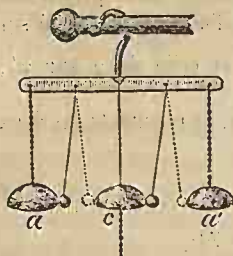


Fig. 1105.

**Carillon électrique.** — Deux timbres  $a$ ,  $c$  (fig. 1105) sont suspendus à une barre métallique; l'un,  $a$ , par une chaîne; l'autre,  $c$ , par un cordon de soie. Ce dernier est mis en communication avec le sol au moyen d'une chaîne. La barre est accrochée à une machine électrique, et entre les deux timbres est suspendue, par un fil de soie, une balle métallique. La balle est attirée par le timbre  $a$ , sur lequel s'est répandue l'électricité de la machine, puis est repoussée dès qu'il y a contact. De plus, ce pendule est alors attiré par le timbre  $c$ , qui est à l'état neutre, le touche et lui cède son électricité, qui va dans le sol. Le pendule est alors de nouveau attiré par le timbre  $a$ , et il vient frapper ainsi alternativement les deux timbres. En ajoutant un troisième timbre  $a'$ , et un second pendule, on a un double carillon.



Fig. 1106.

**Araignée de Franklin.** — Une petite figure d'araignée, en liège légèrement brûlé à la surface, pour le rendre conducteur, est suspendue par un fil de soie entre deux boules dont une seule est isolée et chargée d'électricité. L'araignée oscille entre les deux boules; mais comme le liège est peu conducteur, l'électricité s'y déplace lentement, et l'araignée reste posée pendant un instant sur chaque boule, avant de s'en écarter.

**Appareil à grêle de Volta.** — Une cloche de verre (fig. 1106), dans laquelle est suspendu un disque métallique qui communique avec une machine électrique, repose sur un plateau non isolé, sur lequel sont des balles de moelle de sureau. Ces balles sont attirées par le plateau supérieur, puis oscillent entre

les deux plateaux, prenant de l'électricité au disque supérieur, et rentrant à l'état neutre en retombant sur le plateau. — On fait aussi l'expérience en renversant sur ce dernier une cloche de verre (fig. 1107), dont on a électrisé l'intérieur en y faisant jaillir l'électricité par une pointe. Les balles oscillent



Fig. 1107.

jusqu'à ce qu'elles aient enlevé presque toute l'électricité adhérente à la cloche. On active les oscillations par induction, en approchant la main ou tout autre corps conducteur.

**Théâtre électrique.** — Si, entre les deux plateaux P, c (fig. 1108), on place de petits personnages en moelle de sureau, ils sautent en allant de l'un à l'autre, et l'on a le théâtre

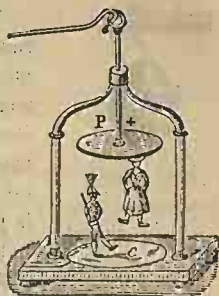


Fig. 1108.

électrique ou danse des pantins. Une aigrette de soie placée sur leur tête fait qu'ils se tiennent droits pendant leurs mouvements.

**Planisphère électrique.** — Un plateau de verre *vv* (fig. 1109) porte de petites colonnes isolantes sur lesquelles repose un anneau métallique *cc*. Sur le plateau est collée une bande circulaire d'étain communiquant par son centre avec le sol. Une boule légère en verre soufflé, *m*, s'appuie contre l'anneau *cc*, que l'on électrise. On la voit aussitôt rouler le long de l'anneau, imitant ainsi le double mouvement d'une planète autour du soleil. L'anneau *cc* cède de l'électricité aux points de la boule qui le touchent, et les repousse dans une direction qui ne lui est pas exactement normale (la boule n'étant pas une sphère parfaite); ces points sont attirés en même temps par la bande d'étain, qui communique avec le sol, et qui leur enlève leur électricité. D'autres points, pendant ce mouvement, ont touché l'anneau *cc*, et la rotation continue, la force centrifuge poussant continuellement la boule contre l'anneau.

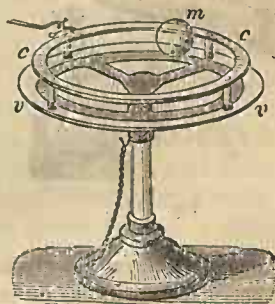


Fig. 1109.

**Arrosoir électrique.** — Un vase métallique (fig. 1110) porte des ajutages capillaires, par lesquels de l'eau s'échappe goutte à goutte. Mais si ce vase est électrisé, chaque ajutage donne un jet divergent de gouttelettes fines qui se repoussent mutuellement. Peltier, ayant enveloppé le jet d'un anneau métallique électrisé de la même manière que le vase, a vu les gouttelettes se rassembler en un filet unique. Ayant reçu le jet dans une sphère métallique isolée, il l'a vu se resserrer à mesure que la sphère s'électrisait aux dépens des gouttes reçues. D'après M. Carnoy, la dépense n'est pas modifiée,

ce qui montre que la cause du phénomène n'agit qu'après que le liquide a quitté l'orifice.

Aldini a vu les gouttes d'huile versées sur de l'eau électrisée se subdiviser en fines gouttelettes. — Il résulte aussi d'expériences de Bohadsch, que l'électricité active sensiblement l'évaporation des liquides.



Fig. 1140.

Nous citerons enfin l'expérience suivante, due à M. Charault. Un aréomètre, plongé dans un liquide qu'on électrise, monte de plusieurs centimètres, comme si le liquide avait augmenté de densité. Ce résultat provient de la répulsion électrique du liquide. Comme cette répulsion n'existe pas, de haut en bas, à l'endroit où la tige sort du liquide, l'instrument est soulevé par la répulsion qui s'exerce de bas en haut sur la portion de surface qu'intercepterait la tige prolongée vers le bas.

**1598. ÉLECTROSCOPES.** — Les *électroscopes* sont des instruments destinés à reconnaître la présence de l'électricité, par des attractions ou des répulsions. L'*aiguille électrique*, le *pendule électrique* de Gray sont donc des électroscopes. Les *électromètres* doivent, de plus, mesurer les quantités d'électricité. La première tentative d'un instrument destiné à donner une idée de la charge électrique, est due à Darcy et Le Roy. Nollet, en 1752, imagina de réunir deux fils de lin, dont l'écart augmentait avec la quantité d'électricité. Cavallo suspendit des balles de sureau à ces fils, et renferma le tout sous une cloche de verre (fig. 1141) traversée, à sa partie supérieure, par une tige métallique à bouton, B. Volta substitua aux fils à balles, *m*, deux brins de paille fine très-mobiles *p*, et Bennet des bandes, *o*, prises dans une feuille

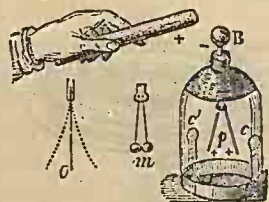


Fig. 1141.

d'or, et appliquées l'une sur l'autre. Quand le bouton B reçoit de l'électricité, les balles, pailles ou feuilles d'or s'écartent, et l'on mesure l'angle d'écart sur un arc divisé, gravé sur la cloche de verre. Deux bandes d'étain *ce'*, collées en dedans sur les parois de la cloche, déchargent les pailles quand elles s'écartent au point de toucher ces parois. Sans cette précaution, le verre recevrait de l'électricité, qu'il garderait, ce qui gênerait pour les expériences suivantes. De plus, ces

bandes d'étain réa gissant par induction, augmentent l'angle d'écart. La partie supérieure de la cloche est vernie à la gomme laque, et l'on met de la chaux vive dans l'intérieur pour y dessécher l'air.

Quand le corps électrisé à étudier est mauvais conducteur, on ne lui fait pas toucher le bouton B, mais on se contente de l'en approcher peu à peu. Il se fait alors une induction dans le bouton B; le fluide de même nom, que nous supposons *positif*, est repoussé dans les pailles, et le fluide négatif est attiré en B. On touche alors le bouton avec le doigt, l'électricité positive passe dans le sol, et

les pailles se rapprochent; ôtant le doigt et retirant ensuite le corps électrisé, on voit les pailles s'écarter sous l'influence du fluide négatif resté seul dans l'appareil.

L'électricité des pailles est de nom contraire à celle du corps qui a servi à les charger. Pour connaître la nature de cette électricité, on approche du bouton B, un corps chargé d'une électricité connue, *positive*, par exemple. Si les pailles divergent davantage, c'est qu'elles contiennent du fluide positif qui est repoussé; si, au contraire, elles se rapprochent, c'est qu'elles contiennent de l'électricité *négative*, qui est attirée dans le bouton.

On peut aussi opérer en chargeant l'électromètre d'une électricité connue, et reconnaître la présence et la nature de l'électricité d'un corps qu'on approche du bouton, par le mouvement des pailles. Il faut avoir soin de n'approcher le corps que lentement; car, dans le dernier cas, après que l'électricité des pailles a été attirée dans le bouton, il peut se faire une décomposition de fluide neutre par influence, et l'électricité repoussée fait écarter les pailles après qu'elles se sont rapprochées. Si l'on avançait trop vivement le corps, le premier mouvement des pailles pourrait passer inaperçu, et l'on serait trompé sur la nature de l'électricité qu'elles contiennent.

**1599. Des électroscopes comparables.** — De Saussure a fait beaucoup d'expériences pour savoir si l'angle d'écart, dans les électroscopes, est proportionnel aux quantités d'électricité qu'il contient. Il prit deux électromètres à balle de sureau, identiques dans toutes leurs parties; l'un d'eux étant chargé d'électricité, il en mit le bouton en communication avec le bouton de l'autre, au moyen d'un fil métallique isolé qui les touchait en deux points semblablement situés. Il est évident que l'électricité devait se partager également entre les deux instruments, et que le premier ne devait plus contenir que la moitié de l'électricité qu'il possédait d'abord. En ramenant le second instrument à l'état neutre, et le faisant communiquer de nouveau avec le premier, la charge de celui-ci était réduite au quart de ce qu'elle était primitivement. De Saussure reconnut ainsi que les écarts ne sont pas proportionnels aux charges. Volta ayant remplacé les fils à balles, par de fines pailles, trouva que l'électromètre, quand ces pailles ont plus de 27<sup>mm</sup> de longueur, est alors comparable à lui-même jusqu'à 30°, c'est-à-dire que l'écart est proportionnel à la charge, quand on ne dépasse pas cette limite.

Nous ferons connaître plus loin des *électromètres* précis, ainsi que d'autres *électroscopes*, quand nous aurons à parler des expériences dans lesquelles on en fait particulièrement usage.

**1600. EXPLICATION DE L'ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE.** — L'étincelle électrique consiste en un trait vif et instantané, qui jaillit à travers un milieu *mauvais conducteur*, ordinairement l'air, entre deux corps électrisés d'une manière contraire, ou entre un corps électrisé et un corps excitateur à l'état naturel dont on approche l'extrémité arrondie.

**I. D'après la théorie de Symmer,** l'étincelle est le résultat de la combinaison des deux électricités s'attirant assez fortement pour vaincre la résistance

que l'air (ou tout autre milieu, isolant) oppose à leur réunion. Cet air est violemment et mécaniquement traversé, d'où résulte une secousse brusque qui donne lieu au bruit qui accompagne l'étincelle. Pour mettre en évidence cette cause de l'étincelle, on approche l'un de l'autre deux corps isolés électrisés en sens contraire; l'étincelle jaillit, et les deux corps ont perdu des quantités équivalentes des électricités opposées qu'ils contenaient. La machine électrique de Nairne que nous décrirons bientôt (1606) est très-commode pour faire cette expérience.

On produit ordinairement l'étincelle, en approchant d'un conducteur électrisé, un corps excitateur à l'état naturel, et il est facile de voir qu'elle est encore due à la combinaison des deux fluides. Il y a ici deux cas à examiner : le corps excitateur communique avec le sol, ou bien il est isolé.

1<sup>o</sup> Si le corps excitateur communique avec le sol, son électricité neutre est décomposée par influence : le fluide de même nom que celui du conducteur électrisé est repoussé dans le sol, et le fluide de nom contraire est attiré. Quand la distance est assez petite, les deux fluides en présence se joignent à travers l'air, et produisent l'étincelle. Cette étincelle est d'autant plus longue que le conducteur électrisé est plus fortement chargé, et aussi, qu'il a plus d'étendue, son électricité se portant vers le point dont s'approche le corps excitateur, en obéissant à l'attraction du fluide contraire développé par influence sur ce dernier. Or, plus il y aura d'électricité sur le conducteur, d'après son étendue, plus la quantité qui s'accumulera ainsi entre les points en présence sera grande et agira fortement pour rompre l'obstacle que forme l'air.

2<sup>o</sup> Si le corps excitateur est isolé, l'étincelle ne part qu'à une faible distance, et le corps reste chargé d'électricité de même nom que celle du conducteur. En effet, la décomposition sur le corps excitateur est alors beaucoup plus faible que s'il communiquait avec le sol. En outre, le fluide repoussé ne s'en allant pas, empêche en partie le fluide de même nom du conducteur de se porter au point le plus rapproché; l'étincelle est donc courte, et d'autant plus que le corps excitateur est moins allongé (1591). Du reste, l'électricité repoussée se retrouvera sur ce dernier corps, en quantité précisément égale à celle qui aura disparu sur le conducteur, les deux fluides séparés par influence étant toujours en quantité équivalente.

Quand le corps électrisé est mauvais conducteur, l'étincelle est très-petite, le fluide de ce corps ne pouvant se transporter que des points très-voisins de l'endroit dont on approche le corps excitateur. Si ce dernier est mauvais conducteur, la décomposition par influence s'y produit à peine, et l'on n'obtient encore qu'une très-petite étincelle.

**II. Dans la théorie d'un seul fluide,** l'étincelle est le résultat du passage brusque à travers un milieu non conducteur, de l'électricité se portant, d'un corps électrisé *en plus*, sur un corps électrisé *en moins*. — Si l'un des corps, P, contient une quantité  $p$  d'électricité en plus de l'état naturel, et l'autre, M, une quantité  $m$  en moins, et si l'on a  $m = p$ , les deux corps pourront être ramenés à

l'état naturel par la décharge. Si l'on a  $p > m$  le corps P restera électrisé en plus, de la quantité  $p - m$ , et si l'on a  $m > p$ , le corps M restera au-dessous de l'état naturel, de  $m - p$ .

Si le corps excitateur est à l'état naturel et en communication avec le sol l'induction précédera l'étincelle. Si le conducteur contient de l'électricité en plus, elle se précipitera sur le corps excitateur à travers l'air, pour se rendre dans le sol; s'il est électrisé en moins, l'électricité du corps, moins repoussée du côté du conducteur que par le milieu ambiant dans toutes les autres directions, se précipitera sur ce conducteur. — Si le corps excitateur est isolé, il sera, après l'étincelle, chargé d'autant d'électricité en plus que le conducteur en aura perdu, s'il était électrisé positivement; et aura perdu autant de fluide qu'en aura gagné ce conducteur s'il était électrisé en moins.

**1601. Bruit de l'étincelle.** — La petite explosion qui accompagne l'étincelle, s'explique par la commotion subite qu'éprouve l'air pendant le conflit des deux fluides, commotion prouvée par diverses expériences. Kinnersley a imaginé un petit appareil destiné à montrer et à apprécier jusqu'à un certain point l'intensité de cette secousse.

**Thermomètre de Kinnersley.** — Un gros tube (fig. 1112), contenant de l'eau et complètement fermé, communique par le bas avec un tube ouvert plus étroit  $nm'$ . Quand on fait jaillir l'étincelle entre les deux boules qu'on voit dans le gros tube, le liquide est brusquement soulevé, de  $n$  en  $n'$  par la secousse produite dans l'air, et redescend aussitôt. Quand l'étincelle est forte, le liquide peut jaillir hors du tube  $nm'$ . Le nom de *thermomètre*, donné à cet instrument, vient de ce qu'il fait voir que le passage de l'étincelle produit de la chaleur; car le liquide ne retombe pas au premier moment exactement au niveau  $n$ ; ce qui montre que l'air a été dilaté par de la chaleur.



Fig. 1113.

**Mortier électrique.** — Quand on fait jaillir l'étincelle entre les deux tiges métalliques qui traversent les parois du petit mortier d'ivoire (fig. 1113), l'expansion de

l'air logé en  $o$  lance la balle placée au-dessus. En mettant en  $o$  une goutte d'éther, l'action est beaucoup plus énergique.

**Étincelle à travers les liquides et les solides.** — Deux tiges isolées  $a$  et  $b$  (fig. 1114) sont entourées de gomme laque excepté aux extrémités qui plongent dans un liquide mauvais conducteur. L'une est mise en communication avec le sol, l'autre avec une forte machine électrique. Au moment où part

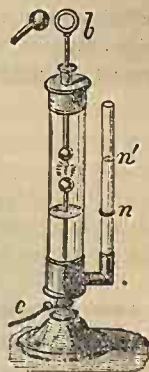


Fig. 1112.



Fig. 1114.

l'étincelle, le liquide est projeté au loin. Si les tiges pénètrent dans un tube rempli et complètement fermé, il peut être brisé. Le liquide éprouve donc, comme l'air, une violente commotion.

Quand l'étincelle jaillit à travers des corps solides isolants, ces corps sont percés d'un trou d'autant plus grand que l'étincelle est plus forte. Mais pour vaincre la résistance des solides, même en lames minces, il faut de très-fortes charges; nous verrons plus tard comment on peut se les procurer. Nous étudierons aussi les propriétés lumineuses de l'étincelle, et les circonstances qui peuvent en modifier l'aspect et les dimensions.

## § 2. — MACHINES ÉLECTRIQUES

### I. Machines à frottement.

**1602.** Une machine électrique consiste essentiellement en un corps frottant, un corps frotté et des conducteurs isolés sur lesquels s'accumule l'électricité. La première machine électrique, imaginée par Otto de Guericke, consistait en

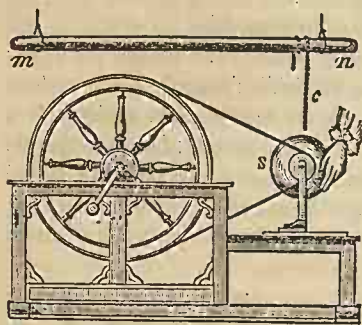


Fig. 1115.

un globe de soufre ou de résine auquel on imprimait un rapide mouvement de rotation, et sur lequel on appuyait les mains pour exercer le frottement. Boze, en 1741, suspendit par des cordons de soie, un cylindre de fer-blanc qui recueillait l'électricité, au moyen d'une chaîne descendant près de la surface de ce globe. Winkler, vers la même époque, remplaça les mains par des coussins de cuir. La figure 1115 représente la machine électrique telle qu'on l'employait encore du temps de Nollet. Plus tard on a remplacé les globes par des cylindres

de verre, puis par des plateaux, par des bandes de taffetas mises en mouvement sur deux rouleaux parallèles. On trouve dans la grande *Encyclopédie méthodique* la description de beaucoup de ces anciennes machines. En 1766, Ramsden a construit la machine à plateau perfectionnée que nous allons décrire et qui est la plus employée en France.

**1603. Machine de Ramsden.** — Cette machine donne de l'électricité positive. Un plateau circulaire de verre (fig. 1116), mobile autour d'un axe horizontal à manivelle *m*, est pressé entre deux paires de coussins soutenus par les deux montants verticaux qui supportent l'axe de rotation. Des conducteurs *ff'cc'*, ordinairement en laiton, sont soutenus par des colonnes isolantes.



Les parties *f*, *f'* courbées de manière à embrasser le bord du plateau, se nomment les *mâchoires*; elles sont garnies en dedans de pointes métalliques, dont les extrémités sont très-près des deux faces du plateau de verre.

Quand on fait tourner ce plateau, il s'électrise positivement par le frottement, et les coussins négativement. Ces derniers communiquant avec le sol sont ramenés à l'état neutre. Quand les parties électrisées du plateau arrivent entre les mâchoires *f*, *f'*, elles y décomposent par influence le fluide neutre; le fluide positif est repoussé dans les conducteurs *e*, *e'*, et le fluide négatif, attiré dans les pointes, s'écoule et se précipite sur le plateau de verre, où il se combine avec

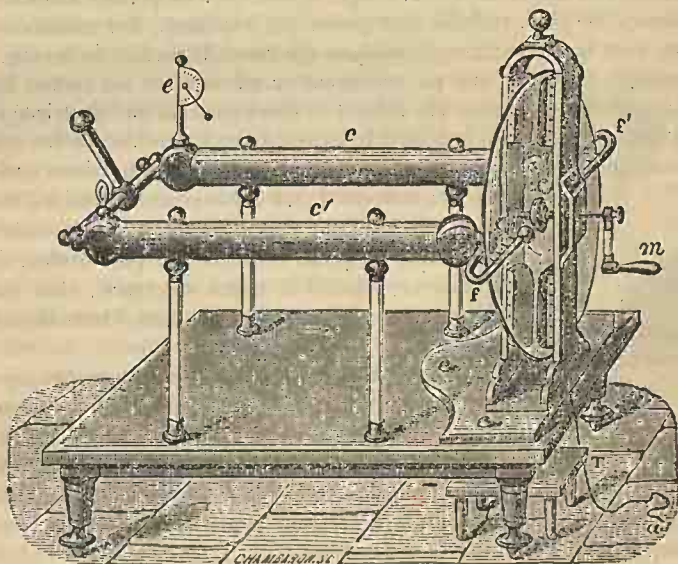


Fig. 1116.

l'électricité positive, pour former du fluide neutre. L'écoulement est visible dans l'obscurité, et chaque pointe est garnie d'une petite aigrette lumineuse. On emploie des pointes, parce qu'elles ont la propriété, comme nous le verrons, de laisser sortir facilement l'électricité. Quelquefois cependant on les remplace par des boutons arrondis; alors le fluide négatif passe sur le plateau, par intermittence, et sous forme d'étincelles. Le mouvement de rotation continuant, l'électricité positive du plateau se renouvelle à chaque instant.

Il n'y a de chargés d'électricité que les deux quarts du plateau dans lesquels le mouvement a lieu, des coussins à la mâchoire voisine. Dans ce trajet, une partie de l'électricité du verre est enlevée par l'air quand il est humide. On diminue la perte, en enveloppant chacun de ces deux quarts, d'une double lame

de taffetas en forme de secteur (fig. 1117) que l'on fixe aux coussins, ou aux montants qui les soutiennent.

**Limite de la charge.** — La quantité d'électricité accumulée sur les conducteurs de la machine n'augmente pas indéfiniment; elle est limitée comme la décomposition par influence elle-même (1591), et aussi par les pertes qui se font par l'air et par les colonnes isolantes. Ces pertes croissent avec la quantité de fluide accumulé, et finissent par être égales, à chaque instant, à l'électricité fournie par le frottement; on élèvera donc la limite de charge en tournant plus rapidement. Quand la machine fonctionne bien, l'électricité se perd aussi par les parties saillantes des conducteurs, malgré le soin que l'on prend d'arrondir tous les contours. De plus, ce fluide peut passer par explosion, des mâchoires aux coussins, sous forme de traits éblouissants qui rasant la surface de la roue.

L'humidité de l'air ne nuit pas seulement en enlevant par son contact l'électricité des conducteurs, mais elle ralentit le développement de l'électricité en se déposant sur le plateau. Il faut alors le sécher, en en approchant du feu ou en y appliquant des serviettes chaudes. M. Münch a remarqué qu'en faisant quelques traits avec un morceau de suif sur le plateau, on lui fait donner immédiatement beaucoup plus d'électricité. Si l'on enduit les colonnes isolantes, quand elles ne sont pas vernies, d'une couche imperceptible de la même substance, elles isolent parfaitement. Le suif agit en repoussant l'humidité, de la surface du verre.

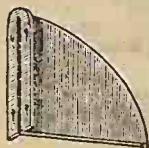


Fig. 1117.

**Électromètre à cadran ou de Henley.** — On juge de la charge de la machine, au moyen de l'électromètre de Henley, *e* (fig. 1116). Le pendule de cet instrument est repoussé par son support, et l'écart se mesure sur un cercle divisé. Le pendule peut s'élever au-dessus de l'horizontale, à cause de la répulsion du conducteur *e*.

La quantité d'électricité fournie dépend de la grandeur du plateau et des coussins, et aussi de l'état de leurs surfaces.

**Coussins.** — Les coussins, en peau rembourrée de crin, sont enduits de diverses substances, qui constituent en réalité le corps frottant. Citons d'abord l'or *musif* ou deutosulfure d'étain, matière friable que l'on fait adhérer au moyen d'un peu de suif. On emploie encore différents amalgames pulvérulents, parmi lesquels ceux de Singer (1 partie d'étain, 2 de zinc et 6 de mercure); de Cavallo, de Kienmayer (1 de zinc, 1 d'étain, 2 à 4 de mercure). Quand la machine s'affaiblit, on démonte les coussins et on les frotte l'un sur l'autre en les chauffant pour déplacer la matière adhérente. Le Roy disposait les coussins de manière qu'on pût les retourner de haut en bas, et ce changement suffisait pour ranimer la machine.

Van-Marum a imaginé une espèce de coussin qui a été remise en faveur, par M. Perrault-Steiner : la surface frottante est une feuille de fort taffetas enduite d'un amalgame de zinc, d'étain et d'un peu de bismuth. Ce taffetas, qui retient mieux l'amalgame que la peau, est appliqué sur une étoffe de coton croisée, enduite du

même amalgame, et tendue sur plusieurs couches de flanelle épaisse recouvrant une plaque de bois. Entre ces couches s'engage une même feuille d'étain, par laquelle la surface frottante est facilement débarrassée de son électricité négative, que des bandes métalliques appliquées sur les montants qui soutiennent la roue, conduisent dans le sol, par une chaîne *a* (fig. 1116).

**Plateau.** — Le verre du plateau doit être le moins hygrométrique possible. On recherche, pour le construire, les anciennes glaces, qui contiennent peu de potasse. Certains fabricants préfèrent le verre de bouteille, d'autres le cristal; on a employé encore du verre coloré en bleu par le cobalt. On augmente l'efficacité des plateaux en les faisant séjourner dans l'eau bouillante, qui agit probablement en enlevant de la potasse à la surface, par une action analogue à celle qui se produit sur les monnaies, qu'on plonge dans de l'eau acidulée, pour enlever l'alliage à la surface et leur donner plus d'éclat.

On a construit des machines ayant plusieurs plateaux assemblés sur le même axe ou sur des axes différents; on a fait aussi, dernièrement, des plateaux en gutta-percha ou caoutchouc durci; mais ils se détériorent assez rapidement, la machine se charge alors d'électricité négative.

**1604. Machine de Le Roy, ou de Winter.** — Quand une machine fonctionne bien, la charge est limitée par des décharges qui se font continuellement entre les coussins et les mâchoires, le long du plateau de verre. Cet inconvénient est très-atténué dans la machine (fig. 1118) imaginée par Le Roy au siècle dernier et construite aujourd'hui, avec quelques modifications, par Winter. Il n'y a qu'une paire de coussins, *c*, placés à une distance de 180° environ des mâchoires. Celles-ci sont formées d'un anneau, fendu en deux pour laisser passer le plateau, et dont chaque moitié est garnie, du côté de ce plateau, de nombreuses pointes. Les étincelles que donne cet appareil sont d'une longueur surprenante; mais elles sont minces et peu brillantes, parce que, si l'électricité accumulée en *s* a une forte tension, comme il n'y a qu'une paire de coussins, la quantité n'est que la moitié de ce qu'elle serait s'il y en avait deux. Du reste, les coussins sont isolés, de manière qu'on peut recueillir l'électricité négative qu'ils reçoivent.

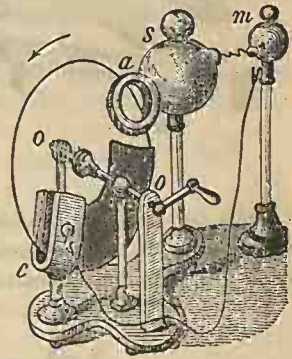


Fig. 1118.

**1605. Machine de Van-Marum.** — Cette machine donne à volonté l'une ou l'autre électricité. L'axe du plateau (fig. 1119) est soutenu par deux colonnes isolantes, et pressé, aux extrémités du diamètre horizontal, par des coussins fixés à des boules isolées *c*, *c'*. Deux arcs métalliques *oo'*, *aa'*, portés par des manchons que traverse l'axe, peuvent être placés dans un plan vertical ou dans un plan horizontal. Ces arcs sont terminés par un peigne dont les pointes sont

tournées vers le plateau. L'arc  $oo'$  est mis en communication avec le sol au moyen d'une chaîne. — Si l'arc  $aa'$  est vertical, et l'arc  $oo'$  en contact avec les coussins, la machine fonctionne comme celle de Ramsden, et la sphère B est électrisée *positivement*. Si, au contraire, on met l'arc  $aa'$  en contact avec les coussins, et l'arc  $oo'$  vertical, la sphère B recueille l'électricité négative des coussins, et l'électricité positive de l'arc  $oo'$  passe dans le sol. Si l'on supprimait la chaîne, on recueillerait à la fois les deux espèces d'électricités, l'une sur la boule B, l'autre sur le support de l'arc  $oo'$ .

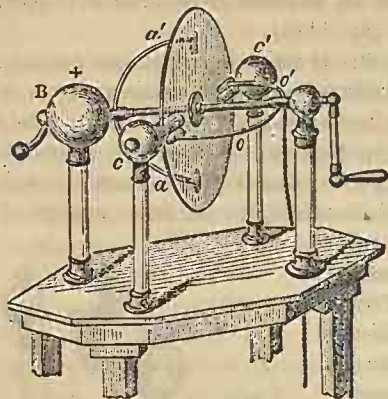


Fig. 1419.

cylindre de verre, que l'on fait tourner autour de son axe  $oo'$  (fig. 1420), qui est porté par des colonnes isolantes. De part et d'autre sont deux conducteurs isolés  $c$  et  $c'$ . L'un,  $c$ , porte un coussin F, pressé par un ressort contre le

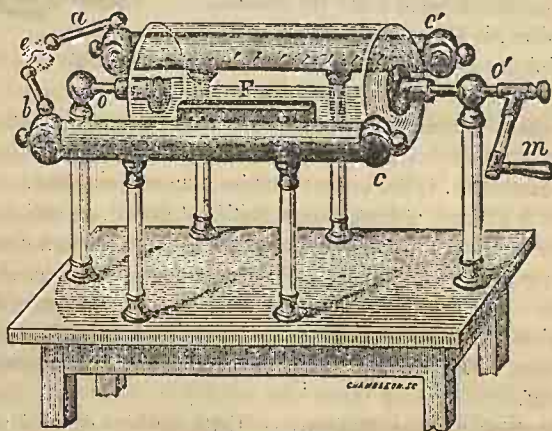


Fig. 1420.

cylindre; l'autre,  $c'$ , est garni de pointes dirigées vers ce cylindre. L'électricité négative du coussin est recueillie par le conducteur  $c$ , tandis que le conducteur  $c'$  se charge par influence de fluide positif. Si l'on rapproche convenablement

les deux conducteurs articulés *a* et *b*, des étincelles partent en *c*, produites par la réunion des deux électricités à travers l'air. — Quand on n'a besoin que d'une seule espèce d'électricité, on fait communiquer avec le sol, le conducteur sur lequel se porte l'autre, afin d'augmenter la décomposition produite par le frottement.

**1607. Pompe électrique.** — Ce petit appareil (fig. 1121), notablement perfectionné par M. Riess, est très-portatif. Le frottement est produit par un piston de liège garni de drap enduit d'amalgame, et mis en mouvement dans un tube de verre, par l'intermédiaire d'une tige dont la partie *v* est en verre. L'électricité négative du piston est recueillie par la virole *a*. L'électricité positive du verre décompose par influence le fluide neutre d'un petit disque *c* garni de pointes, fixé au piston dont il est isolé, et communiquant par le ressort *r*, avec la virole *b*, qui est électrisée en plus. On tient la pompe en *a* ou en *b*, suivant l'espèce d'électricité dont on veut faire usage.

**1608. Expériences diverses.** — La machine électrique est continuellement employée dans les expériences d'électricité. Parmi les effets les plus remarquables qu'elle produit il faut citer l'*étincelle électrique*, qu'on en tire quand on en approche un corps conducteur communiquant avec le sol. C'est d'après la longueur et la grosseur du trait lumineux, qu'on juge de la puissance et du bon état de la machine.

**Tabouret isolant.** — On peut tirer des étincelles du corps d'une personne communiquant avec le conducteur de la machine électrique, et montée sur un *tabouret isolant* (fig. 1116), qui n'est autre chose qu'une petite table à pieds isolants. Nollet et Brisson employaient des sabots desséchés au four et ayant séjourné dans de l'huile bouillante. La personne électrisée n'éprouve aucune sensation particulière, si ce n'est aux cheveux, qui se dressent par leur répulsion mutuelle. Cet effet augmente quand un observateur non isolé en approche la main, qui est électrisée par influence.

**Conducteurs secondaires.** — La quantité totale d'électricité que reçoivent les conducteurs dépend de l'étendue de leur surface. Quand on veut rassembler beaucoup d'électricité, on les fait communiquer avec d'autres conducteurs suspendus par des cordons de soie, et que l'on nomme *conducteurs secondaires*. L'expérience a prouvé que des cylindres longs et étroits recueillent plus d'électricité, à égalité de surface, que de gros cylindres. Volta employait de petits cylindres de 13<sup>mm</sup>,5 de diamètre, et de 2<sup>m</sup>,60 de longueur; deux de ces cylindres étant suspendus parallèlement par des cordons de soie, les autres étaient posés transversalement sur ceux-ci, sans se toucher.

Les plus fortes machines sont à plateau. Nous citerons celle du musée Teyler à Harlem, construite en 1785 par Cuthberston, dans le système de Van-Marum; elle porte deux plateaux parallèles, de 1<sup>m</sup>,62 de diamètre, et exige quatre hommes pour être mise en mouvement; elle donne des étincelles de plus de 5<sup>mm</sup>

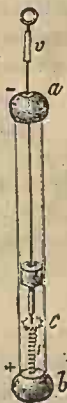


Fig. 1121.

de diamètre et de 650<sup>mm</sup> de longueur, produisant une véritable détonation. Un pendule électrique est dévié à une distance de plus de 12 mètres. Cette machine produit d'autres effets intenses, que nous aurons occasion de citer. La grande machine du Conservatoire des Arts-et-Métiers de Paris donne des résultats aussi remarquables; le diamètre du plateau est de 1<sup>m</sup>,85. Enfin, une machine plus grande encore est celle de l'Institut polytechnique de Londres; le plateau a 2<sup>m</sup>,27 de diamètre, et est mis en mouvement par une machine à vapeur. Les effets de ce puissant appareil sont cependant bien dépassés par ceux de la machine que nous allons décrire.

**1609. Machines hydro-électriques.** — L'électricité de ces sortes de machines est due au frottement exercé dans un ajutage de sortie, par le choc énergétique d'un jet de vapeur mêlé de gouttelettes d'eau.

Ce mode de production de l'électricité a été découvert par le hasard en 1840, à la houillère de Séghill près de Newcastle, par le mécanicien Patterson. Ayant plongé une de ses mains dans un jet de vapeur sortant d'une chaudière, pendant qu'il tenait de l'autre main le levier de la soupape, il ressentit des picotements

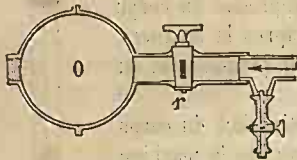


Fig. 1122.



Fig. 1123.



Fig. 1124.

particuliers, et vit le levier donner des étincelles. Ce phénomène attira l'attention des physiciens, et M. Armstrong l'étudia sur de nombreuses chaudières à vapeur<sup>1</sup>, et notamment sur une locomotive dont les roues étaient appuyées sur des blocs isolants. En montant sur un tabouret isolant et plongeant dans le jet de vapeur une tige de fer tenue à la main, il tiraît, des corps voisins, de nombreuses étincelles avec l'autre main. La tige de fer était électrisée positivement et la locomotive, négativement.

Il constata ensuite, au moyen d'une petite chaudière de bronze, que l'électricité prenait naissance dans la partie de l'ajutage rétrécie par le robinet. On avait attribué d'abord l'électricité dégagée à l'expansion de la vapeur à sa sortie, puis à sa séparation des matières dissoutes dans l'eau, lorsque M. Schafhäult reconnut à la suite d'expériences nombreuses que la vapeur doit être mouillée. Faraday prouva ensuite que l'électricité est produite par le frottement contre les parois de l'ajutage de sortie, des gouttelettes d'eau emportées par la vapeur<sup>2</sup>.

Dans les expériences de Faraday, la vapeur traversait un ballon métallique O

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 401.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 37, et X, p. 88.

(fig. 1122) portant l'ajutage, et précédé d'un petit tube à robinet destiné à recevoir l'eau condensée dans le conduit. Quand le ballon contenait de l'eau, il se dégagait beaucoup d'électricité; mais quand il était vide, et la vapeur bien sèche, il ne s'en produisait plus. La forme et la substance de l'ajutage ont une grande influence. Faraday a souvent employé un ajutage évasé (fig. 1123), auquel il présentait le sommet de cônes de différentes substances. Un petit tube vertical à robinet (fig. 1124), disposé près de l'orifice de certains ajutages, servait à introduire divers liquides dans le jet de vapeur. Quand on introduisait de l'eau distillée, il se dégagait beaucoup d'électricité; tandis que, avec de l'eau commune ou mêlée de quelque substance saline, alcaline ou acide, il ne s'en dégagait pas. Les résultats étaient les mêmes quand le liquide était mis d'avance dans le ballon, et ils s'expliquent par la plus grande conductibilité que les matières dissoutes communiquent à l'eau; les électricités séparées par le frottement se recombinant aussitôt. L'ammoniaque, qui en petite quantité n'augmente pas sensiblement la conductibilité de l'eau, n'empêche pas le dégagement de l'électricité.

L'électricité est généralement positive dans le jet de vapeur, et négative sur le corps solide qu'il rencontre, quel qu'il soit. Faraday a opéré sur plus de 30 substances : métaux, poils, substances textiles; corps isolants, minéraux. Ces corps, soutenus par un support isolant, étaient en communicatoin avec un électromètre à feuilles d'or.

Quand, au lieu d'eau, on introduit dans le jet de l'essence de térébenthine, de l'huile, des dissolutions de résines, le jet emporte le fluide négatif, et le corps frotté prend le fluide positif. Certaines substances ont donné des résultats douteux; mais elles adhéraient au corps frotté par la vapeur.

La quantité d'électricité produite est d'autant plus grande que la tension de la vapeur est plus considérable, et le choc plus énergique.

**1610. Machine Armstrong.** — C'est en partant de ces faits que M. Armstrong a construit la machine hydro-électrique (fig. 1125). Cette machine consiste en une chaudière tubulaire, isolée sur quatre colonnes de verre, et disposée intérieurement comme celle d'une locomotive. En *s* est la soupape de sûreté chargée à 5 ou 6 atmosphères; *n* est le tube à niveau, *p* la porte du foyer, et *C*

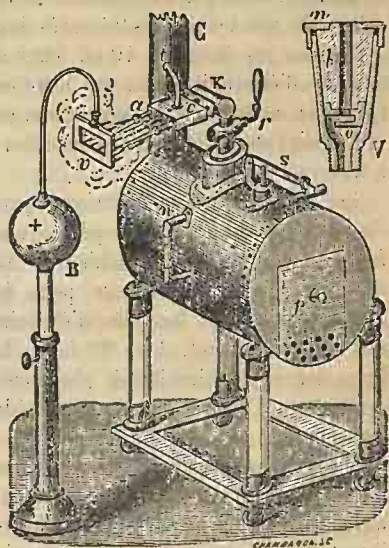


Fig. 1125.

la cheminée. Un robinet *r* permet de faire passer la vapeur dans un réservoir cylindrique *K*, d'où elle se rend par des tubes, aux ajutages *a*, dont on voit une coupe en *V*. Le jet de vapeur se brise contre la lame *o*, puis traverse un canal pratiqué dans une pièce de bois *b*, sur laquelle est vissée la virole *n*. Les tubes traversent une boîte *c*, dans laquelle ils sont mouillés par des mèches de coton plongeant dans de l'eau; ce qui produit une condensation de gouttelettes dans la vapeur avant son arrivée aux ajutages.

L'électricité *négative* dégagée par le frottement dans le canal de l'ajutage, des gouttelettes d'eau emportées par la vapeur, se porte sur la chaudière, et le fluide *positif*, emporté par la vapeur, est recueilli en *v* sur un cadre garni de pointes, isolé par une colonne de verre *B*, souvent portée par la chaudière même. On met les pointes très-près des ajutages quand on veut beaucoup d'électricité; on les éloigne à 10 ou 12<sup>cm</sup> quand on veut obtenir, non une grande quantité d'électricité, mais une forte *tension*, et par suite, de longues étincelles. Quand on ne veut qu'un seul fluide, on fait communiquer avec le sol le corps qui reçoit l'autre électricité, pour éviter la recombinaison d'une partie des fluides à travers le jet de vapeur.

Les machines hydro-électriques produisent des effets étonnants. Une petite chaudière de 30 à 40 litres peut donner, par seconde, 4 ou 5 étincelles de 10 à 15<sup>cm</sup> de longueur. La machine de l'Institut polytechnique de Londres, dont la chaudière, de 2<sup>m</sup> de longueur, porte 46 jets, donne des étincelles de 60<sup>cm</sup>, et fournit environ 45 fois plus d'électricité que la grande machine à plateau du même établissement. Avec 80 becs, la machine de la Faculté des sciences de Paris donne des étincelles de plusieurs décimètres de longueur et de plusieurs centimètres d'épaisseur, qui se succèdent avec tant de rapidité qu'on ne peut les compter.

Malgré leur grande puissance, les machines hydro-électriques ne peuvent être d'un usage courant. Les ajutages s'usent rapidement; la chaudière doit être lavée à chaud avec de l'eau contenant de la potasse, puis remplie d'eau *distillée*; enfin, il faut un temps assez long pour obtenir la pression de vapeur convenable.

## II. Machines d'induction.

**1611. Électrophore.** — Cet instrument souvent employé dans les laboratoires, pour enflammer les mélanges gazeux, a été inventé par Volta, d'après des expériences de Beccaria, Æpinus, et Wilke qui passe quelquefois pour l'inventeur.

L'*électrophore* consiste en un gâteau de résine coulé dans un moule de bois ou de métal *rr'* (*fig.* 1126), sur lequel on pose un plateau bon conducteur, *c*, muni d'un manche isolant. On commence par électriser *négativement*, en le frottant avec une peau de chat ou de lièvre, le gâteau de résine, sur lequel on pose ensuite le plateau *c*, qui ne le touche que par un très-petit nombre de points;



de sorte que les deux surfaces restent séparées par une couche d'air. Il se fait alors une induction dans le plateau *c*, dont la surface inférieure s'électrise positivement et la surface supérieure négativement, ce que l'on peut constater au moyen d'un électromètre de Henley. Si l'on enlève le plateau *c* par son manche isolant, tout y rentre à l'état neutre. Mais si, auparavant, on l'a touché un instant avec le doigt pour faire écouler le fluide négatif dans le sol, on le trouve électrisé positivement, et l'on peut en tirer une étincelle. On pourra répéter cette opération un grand nombre de fois, l'électricité de la résine ne passant pas sur le plateau *c*.

La théorie précédente de l'électrophore est incomplète, le moule jouant un rôle évident, comme l'a prouvé Ingenhousz ; car on n'a que des résultats très-faibles quand il est isolé, et l'on peut alors en tirer une étincelle après avoir touché le plateau supérieur, et une autre après avoir ensuite enlevé ce plateau <sup>1</sup>.

Voici comment on explique ces résultats : Quand on électrise *négativement* la résine sur sa face extérieure, la face opposée est électrisée *positivement*, par une action moléculaire que nous avons signalée plus haut (1594) et sur laquelle nous aurons à revenir (1645). Le fluide positif de cette dernière face électrise par influence le moule *cd* (fig. 1127), dont l'électricité positive est refoulée dans le sol, et la négative, attirée vers la résine où elle détruit le fluide positif qui s'y trouve, ou du moins contrebalance les effets qu'il pourrait exercer à distance. Si alors on applique le plateau métallique *ab*, la décomposition que tend à y produire l'électricité de la surface supérieure de la résine n'est plus contrariée par une action contraire du moule. De plus, l'électricité positive du plateau *ab*, réagissant sur le moule *cd*, plus que ne le fait son fluide négatif plus éloigné, y détermine une nouvelle décomposition ; et, si ce moule est isolé, on pourra en tirer une étincelle due à du fluide positif. Si alors on touche avec le doigt le plateau *ab*, son fluide négatif s'échappera, et son fluide positif restant seul, une nouvelle décomposition se fera en *cd* ; du fluide *positif* sera repoussé, et l'on pourra tirer une nouvelle étincelle. Si l'on eût touché en même temps les deux surfaces *ab*, *cd*, on eût éprouvé une petite commotion. Enfin, quand, après avoir ainsi fait disparaître le fluide positif libre de *cd*, on enlèvera le plateau *ab* électrisé positivement, le fluide négatif de *cd*, qui était retenu par l'attraction de l'électricité positive de *ab*, deviendra libre, et l'on pourra tirer de *cd* une nouvelle étincelle, due cette fois à

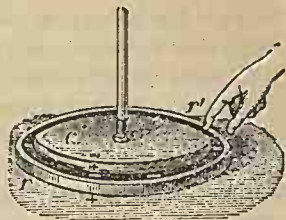


Fig. 1126.

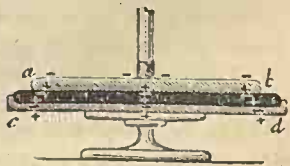


Fig. 1127.

<sup>1</sup> Journal de physique, de Lametherie, 1776 (1), p. 501.

du fluide négatif. — Si le moule *cd* était resté isolé et n'avait subi aucun contact à partir du moment où l'on a appliqué le plateau *ab*, on voit que ce dernier ne se serait que très-peu chargé; le fluide positif qui serait resté en *cd* contrebalançant en partie l'action du fluide négatif de la partie supérieure de la résine. Tous ces faits se vérifient avec un électrophore à moule métallique et dont la résine n'est pas trop épaisse.

M. Buff a vérifié la nature de l'électricité repoussée sur le moule isolé pendant les différentes phases de l'expérience, en formant un électrophore au moyen d'un plateau métallique mis à la place du bouton d'un électroscope à feuille d'or, et sur lequel il posait un disque de résine un peu plus grand, puis le plateau métallique à manche de verre.

Toutes les matières isolantes sont propres à former les électrophores. La résine étant cassante, on lui substitue souvent un mélange de colophane, 25<sup>sr</sup>; térébenthine de Venise, 25 à 60<sup>sr</sup>; gomme laque, 500<sup>sr</sup>; suif, 15<sup>sr</sup>.

Comme les matières résineuses sont hygrométriques, il faut chauffer le gâteau avant de le frotter, ce qui produit de nombreuses fissures. La gutta-percha, l'ébonite, ne présentent pas cet inconvénient. Toutes ces matières s'électrisent négativement; mais on peut les électriser positivement en les frottant avec du coton-poudre. — On a fait des électrophores de plus de 2<sup>m</sup> de diamètre, donnant d'énormes étincelles.

**1612. Duplicateurs d'électricité.** — Le gâteau de résine de l'électrophore perd peu à peu son électricité, soit par le contact de l'air soit par celui du plateau métallique, qui le touche toujours en plusieurs points. Volta a imaginé de lui rendre son électricité, sans le frotter de nouveau, au moyen d'un second gâteau B. Le plateau métallique chargé par le premier, A, étant appuyé sur B, lui communique son électricité positive. En répétant plusieurs fois cette opération, B est assez fortement électrisé positivement, et l'on se sert de son électricité pour électriser à son tour négativement le plateau A; puis on revient à B, et ainsi de suite. — Lichtenberg employait un seul gâteau de résine de forme ovale et portait le plateau circulaire successivement sur chaque moitié.

On peut ainsi, au moyen d'une petite quantité d'électricité, en produire des quantités croissantes. On a imaginé différentes machines réalisant régulièrement les déplacements et les communications nécessaires, et divers physiciens, Bennet, Nicholson, Read, en ont construit de très-ingénieuses, et qui donnaient des quantités indéfinies d'électricité au moyen d'une première charge très-faible. Remarquons qu'il n'y a pas ici création absolue d'électricité, celle-ci ne prenant naissance, comme dans le frottement, qu'à la suite d'une dépense de travail mécanique employée à exécuter les déplacements.

Ces appareils qui ont eu autrefois une grande vogue étaient à peu près oubliés, ou du moins abandonnés, quand M. Tœpler et M. Holtz<sup>1</sup>, à peu près en même

<sup>1</sup> *Annales de Pogg.*, t. CXXV et CXXVI, et *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 313 et 201.

temps, vers 1865, ont publié des machines par induction construites dans des conditions originales qui en font des appareils nouveaux. Nous allons d'abord décrire la machine de M. Holtz, comme étant la plus répandue et celle qui donne les résultats les plus remarquables.

**1613. Machine de Holtz.** — Cette machine se compose d'un plateau de verre mince et verni *vv* (fig. 1128), affermi sur un arbre horizontal *o*, porté par des barres isolantes *BB'* et par quatre colonnes de verre *t, t, ...*, et auquel on peut imprimer un mouvement rapide de rotation, au moyen d'un système de poulies et de cordes sans fin, *rr'*. Deux peignes *c, c'* soutenus par la barre isolante *B*, et communiquant avec les boules *e, e'*, présentent leurs pointes au disque de verre. Derrière ce disque se trouve un plateau fixe *ff*, un peu plus grand, soutenu par quatre écrous à gorge *a, a, ...*, dont les vis enveloppent des tiges de verre *n, n, ...*, et au moyen desquels on peut rapprocher le plateau fixe très-près du disque tournant. Le plateau fixe, vu à part en *FA*, porte deux profondes échancrures opposées, ou deux fenêtres, dont un des bords est garni d'une bande de papier verni, ou *armure*, munie d'une *dent* intérieure terminée en pointe, *p*.

Après avoir rapproché jusqu'au contact les boules *e, e'*, on fait tourner

le plateau *v, v* dans le sens opposé à la dent de chaque armure, et l'on électrise l'une de ces armures, en la touchant un instant avec une lame d'ébonite que l'on a frottée. On entend alors un sifflement particulier, on éprouve une plus grande résistance à tourner, et l'on voit un courant d'étincelles violacées jaillir entre les boules *e, e'*, que l'on écarte peu à peu. Mais si on les écarte trop, tous ces effets cessent, et l'on dit que la machine est *éteinte*. Il en est de même si l'on cesse de tourner, et il faut *amorcer* de nouveau la machine, en électrisant une des armures.

Pour expliquer le jeu de cet appareil, représentons les disques *D* et *F* et les peignes *c, c'* (fig. 1129) très-écartés les uns des autres afin de pouvoir distinguer leurs différentes parties, et supposons que, le disque *D* étant en mouvement, on électrise l'armure *a* négativement, les deux boules *B, B'* étant très-rapprochées l'une de l'autre. L'électricité de *a* décomposera par influence, à travers le disque *D*, le fluide neutre du peigne *c*, repoussera en *B* le fluide négatif et attirera le fluide positif dans les pointes, par lesquelles il s'écoulera sur le disque tournant *D*. Une région *n* de ce disque sera donc électrisée positivement.

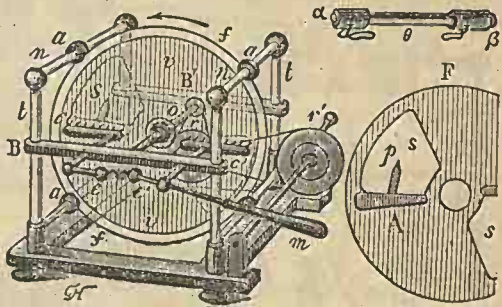


Fig. 1128.

Quand cette région  $n$  arrivera en  $n'$ , assez près de la dent  $p'$ , il y aura induction de  $n'$  sur l'armure  $a'$ , qui gardera le fluide positif repoussé, et versera par la dent  $p'$ , son fluide négatif en  $n'$  et y rétablira l'état neutre. Alors l'électricité positive de  $a'$  décomposera, à travers le disque  $D$ , le fluide neutre du peigne  $c'$ , repoussera le fluide positif en  $B'$ , et attirera dans les pointes le fluide négatif, qui s'écoulera sur le disque  $D$ , dont une région sera électrisée négativement. Quand cette région arrivera en  $n''$ , près de la pointe  $p$ , l'armure  $a$  subira l'induction de  $n''$ , le fluide positif ramènera  $n''$  à l'état neutre, et le fluide négatif repoussé en  $a$  se joindra à celui qui s'y trouvait déjà, et décomposera à travers le disque  $D$  le fluide neutre du peigne  $c, \dots$ , et ainsi de suite. On voit que la moitié antérieure du disque  $D$ , sera électrisée *négativement* et la moitié postérieure *positivement*, que les électricités des armures iront en augmentant à chaque tour, et que les électricités positive sur  $cB$  et négative sur  $c'B'$  seront sans cesse

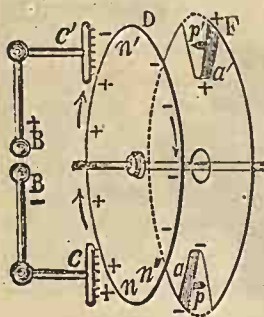


Fig. 1429.

renouvelées, à la condition qu'on déchargera continuellement ces conducteurs; autrement la limite de la décomposition par influence serait bientôt atteinte, le disque  $D$  ne recevrait plus d'électricité, et les armures ne se rechargeant plus, la machine s'éteindrait. Il en serait évidemment de même, si l'on cessait de tourner pendant quelques instants<sup>1</sup>.

**Remarques.** — Les armures doivent être faites d'une matière peu conductrice, et ne présenter qu'une seule dent peu aiguë, afin que l'électricité qu'elles doivent conserver n'en sorte qu'avec difficulté. Leur largeur n'a que peu d'influence, la partie qui se trouve en face des peignes étant à peu près seule en jeu.

Le plateau fixe ne paraît pas avoir d'autre rôle que de supporter les armures. Il peut cependant agir, en préservant une des faces du disque tournant de la déperdition par le contact de l'air qu'il empêche de se renouveler facilement. La grandeur des fenêtres ou échancrures paraît avoir peu d'influence, et M. Poggendorff a reconnu qu'on peut les supprimer. Il perce seulement le plateau d'un trou de 2<sup>cm</sup> au plus de diamètre, le ferme avec une rondelle de liège et colle la base de l'armure à l'extérieur, et la dent, du côté du disque tournant. Cette disposition simplifie beaucoup la construction de l'appareil.

L'humidité est très-nuisible au fonctionnement de la machine, et il est presque impossible de l'amorcer quand l'air contient beaucoup de vapeur d'eau, en quantité absolue. Si on la place sur une table entourée d'une draperie pendante, et percée

<sup>1</sup> M. Riess fait intervenir une induction produite dans le disque  $D$  par l'électricité des armures; mais cette induction ne pourrait avoir lieu que lentement, le disque étant mauvais conducteur, et la rapidité du mouvement ne lui donnerait pas le temps de se produire.

d'une large ouverture au-dessous de laquelle est un fourneau rempli de charbons ardents, la machine fonctionne bien par les temps les plus humides.

**1614. Manière d'obtenir des étincelles explosives.** — La décharge entre les conducteurs à peigne formé une gerbe à peu près continue de lumière violacée accompagnée d'un bruissement aigu. Pour obtenir des étincelles vives et séparées, on accroche aux conducteurs une petite *bouteille de Leyde*,  $\alpha\beta$  (fig. 1128), dont l'intérieur communique avec un des conducteurs, et la partie extérieure avec l'autre; ou mieux deux bouteilles de Leyde B, B' (fig. 1130) dont les parties extérieures communiquent entre elles, et les parties intérieures avec l'un et l'autre conducteur. Les électricités s'accablent et se condensent dans ce système,

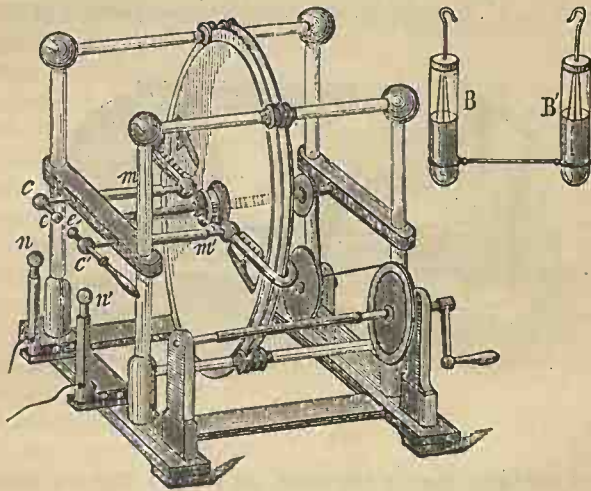


Fig. 1130. —  $\frac{1}{16}$

par un jeu d'induction que nous expliquerons plus tard (1715), jusqu'au moment où elles peuvent franchir la distance entre les deux boules  $e, e'$ . Il se produit alors une étincelle très-brillante, produisant un bruit éclatant, et qui se renouvelle d'autant plus fréquemment, que la distance des boules est plus petite et que le disque mobile tourne plus rapidement. On a reconnu que leur nombre, en un temps donné, est proportionnel à la vitesse de rotation; d'où il résulte que la quantité d'électricité produite est aussi proportionnelle à cette vitesse.

Quand les boules de décharge sont trop éloignées, la machine cesse de fonctionner, mais il se produit souvent un phénomène curieux. Les bouteilles, qui se sont d'abord chargées, se déchargent lentement par les peignes, et amorcent de nouveau la machine, mais en sens contraire. Elles se rechargent

ensuite d'électricités opposées, puis une nouvelle inversion se produit.

**Conducteur diamétral.** — Pour empêcher ces effets, M. Holtz étend les armures de papier sur près d'un quart de la surface du plateau fixe, et dispose à 60° environ des peignes, un bras conducteur terminé par deux nouveaux peignes et soutenu par un anneau isolant que traverse l'arbre tournant. Quand les boules de décharge sont trop écartées, ces deux nouveaux peignes, qui communiquent l'un avec l'autre, étant en présence des armures très-étendues, entretiennent l'activité de la machine, comme le feraient les peignes ordinaires, si les boules se touchaient.

**1615. Machines doubles.** — MM. Poggendorff et Ruhmkorff ont imaginé les machines doubles, formées de deux plateaux fixes à fenêtre et armures, placés entre deux disques tournants affermis sur le même arbre (fig. 1130). Deux mâchoires  $m, m'$ , enveloppent les bords des quatre plateaux, et présentent

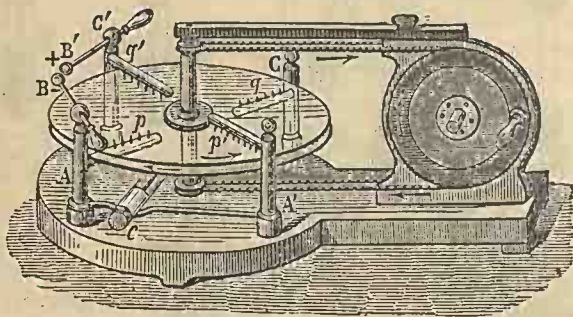


Fig. 1131.

leurs pointes aux deux disques tournants, en face des armures des plateaux fixes, entre lesquelles on introduit, pour amorcer, une lame d'ébonite fortement électrisée. La quantité d'électricité fournie par cette machine est double de celle que donne une machine simple de même diamètre pour la même distance des boules de décharge. De plus, ces boules peuvent être beaucoup plus écartées, par suite d'une réaction mutuelle qui s'exerce entre les deux parties opposées de l'appareil, qui peut rester amorcé pendant deux heures après qu'on en a arrêté le mouvement.

Les colonnes  $n, n'$ , qui peuvent s'allonger jusqu'à toucher les conducteurs en  $c, c'$ , servent à prendre les électricités pour les diriger dans certains appareils, ou à établir un courant dans un fil métallique allant de l'une à l'autre. On voit à part, en  $BB'$ , les bouteilles de Leyde, que l'on suspend par leurs crochets, aux conducteurs, en  $m, m'$ .

**1616. Machine à deux rotations.** — Cet appareil, appelé quelquefois machine de Holtz de seconde espèce (fig. 1131), porte deux disques horizontaux

tournant l'un près de l'autre *en sens contraire*, sans plateau fixes ni armures. Le mouvement leur est imprimé par une même corde sans fin passant sur deux roues parallèles, et sur des poulies fixées aux arbres des deux disques. Quatre peignes portés par les colonnes A, A', C, C', sont disposés en croix, deux  $q'$ ,  $p'$  au-dessus du disque supérieur, suivant un même diamètre; les deux autres  $p$ ,  $q$  au-dessous du disque inférieur. Ces peignes sont réunis deux à deux, alternativement A avec A', et C avec C', de manière à former deux systèmes de conducteurs, pouvant être mis en communication par des tiges à boules de décharge B, B', portées par les colonnes C' et A.

Pour faire fonctionner cet appareil, après avoir mis les boules de décharge B, B' en contact (fig. 1132), on fait tourner les plateaux, et l'on approche une plaque d'ébonite électrisée, E, en face du peigne  $p$ . Dans la figure, les deux plateaux S et P sont représentés très-écartés pour qu'on puisse en distinguer les différentes parties. L'électricité négative de E induit le peigne  $p$ , repousse son fluide négatif en AB, et attire dans les pointes son fluide positif, qui est versé sur le plateau P dont la moitié  $pnq$  est bientôt électrisée positivement. Dès lors, la machine se suffit à elle-même, et l'on peut enlever la plaque E.

1° La partie positive  $pnq$  induit le peigne opposé  $q'$ , repousse en C'B' son fluide positif, et le fluide négatif est versé sur le plateau S, dont la moitié antérieure  $q'm'p'$  est bientôt électrisée négativement, et réagit sur le peigne  $p$ , qui verse de nouveau fluide positif en  $pm$ , pendant que le fluide négatif est repoussé en AB.

2° Le fluide positif de la partie  $nq$  du plateau P, agissant sur le peigne  $q$ , en repousse le fluide positif en C'C'B', et attire le fluide négatif, qui amène à l'état neutre la partie  $qmp$  de ce plateau. — De même, le fluide négatif de la partie antérieure  $q'm'p'$  du plateau S, en passant sous le peigne  $p'$ , est ramené à l'état neutre par le fluide positif versé par les pointes, pendant que son fluide négatif est repoussé en A'aB.

On voit que les peignes  $p'$ ,  $q$ , que M. Riess appelle *aspirateurs*, ramènent les plateaux à l'état neutre, tandis que les deux autres  $q'$ ,  $p$ , qu'il nomme *conducteurs*, versent de l'électricité sur ces plateaux. — Les électricités repoussées par les quatre peignes s'accroissent dans les boules B, B', et si on les éloigne, on obtient une gerbe d'étincelles, que l'on peut transformer en étincelles éclatantes et séparées, en faisant communiquer les conducteurs C' C et A' par l'intermédiaire de bouteilles de Leyde.

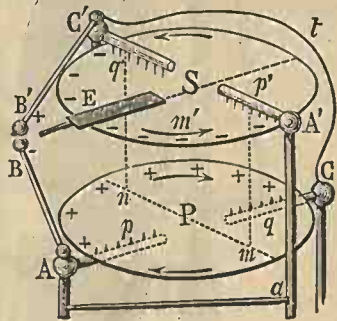


Fig. 1132.

La machine à double rotation donne des résultats remarquables ; quand l'air est bien sec, la charge n'est guère limitée que par le passage des étincelles d'un peigne à l'autre.

Dans tout ce qui précède, nous avons négligé l'induction qui peut se faire dans les plateaux, et qui ne peut être que très-faible, à cause de la rapidité du mouvement.

**1617. Machines de M. Bertsch et de M. Carré.** — La première machine de M. Holtz a provoqué de nombreuses recherches, et suscité l'invention de

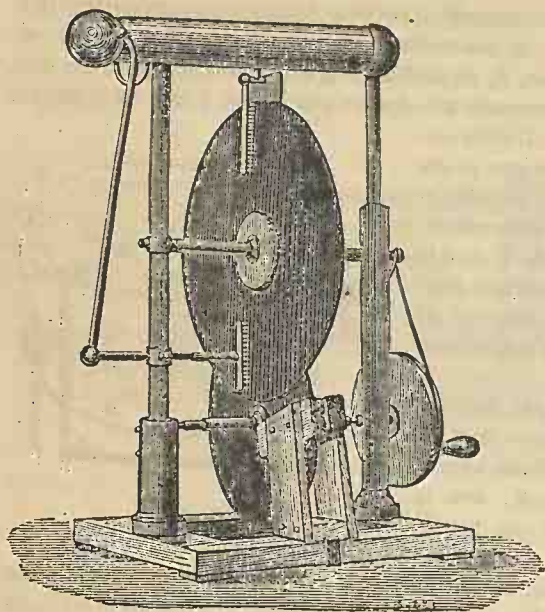


Fig. 1133.

plusieurs autres machines par induction, n'exigeant, comme elle, qu'une faible dépense de force. Cette dépense est, du reste, toujours notablement plus grande quand l'appareil est amorcé que lorsqu'il ne donne pas d'électricité ; nouvelle application du principe de la transformation du travail (II, 1333). Parmi ces machines nous citerons celle de M. Bertsch et celle de M. E. Carré.

Dans ces deux appareils, on voit (*fig. 1133*), un mince et large disque en gutta-percha ou en

ébonite, qui tourne rapidement en rasant les pointes de deux peignes portés par une colonne isolante. Un des peignes communique avec un gros cylindre isolé placé tout en haut ; l'autre, avec le sol, ou avec un bras à boule de décharge qu'on peut rapprocher du conducteur supérieur, quand on veut obtenir des étincelles.

Pour produire de l'électricité, on approche du disque tournant, en face du peigne inférieur et du côté opposé, une lame électrisée, par exemple négativement, qu'on laisse en place. Il se fait, à travers le disque, une décomposition par influence du fluide neutre du peigne inférieur ; l'électricité négative est repoussée, et la positive s'écoule par les pointes et charge positivement une portion du disque. Cette portion, transportée en face du peigne supérieur,



décompose par influence le fluide neutre de ce dernier et attire son fluide négatif, qui ramène à l'état neutre la portion du disque tournant, qui revenue en bas, s'électrise de nouveau positivement sous l'action de la lame négative,..... et ainsi de suite. On voit que l'appareil se comporte comme un électrophore perpétuel. — Nous avons négligé l'induction qui peut se faire dans le disque tournant, mais il est facile de voir que son action ne changerait rien à la nature des électricités que reçoivent les deux peignes.

Dans la *machine de Bertsch*, la lame électrisée est une plaque d'ébonite en forme de secteur à angle arrondi qu'on électrise fortement, par exemple en passant la main bien sèche à sa surface, et qu'on fait tenir debout contre le disque tournant. En mettant plusieurs secteurs appliqués les uns sur les autres, on augmente beaucoup les effets de la machine. La présence des secteurs devant être permanente, et leur électricité se perdant peu à peu, il faut de temps en temps les frotter de nouveau.

Dans la machine de M. E. Carré (*fig. 1133*), ces secteurs sont remplacés par une petite roue de verre ou d'ébonite, mise en mouvement par l'arbre de la roue à gorge qui fait tourner le grand disque beaucoup plus rapidement au moyen d'une corde sans fin. Cette roue s'électrise en passant entre deux coussins disposés comme ceux de la machine de Ramsden, de manière que l'appareil fonctionne sûrement et d'une manière continue.

Les deux appareils que nous venons de décrire produisent des effets comparables à ceux de la machine de Holtz simple. Quand on fait communiquer les deux peignes par l'intermédiaire de bouteilles de Leyde, on obtient des étincelles vives et bruyantes.

Nous aurons à citer plus tard des effets des diverses machines électriques et nous décrirons des instruments au moyen desquels on peut comparer les quantités d'électricité qu'elles fournissent.

### § 3. — LOIS DES FORCES ÉLECTRIQUES. DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES CORPS CONDUCTEURS

#### I. Lois des attractions et répulsions électriques.

**1618. Balance électrique.** — Les lois suivant lesquelles varient les intensités des forces électriques, quand les distances et les charges varient, avaient été l'objet des recherches opiniâtres et infructueuses de Hauksbée, Taylor, Dufay, Muschenbroeck, lorsque Coulomb est parvenu à les découvrir au moyen de sa balance de torsion.

La *balance électrique* est disposée à peu près comme la balance magnétique (1509). Une cage de verre, cylindrique ou carrée (*fig. 1134*) est fermée par un couvercle, qui porte un tube *t*, à la partie supérieure duquel est suspendu

un fil métallique. Ce fil soutient une aiguille horizontale de gomme laque *ar*, à l'extrémité de laquelle est fixé un petit disque vertical de clinquant, *r*. On peut tordre le fil par son extrémité supérieure, soit en faisant tourner un disque dont les divisions passent devant un vernier fixe *c*; soit au moyen d'un bouton central auquel est attaché le fil, et qui peut tourner indépendamment du micromètre. Une division en degrés, tracée autour de la cage cylindrique, à la hauteur de l'aiguille *ar*, sert à en mesurer les déplacements angulaires. Le couvercle porte une ouverture par laquelle on introduit une boule électrisée *b*, soutenue par une tige de gomme laque. L'air intérieur est desséché par de la chaux vive ou du chlorure de calcium. Les lois trouvées par Coulomb, au moyen de cet appareil, sont les suivantes :

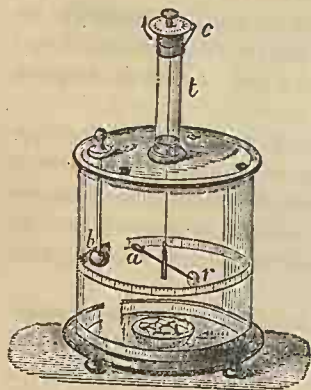


Fig. 1134.

1<sup>o</sup> Les attractions et les répulsions électriques varient en raison inverse des carrés des distances;

2<sup>o</sup> Elles sont en raison composée des quantités ou des masses d'électricité libre que contiennent les corps en présence.

Si donc *f* représente l'attraction ou la répulsion électrique de deux corps, à l'unité de distance, pour des charges égales à l'unité, l'action à la distance *d* pour des charges *e* et *e'*, sera  $\frac{fee'}{d^2}$ . Ces lois sont celles de la

gravitation. Épinus, guidé par l'analogie, avait pressenti la seconde, et il résulte d'une

citation puisée par M. Burckhardt dans le quatrième volume des *Acta Helvetica*, que D. Bernoulli avait connu la première.

Pour démontrer la première loi, on fait en sorte que le disque *r* soit en contact avec la boule très-petite *b* en l'absence de toute torsion du fil de suspension. On charge ensuite cette boule d'électricité, on la remet en place, et le disque *r* s'en écarte dès qu'il en a été touché. Quand l'aiguille s'arrête, c'est que la répulsion électrique *e*, à la distance *br*, fait équilibre à la force de torsion. Cette force est mesurée par l'angle de torsion, qui est égal à l'angle  $\alpha$  que fait l'aiguille avec sa position primitive; on a donc  $e = t\alpha$ , *t* étant la force de torsion pour 1<sup>o</sup>.

On fait ensuite tourner la virole supérieure d'une quantité  $\beta$ , de manière à amener le disque *r* à une distance de la boule *b*, mesurée par un arc  $\alpha'$ ; moindre que  $\alpha$ . L'angle de torsion est alors égal à  $\beta + \alpha'$ , et la répulsion électrique, à la distance  $\alpha'$ , est  $e' = t(\beta + \alpha')$ . Or l'expérience montre que l'on a toujours, quand les écarts sont faibles,  $e : e' = \alpha'^2 : \alpha^2$ ; ce qui est l'expression de la première loi. Par exemple, Coulomb trouva, dans une série d'expériences, pour des écarts de 36<sup>o</sup>, 18<sup>o</sup>, 8<sup>o</sup>  $\frac{1}{2}$ , les angles de torsion 36<sup>o</sup>, 144<sup>o</sup>, 575<sup>o</sup>  $\frac{1}{2}$ ; sensiblement entre eux comme 1, 4, 16.

Pour vérifier la seconde loi, Coulomb remplaçait le disque  $r$  par une petite balle de moelle de sureau. Après avoir observé un petit écart, et l'angle de torsion correspondant, il enlevait à la boule  $b$  la moitié de son électricité, en lui faisant toucher une boule identique isolée. Il trouva alors que l'aiguille de gomme laque, dont il ne modifiait pas la charge, s'écartait moins de la boule  $b$ . Il la ramenait à la première distance, en tournant le micromètre, et l'angle de torsion n'était plus que la moitié de ce qu'il était d'abord. En enlevant encore la moitié de l'électricité restant sur la boule  $b$ , il trouvait une torsion quatre fois plus petite pour la même distance, et ainsi de suite. Coulomb a remplacé la boule  $b$  par des disques, des anneaux, etc., et est toujours arrivé aux mêmes résultats. — En faisant varier de même la charge de l'aiguille mobile, il reconnut que les forces sont aussi proportionnelles à cette charge.

**1619. Cas des attractions.** — Quand on veut observer les lois des attractions, il faut commencer par écarter l'aiguille de gomme laque, de la boule  $b$ , sans qu'il y ait de torsion dans le fil de suspension. On donne ensuite au disque de clinquant une certaine électricité, et à la boule  $b$  une électricité contraire; l'aiguille se rapproche et la force de torsion développée peut finir par contrebalancer cette attraction. On augmente ensuite la distance, en faisant tourner le micromètre supérieur de la balance, et l'on compare les angles de torsion aux distances.

Il faut observer ici que l'attraction et la force de torsion augmentant suivant des lois différentes quand la distance diminue, lorsque la charge sera assez forte pour que la distance devienne petite, l'attraction pourra aller ensuite en augmentant plus rapidement que la force de torsion, et il n'y aura pas de position d'équilibre avant le contact. C'est ce que l'expérience montre, ainsi que le calcul mathématique en s'appuyant sur la loi des carrés des distances supposée démontrée. En effet, soit  $c$  l'angle d'écart qui sert de point de départ et qui correspond à une torsion nulle, et  $\alpha$  cet angle quand l'attraction agit. L'angle de torsion sera  $c - \alpha$  et la force de torsion  $t(c - \alpha)$ . Si nous représentons par  $f$  la force attractive à l'unité de distance, elle sera  $f : \alpha^2$  à la distance  $\alpha$ ; et pour qu'il y ait équilibre pour toutes les charges, c'est-à-dire pour toutes les valeurs de  $f$ , il faudra qu'il y ait toujours une valeur de  $\alpha$  satisfaisant à l'égalité  $\frac{f}{\alpha^2} = t(c - \alpha)$ , ou  $f = t(c - \alpha) \alpha^2$ ; ce qui suppose que le second membre pourra prendre toutes les valeurs possibles quand on fera varier  $\alpha$  depuis  $c$  jusqu'à 0. Or cela n'a pas lieu; car le second membre a un maximum correspondant à  $\alpha = \frac{2}{3}c$ , valeur pour laquelle on a  $f = \frac{4}{27}tc^3$ . Si donc  $f$  est plus grand que cette quantité, l'attraction l'emportera sur la force de torsion, et les balles s'avanceront jusqu'au contact. — Pour éviter cette rencontre des deux balles, par cette cause ou par l'effet des oscillations de l'aiguille, on tend dans la balance un fil de soie qui empêche l'aiguille de trop s'approcher de la boule  $b$ .

Dans l'appareil dont s'est servi Coulomb, le fil de suspension était d'argent, et avait 76<sup>cm</sup> de longueur. La réaction de torsion était tellement faible qu'on

peut évaluer des forces  $\frac{4}{188}$  de milligramme. Aussi, Coulomb n'employait-il que de très-faibles charges. La boule  $b$  était une tête de grosse épingle, enfoncée dans une tige de gomme laque.

**1620. Causes d'erreurs.** — 1° Il se perd de l'électricité pendant les observations, soit par l'air, soit par les supports isolants. La perte par l'air est négligeable quand le temps est sec et qu'on n'emploie que de faibles charges. Quant à la perte par les supports, Coulomb a reconnu qu'une tige de gomme laque, de 1<sup>mm</sup> de diamètre et de 40 à 45<sup>mm</sup> de longueur isole complètement une balle de sureau de 10 à 12<sup>mm</sup> de diamètre; car, si l'on soutient cette balle par plusieurs tiges semblables, la perte reste la même que lorsqu'il n'y en a qu'une. Dans les expériences de Coulomb, la déperdition était si faible que les boules, écartées de 30°, ne se rapprochaient que de 1° en trois minutes; or il n'en fallait que deux pour faire les deux observations comparatives.

2° On compte les distances sur des arcs, au lieu de les compter sur leur corde, et la force qui fait équilibre à la torsion n'est qu'une composante de la force électrique. Les deux erreurs tendent à se compenser, comme pour le magnétisme (1510). On en tient compte en comparant les distances

$$d = 2l \sin \frac{1}{2} \alpha, \quad d' = 2l \sin \frac{1}{2} \alpha', \quad \text{aux forces } e = \frac{at}{\cos \frac{1}{2} \alpha}, \quad e' = \frac{(\alpha' + \beta)t}{\cos \frac{1}{2} \alpha'}.$$

Dans ces expressions, que l'on trouve de la même manière que pour le magnétisme, sauf qu'il n'y a pas à tenir compte de l'action terrestre,  $e$ ,  $e'$  sont les actions électriques pour les angles d'écart  $\alpha$ ,  $\alpha'$  et aux distances réelles  $d$ ,  $d'$ ;  $t$  est la force de torsion pour 1°, et  $l$  la demi-longueur de l'aiguille. On peut aussi, comme pour le magnétisme (1510), écrire que d'après la loi des distances on doit avoir

$$\frac{\varphi}{d^2} = \frac{\varphi}{4 l^2 \sin^2 \frac{1}{2} \alpha} = \frac{bt}{\cos \frac{1}{2} \alpha}; \quad \text{d'où } \frac{\varphi}{4 l^2} = b \sin \frac{1}{2} \alpha \operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha,$$

$\varphi$  représentant l'action électrique à l'unité de distance,  $t$  la force de torsion pour 1°, et  $b$  l'angle total de torsion. Le premier membre étant constant, on vérifie qu'il en est de même du second, quelles que soient les valeurs de  $b$  et de  $\alpha$ . C'est ce qu'a fait Coulomb pour les valeurs de  $\alpha$  citées plus haut (1618).

Biot a appliqué ce calcul aux données des expériences de Coulomb<sup>1</sup>, et il a constaté qu'il n'apporte aux résultats, que des changements tellement petits, qu'on peut regarder les deux causes d'erreur comme se compensant, quand l'angle d'écart ne dépasse pas 36°. — On voit qu'il n'y a pas à s'en préoccuper pour la seconde loi, car  $\alpha$  reste toujours le même.

**1621. Méthode des oscillations.** — Coulomb a trouvé les mêmes lois par la méthode des oscillations. Nous avons développé le principe de cette méthode, en traitant du magnétisme (1508). Nous n'avons donc, ici, qu'à indiquer la

<sup>1</sup> *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. II, p. 228.

manière dont se font les expériences. Coulomb employait une petite aiguille de gomme laque de 3 à 4<sup>cm</sup> de longueur, suspendue à un fil de cocon de 18 à 20<sup>cm</sup> de longueur, et portant un petit disque de papier doré. Le tout était renfermé dans une cage de verre. La mobilité de ce système était telle, qu'une force de moins de  $\frac{1}{2200}m^5$  faisait décrire un tour entier à l'aiguille. On pouvait donc négliger la force de torsion développée dans le fil pendant les oscillations. Le disque de papier doré ayant été électrisé, Coulomb plaçait à une certaine distance et dans la direction de l'aiguille en équilibre, une boule de bois garni d'une feuille d'étain de 32<sup>cm</sup> de diamètre, électrisée, et placée assez loin pour que les lignes droites menées de son centre au centre du disque pussent être regardées comme toujours parallèles. En comparant les carrés des nombres d'oscillations accomplies pendant le même temps, sous l'influence de la boule placée successivement à différentes distances, ou à la même distance et chargée différemment, Coulomb a retrouvé les lois ci-dessus.

**1622. Expériences de M. Harris. —**

Quelques physiciens ayant répété les expériences de Coulomb, n'étaient pas arrivés aux mêmes résultats, M. Harris a alors entrepris un grand travail sur ce sujet au moyen d'un appareil perfectionné, nommé *balance bifile*, dans lequel l'aiguille mobile est suspendue par deux fils de cocon parallèles, comme dans le magnétomètre bifilaire de Gauss (1566); seulement les deux fils sont séparés par de petits arrêts de liège qui les empêchent de se rapprocher quand on tord le système<sup>1</sup>. L'aiguille ainsi suspendue fait des oscillations isochrones, *quelle que soit l'amplitude*, et la force capable de la retenir éloignée de sa position d'équilibre, est proportionnelle à l'écart, comme pour la torsion d'un simple fil.

La *balance bifile* (fig. 1135) consiste en une grande cage de verre, CC' dans laquelle est suspendue l'aiguille isolante *ov*, de 27<sup>cm</sup> de longueur, portant en *o* un disque d'or de 7<sup>mm</sup> de diamètre, équilibré par un disque de verre *v*. Une seconde aiguille *e*, liée à la première par une tige de cuivre *x*, et formée de deux brins de paille perpendiculaires à *ov*, indique les déviations sur le cercle divisé *rr'*. Un petit plateau, que l'on voit entre les lettres *e* et *x*, porte des poids annulaires, qui augmentent la force de direction du système; et la tige de laiton *x* porte à son

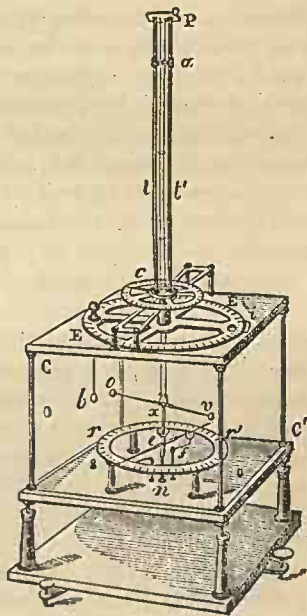


Fig. 1135.

<sup>1</sup> *Trans. phil.*, 1836, et *Traité d'électricité et du magn.*, par Becquerel, t. V.

extrémité inférieure un petit trou conique dans lequel s'enfonce librement une pointe  $n$ , afin d'empêcher les oscillations latérales. Les fils de suspension de l'aiguille  $ov$  sont fixés à la plaque  $P$ , soutenue par le châssis très-léger  $tP'$ . Ce châssis peut tourner autour d'un axe vertical, afin de pouvoir tordre le système des fils par le haut, de quantités mesurées sur le cercle fixe  $c$ , de 16<sup>cm</sup> de diamètre. La longueur de la partie libre des fils peut être modifiée par une coulisse  $a$ , et l'on voit entre ces fils, les arrêts, qui s'opposent à leur rapprochement.

Le corps électrisé  $b$ , qui doit agir sur le disque  $o$ , est suspendu par une tige isolante, au cercle mobile  $EE$ , de 35<sup>cm</sup> de diamètre, pouvant tourner autour d'un tube que traversent les deux fils de suspension; de manière qu'on peut, sans les déranger, rapprocher le corps  $b$  du disque  $o$ , d'une quantité indiquée par l'index fixe  $i$ . Deux petites tiges recourbées, dont une,  $f$ , est terminée par une fourchette, et que l'on fait mouvoir de dessous la cage de verre, servent à limiter les oscillations de l'aiguille  $e$ .

Si l'on remplace les deux fils par un fil métallique, on a une balance de torsion plus précise que celle de Coulomb, les angles de déviation et de torsion étant mesurés sur des cercles de grand diamètre,  $c$ ,  $rr'$ .

Au moyen de cet appareil, M. Harris a trouvé que les lois de Coulomb ne se vérifiaient pas toujours. Ce résultat a excité une vive émotion parmi les physiciens; car il mettait en suspicion les lois fondamentales de l'électricité. Mais on n'a pas tardé à découvrir les causes, signalées par M. Harris lui-même, de ces anomalies, qui ne se présentent que lors des distances très-petites. Or, dans ce cas, les fluides se portent vers les surfaces en présence, quand il y a attraction, et vers les points opposés, quand il y a répulsion. La distance moyenne des parties électrisées ne peut donc plus être représentée par celle des centres de figure. Il se fait aussi une décomposition de fluide neutre, qui tend à diminuer la répulsion, et peut même la changer en attraction, comme nous l'avons vu. M. Marié Davy a répété avec soin les expériences de M. Harris, et il a reconnu que la loi des distances se vérifie sensiblement sur deux boules électrisées, quand leur distance dépasse 9 à 10 fois leur rayon.

Les lois de Coulomb sont donc exactes pour les éléments électriques; mais si l'on veut les retrouver par l'expérience, il faut opérer sur des corps d'assez petites dimensions pour que les distances respectives de leurs divers points puissent être regardées comme égales entre elles, et qui soient assez éloignés, pour qu'il n'y ait pas de décomposition de fluide neutre. Quand ces conditions ne sont pas remplies, on peut calculer les actions en tenant compte des déplacements de fluides. C'est ce qu'a fait M. Roche, en employant les méthodes analytiques de Poisson, dont nous parlerons plus loin, et en partant des lois de Coulomb appliquées à chacun des éléments électrisés des corps. Les résultats du calcul se sont trouvés d'accord avec ceux que l'expérience a donnés à M. Marié Davy, ce qui fournit une nouvelle confirmation des lois de Coulomb.

**1623. Applications aux électromètres.** — Le petit appareil (fig. 1136)

constitue un des électroscopes les plus sensibles que l'on connaisse. Coulomb en a construit avec un fil de gomme laque tiré à la flamme d'une bougie, ayant 27<sup>mm</sup> de longueur et suspendu à un fil de cocon de 12<sup>cm</sup> de longueur. L'aiguille, avec son disque, ne pesait qu'un peu plus d'un centigramme. Quand on veut se servir de cet instrument, on fait tourner un petit micromètre auquel est attaché le fil de soie, de manière à amener le disque de l'aiguille, en contact avec une petite tige métallique *n*, qui traverse la paroi du cylindre de verre. Dès que cette tige *n* est mise en communication avec un corps électrisé, l'aiguille de gomme laque est violemment repoussée. La sensibilité de cet instrument est telle que la décomposition par influence qui se fait dans la tige *n*, quand un bâton de résine électrisé lui est présenté à une distance de 1 mètre, suffit pour que l'aiguille soit repoussée de 90°.

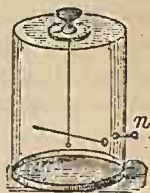


Fig. 1436.

**Électromètre des sinus<sup>1</sup>.** — Cet instrument, dû à M. Riess, consiste en un cylindre de verre *V* (fig. 1437), pouvant tourner sur lui-même de quantités angulaires mesurées sur un limbe gradué *rr*, et traversé par une tige métallique terminée par un bouton extérieur *e*. Sur une pointe fixée au milieu de cette tige, pivote une petite aiguille aimantée *ab*. La tige *oe* formant un certain angle avec le méridien magnétique, on fait tourner le couvercle *c* de manière qu'un repère tracé à l'extrémité de l'aiguille *ab* coïncide avec le centre du réticule d'une petite lunette *L*. On fait ensuite arriver l'électricité en *e*; elle se répand sur l'aiguille aimantée, qui est repoussée. En faisant tourner le cylindre *V*, on fait en sorte que l'angle *boe* reste le même; ce qui a lieu quand le centre du réticule de la lunette coïncide de nouveau avec le repère *b*. La force électrique fait alors équilibre à la composante  $f \sin \alpha$  de la force magnétique horizontale de la terre,  $\alpha$  étant l'angle de l'aiguille avec le méridien magnétique, angle égal à la quantité dont on a fait tourner le cylindre *V*. Or, la force électrique est proportionnelle pour un même écart *boe*, au carré de la charge, d'après la loi de Coulomb; les carrés des charges que l'on comparera seront donc entre eux comme les sinus des angles dont on aura fait tourner le cylindre *V* pour maintenir toujours le même écart *boe*.

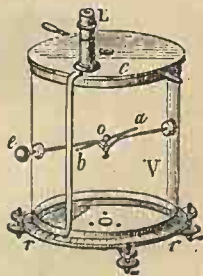


Fig. 1437.

## II. Distribution de l'électricité sur les corps conducteurs.

**1624. L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs.** — Ce fait important a été découvert par Beccaria et démontré par Coulomb. Gray

<sup>1</sup> Pogg. ann., t. XCVI, p. 513, et Ann. de ch. et de physique, 3<sup>e</sup> sér., t. XLVI, p. 502.

avait exécuté des expériences qui le faisaient pressentir : ayant isolé deux cubes de bois de mêmes dimensions, l'un massif et l'autre creux, et les ayant électrisés en appuyant un bâton de résine frotté au milieu d'un fil de fer qui les réunissait, il constata qu'ils attiraient avec la même force. Achard avait obtenu le même résultat avec des cubes de métal. Voici comment on démontre le principe énoncé.

1° On prend un vase isolé à parois très-minces et de forme quelconque, par exemple, une sphère creuse (fig. 1138); après l'avoir électrisé, on introduit dans son intérieur, par une ouverture *o* dont on a soin de ne pas toucher les bords, un disque de clinquant *b* fixé à une tige de gomme laque, et on lui fait toucher la paroi intérieure. On retire ensuite le disque, et l'on trouve qu'il ne contient pas d'électricité. Mais si on lui fait toucher la paroi extérieure, on le retire électrisé. Ce petit disque isolé se nomme *plan d'épreuve*.

Le plan d'épreuve retiré de l'intérieur du vase, donne quelquefois des signes d'électricité, mais contraire à celle du vase. Elle se trouve sur la gomme laque, dans laquelle il y a eu induction par l'électricité des bords de l'ouverture *o*.

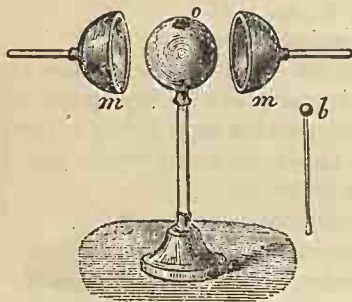


Fig. 1138.

2° On applique sur la sphère électrisée (fig. 1138) deux calottes hémisphériques à l'état neutre *m, m*, en métal ou en papier doré, que l'on tient par des manches isolants, et l'on voit que la surface extérieure de ces calottes a pris de l'électricité. On retire ensuite brusquement et au même instant les deux calottes, et l'on trouve que la sphère ne contient plus d'électricité; tout le fluide s'était donc transporté sur les calottes.

3° Pour prouver que l'électricité n'occupe au-dessous de la surface qu'une épaisseur imperceptible, on prend deux sphères isolées, de même diamètre, l'une en métal, massive; l'autre en gomme laque et dorée. On charge la première d'électricité, et l'on en mesure la charge en appliquant un plan d'épreuve et le portant dans la balance électrique. On fait ensuite communiquer cette sphère avec l'autre, qui est à l'état naturel, et, si l'on opère rapidement on reconnaît, au moyen du plan d'épreuve, que les deux sphères ont la même charge, et que cette charge est égale à la moitié de celle qu'avait d'abord la première. Il faut donc, puisque les surfaces sont égales, que la couche électrique ait la même épaisseur sur les deux sphères; et comme sur la sphère de gomme laque dorée, l'électricité ne peut pénétrer que dans la couche d'or excessivement mince qui la recouvre, le fluide doit occuper, sur la sphère massive, une épaisseur tout aussi petite.

4° On enroule autour d'un cylindre de verre suspendu à des cordons de soie *rr* (fig. 1139), une bande de toile *V* portant des électroscopes *e, e'*; on



électrise le cylindre, puis on déroule la toile, ce qui augmente la surface extérieure, et l'on voit les électroscopes se rapprocher.

5° Faraday a fait beaucoup d'expériences ingénieuses sur le même sujet<sup>1</sup>. Il électrisa des vases isolés en toile métallique, et le plan d'épreuve n'accusa aucune trace d'électricité en dedans. — Un cylindre de métal placé sur un plateau conducteur isolé, ayant été électrisé, toute l'électricité se trouva sur la surface extérieure. Ce cylindre ayant été entouré d'un grillage métallique qui le dépassait en hauteur, il ne se trouva plus d'électricité sur lui, et il ne s'en trouva qu'à l'extérieur de chaque barre. — S'étant introduit, muni de divers électroscopes, dans une chambre en toile métallique soutenue par des câbles de soie, Faraday n'éprouva aucune sensation, et les électroscopes restèrent en repos pendant qu'on tirait de fortes étincelles de la surface extérieure de la chambre. M. A. Terquem reproduit cette expérience au moyen d'une cage à mettre les oiseaux, dans laquelle il place de petits animaux, des électroscopes, des paquets



Fig. 1139.

de fils, des bandes de papier suspendues contre les parois; et il voit les animaux et les instruments rester indifférents pendant qu'on tire de fortes étincelles à l'extérieur, tandis que des fils et des bandes de papier suspendus en dehors s'écartent vivement.

Faraday fixa encore à un anneau, porté par une colonne isolante, un cône de mousseline

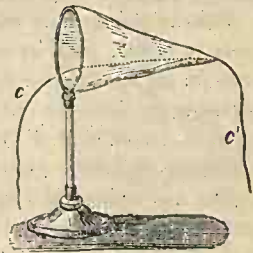


Fig. 1140.

(fig. 1140), et reconnut, après l'avoir électrisé, que toute l'électricité se trouvait sur la surface extérieure. L'ayant alors retourné au moyen du fil de soie *ce*, de manière que la surface qui était en dedans passât à l'extérieur, l'électricité se transporta en dehors, et l'on n'en trouva plus aucune trace sur la surface qui avait été retournée en dedans.

**1625. Explication de l'accumulation de l'électricité à la surface des corps conducteurs.** — On peut se rendre compte de l'accumulation de l'électricité à la surface des corps, par la répulsion qu'elle exerce sur elle-même en suivant les lois de Coulomb. Il résulte d'abord de ces lois, qu'une enveloppe à peu près sphérique électrisée, n'a pas d'action sur un point placé dans son intérieur. Cette proposition, que nous avons déjà considérée dans l'étude de la pesanteur (I, 146), se démontre, dans le cas de l'électricité, exactement de la même manière. On démontre aussi, comme pour la gravitation, qu'une couche sphérique ou à peu près sphérique, électrisée également dans tous ses points, agit comme si toute l'électricité était réunie à son centre.

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, par A. de la Rivo, t. III, p. 648.

Cela posé, considérons le cas particulier d'un sphéroïde électrisé, et supposons-le divisé en tranches concentriques infiniment minces. Une particule quelconque d'électricité placée à la surface d'une de ces tranches n'éprouvera aucune action répulsive de la part de l'électricité répandue dans les couches qui lui sont extérieures; elle sera au contraire repoussée par le fluide que pourrait contenir celles qui sont plus rapprochées du centre; elle devra donc s'éloigner de ce centre, jusqu'à ce qu'elle soit parvenue à la surface<sup>1</sup>. Une fois arrivée là, l'électricité agit toujours pour s'étendre, mais elle est arrêtée par l'air, qui est mauvais conducteur. Quand l'air est humide, il conduit notablement, et l'électricité se dissipe. Il peut en être de même dans l'air très-raréfié, et l'écoulement du fluide est souvent visible dans l'obscurité, sous forme de lueur. Du reste, ce n'est pas par sa pression, comme on le dit quelquefois, que l'air empêche la dispersion de l'électricité, mais par l'obstacle qu'il oppose, comme mauvais conducteur, au passage du fluide. Nous verrons quelle est l'influence de sa densité sur sa résistance (1639).

Dans la théorie d'un seul fluide, l'explication de l'accumulation à la surface reste la même, pour les corps électrisés *en plus*, le fluide naturel du corps et celui du milieu extérieur étant en équilibre de manière à ne pouvoir agir sur une particule du fluide en excès. Dans le cas d'un corps électrisé *en moins*, voici comment raisonne M. E. Edlund<sup>2</sup>. Dans le corps à l'état naturel, la résultante des actions de l'éther extérieur est égale et opposée, en chaque point du corps, à celle des actions de l'éther intérieur. Or les molécules de l'éther intérieur tendent par leur répulsion à se porter à la surface, il faut donc que la résultante des actions venant de l'extérieur tende à les refouler de la surface vers l'intérieur. Si donc le corps était électrisé en moins, la résultante extérieure étant la plus grande, fera quitter la surface aux molécules d'éther, et cette surface sera électrisée en moins.

L'accumulation de l'électricité à la surface des corps est une conséquence de la loi des carrés des distances, et la preuve expérimentale de ce fait, qui est établie avec une plus grande précision que la loi elle-même, peut être regardée, par réciprocité, comme une démonstration de cette loi, si l'on prouve qu'aucune autre loi ne conduit au même résultat. C'est ce que Coulomb a montré<sup>3</sup>, et ce que Laplace, puis M. Plana ont prouvé par l'analyse mathématique, et ce dont M. J. Bertrand a enfin donné une démonstration élémentaire<sup>4</sup>.

**1626. Épaisseur de la couche électrique. Tension.** — L'expérience des deux globes de métal et de gomme laque dorée (1624) prouve que l'électricité

<sup>1</sup> Les molécules des gaz se repoussent mutuellement, et cependant les gaz ne se pressent pas contre les parois internes des vases qui les renferment. Cela tient à ce que la répulsion dans les gaz n'est pas soumise aux mêmes lois que les actions électriques.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 209.

<sup>3</sup> *Mém. de l'Ac. des Sc.* (1785), p. 587, et *Traité d'él. statique*, par M. Mascart, t. I, p. 97.

<sup>4</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. II, p. 418.

n'occupe qu'une épaisseur insensible à la surface des corps bons conducteurs. D'un autre côté, le calcul indique qu'aucun point placé au-dessous de cette surface ne peut être électrisé. Il faut donc admettre que la couche électrique, à laquelle on attribue généralement une certaine épaisseur, est superposée à la surface, où l'air la maintient sous une épaisseur qui n'est constante que dans le cas d'une sphère. S'il en est ainsi, la nature du corps ne doit pas avoir d'influence sur la quantité d'électricité qui tend à se répandre sur la surface; et, en effet, Coulomb ayant mis en communication deux sphères égales de nature différente, dont une seule était électrisée, trouva qu'elles étaient chargées chacune de la moitié de l'électricité que contenait la première. Un corps conducteur peut donc être regardé comme un espace dans lequel l'électricité peut se déplacer; et sa surface, avec l'air qui l'enveloppe, comme représentant la paroi d'un vase qui s'oppose à la sortie d'un fluide.

L'électricité accumulée en un point de la surface d'un corps est toujours repoussée par celle de tous les autres points de cette surface, de sorte qu'elle exerce normalement sur l'air un effort auquel il doit résister pour que l'électricité ne se perde pas. C'est cet effort, inégal aux différents points des corps non sphériques, qui constitue ce que l'on nomme *tension*, ou *densité* électrique. Quand la tension est assez grande pour vaincre la résistance de l'air, l'électricité s'échappe, en produisant souvent des aigrettes dont nous étudierons la structure.

Laplace a démontré par l'analyse mathématique, en partant des lois de Coulomb, que la *tension en un point est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique*. On voit facilement que l'action sur l'air est d'abord proportionnelle à l'épaisseur, les particules de fluide situées sur la même normale étant toutes repoussées avec la même force par toute l'électricité du corps. De plus, la répulsion exercée sur chaque particule dépend de leur nombre sur la même normale, ou de l'épaisseur, et l'analyse montre qu'elle lui est aussi proportionnelle. L'action sur l'air est donc en raison du *carré* de l'épaisseur.

**1627. DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA SURFACE DES CORPS.** — L'électricité répandue à la surface des corps conducteurs n'y est pas distribuée uniformément, si ce n'est quand la forme est sphérique. Coulomb a laissé sur ce sujet de nombreuses expériences faites par la méthode suivante, et publiées par Biot.

**Méthode du plan d'épreuve.** — Le plan d'épreuve consiste en un petit disque de clinquant fixé à l'extrémité d'une fine tige de gomme laque *p* bien isolante (*fig. 1141*). Quand on veut comparer les tensions électriques en deux points d'un même corps *A*, ou de deux corps différents, on applique le petit disque exactement sur la surface en un de ces points, *n*, et on le porte dans la balance électrique (1618) dont l'aiguille de gomme laque a été chargée d'avance de la même espèce d'électricité. L'aiguille s'écarte, et l'angle de torsion mesure



Fig. 1131.

la répulsion exercée. On opère de même pour l'autre point, en ayant soin de ne pas changer la charge de l'aiguille de la balance, et de ramener cette aiguille, au moyen du micromètre supérieur, à la même position que dans la première expérience. Les angles de torsion observés sont alors entre eux comme les charges successives du plan d'épreuve.

Il reste à voir si ces charges sont entre elles comme les tensions aux points touchés. On conçoit d'abord que la charge du plan d'épreuve doit être proportionnelle à celle de la portion de surface qu'il recouvre. En effet, la face extérieure du disque remplace cette portion de surface, l'électricité devra donc fuir cette dernière et se porter sur la face extérieure du disque, et avec la même tension, s'il est assez mince et assez petit pour ne pas modifier sensiblement la forme du corps. Quand on enlève ensuite le plan d'épreuve, il emporte une quantité de fluide égale à celle que possédait la surface qu'il recouvrait. Porté ensuite dans la balance, il agit sur l'aiguille, comme l'aurait fait cette portion de surface elle-même si on l'y eût transportée avec son électricité. Il est vrai que l'électricité emportée par le plan d'épreuve s'est répandue sur ses deux faces; mais comme il est très-mince, les deux faces sont sensiblement à la même distance de l'aiguille de la balance.

Coulomb a fait de nombreuses expériences pour prouver que la charge du plan d'épreuve est bien proportionnelle à celle du point touché. Ayant mesuré, avec cet instrument, le rapport des tensions  $t$ ,  $t'$  en deux points d'un cylindre isolé, il fit communiquer ce cylindre avec un autre cylindre identique, par des points semblablement placés. Alors la charge du premier cylindre fut réduite de moitié. Le plan d'épreuve, appliqué aux deux mêmes points du premier cylindre, indiqua les tensions  $\frac{1}{2} t$ ,  $\frac{1}{2} t'$ , et par conséquent le même rapport entre les tensions. Coulomb a encore procédé avec un seul cylindre, sur lequel il mesurait de temps en temps les tensions en deux points déterminés. Ces tensions allaient en diminuant, à cause des déperditions d'électricité; mais leur rapport devait rester le même, ce que le plan d'épreuve a toujours indiqué.

**1628. Causes d'erreur.** — Pendant la durée des expériences, la charge du corps diminue; les points touchés les derniers donnent donc des résultats trop faibles. Pour éviter cette cause d'erreur, on expérimente par un temps bien sec, de la manière suivante. Soit à comparer les tensions aux points  $n$ ,  $n'$ ,  $n''$ ,... d'un corps A (fig. 1141); on applique d'abord le plan d'épreuve en  $n$ , et l'on évalue la tension  $t$  en ce point. Au bout d'un certain temps, par exemple deux minutes, on touche le point  $n'$ , et l'on évalue de même sa tension  $t'$ . Au bout de deux autres minutes, on revient au point  $n$  et l'on mesure de nouveau sa tension  $t''$ , qui est plus faible à cause de la déperdition, et l'on prend pour tension au point  $n$ , la moyenne  $\frac{1}{2} (t + t'')$ , que l'on compare à la tension  $t'$ . On compare de même la tension au point  $n''$  à celle du point  $n$ , et ainsi de suite. On voit qu'il suffit de comparer toutes les tensions à celle du point  $n$ , sans qu'il soit nécessaire que celle-ci soit constante; il faut seulement, au moyen de proportions, rapporter toutes les tensions à la même. Cette manière de procéder

suppose que la déperdition est uniforme pendant le temps des observations, ce qui a lieu quand ce temps est court, comme nous le verrons plus loin (1637).

Il faut supposer aussi que l'aiguille de la balance conserve sa charge pendant les deux observations successives que l'on compare. On doit donc opérer par un temps très-sec, et bien dessécher l'intérieur de l'appareil, afin de rendre la perte insensible. On peut encore éviter cette cause d'erreur en faisant le disque du plan d'épreuve égal à celui de la balance, et ayant soin de décharger ce dernier avant chaque observation. Alors le plan d'épreuve partage l'électricité du disque de l'aiguille; seulement la force de torsion ne donne que le quart de la tension que le plan d'épreuve avait empruntée au point touché.

**1629. Résultats.** — Voici quelques-uns des résultats trouvés par Biot, dans les manuscrits de Coulomb.

**1<sup>o</sup> Lames quadrangulaires.** — Sur une lame d'acier de 1<sup>mm</sup>, 12 d'épaisseur, de 27<sup>mm</sup> de largeur et de 300<sup>mm</sup> de longueur, la tension moyenne, prise dans toute la largeur par un plan d'épreuve de 27<sup>mm</sup> sur 6 à 7<sup>mm</sup>, est, vers le milieu, sensiblement uniforme, puis augmente jusqu'aux extrémités, où elle est à peu près double de ce qu'elle est au milieu. L'augmentation commence à 28 ou 30<sup>mm</sup> des extrémités, quelle que soit la longueur de la lame, quand elle est assez longue pour qu'il y ait un espace où la tension soit uniforme. Quand on met le plan d'épreuve sur le prolongement de la lame, en lui en faisant toucher la tranche, il accuse une tension, deux fois plus grande que celle des extrémités; mais il est évident que, dans cette position, le plan d'épreuve doit prendre beaucoup plus d'électricité que s'il était appliqué par une de ses faces.

**2<sup>o</sup> Plateaux circulaires.** — Quand le diamètre a plus de 27<sup>cm</sup>, l'électricité est répandue uniformément au milieu, jusqu'à 8 ou 10<sup>cm</sup> du bord; à partir de là, la tension augmente rapidement, suivant une loi indépendante du diamètre. Biot a représenté la tension  $t$  à la distance  $x$  du bord, par la formule empirique suivante, dans laquelle  $r$  est le rayon du plateau :

$$t = 1 + 1,9 (0,3^r - 0,3^{2r-x}),$$

**3<sup>o</sup> Cylindres.** — Sur un cylindre terminé par deux hémisphères, la tension augmente rapidement vers les extrémités, et d'autant plus que le diamètre est plus petit par rapport à la longueur. Sur un cylindre de 5<sup>cm</sup>, 4 de diamètre et de 80<sup>cm</sup> de longueur, les rapports entre la tension au milieu et les tensions à 0<sup>cm</sup>; 2<sup>cm</sup>, 7; et 5<sup>cm</sup>, 4 de l'extrémité, ont été 2,30; 1,80; 1,25. Tous ces résultats attestent la répulsion de l'électricité sur elle-même.

Quand le cylindre va en s'amincissant vers l'extrémité, la tension augmente encore plus rapidement à mesure qu'on s'en approche; et enfin, si l'extrémité forme une pointe, la tension y devient si forte que l'air cède, et l'électricité s'échappe en formant une aigrette, visible dans l'obscurité.

**4<sup>o</sup> Globes en contact.** — Sur deux sphères égales, de 22<sup>cm</sup> de diamètre, tangentes l'une à l'autre, Coulomb a trouvé la tension nulle jusqu'à 20° autour

du point de contact, et très-faible, de  $20^{\circ}$  à  $30^{\circ}$ . Elle augmente ensuite rapidement, de  $30^{\circ}$  à  $60^{\circ}$ , très-peu de  $60^{\circ}$  à  $90^{\circ}$ , et enfin reste à peu près constante, de  $90^{\circ}$  à  $180^{\circ}$ .

Si le diamètre de l'un des globes n'est que de  $11^{\text{cm}}$ , la tension  $\gamma$  est presque nulle jusqu'à  $30^{\circ}$  du point de contact; elle augmente dans le rapport de 10 à 17, entre  $60^{\circ}$  et  $90^{\circ}$ ; et de 75 à 100, entre  $90^{\circ}$  et  $180^{\circ}$ . Plus les globes diffèrent entre eux, plus la tension augmente rapidement, du point de contact au point opposé sur le plus petit; et plus elle tend à devenir uniforme sur le plus gros. A  $90^{\circ}$  du point de contact, les tensions sont dans le rapport de 1,25 à 1, sur deux globes dont les diamètres sont comme 1 : 2.

Si l'on sépare les deux globes, de manière qu'ils n'exercent plus d'influence l'un sur l'autre, le plus petit emporte relativement plus d'électricité que l'autre; car il présente une tension plus grande. D'après les calculs de Poisson, le rapport des tensions sur les deux globes converge vers la limite  $\frac{2}{3}$ .

Dans le cas des cylindres, Coulomb est arrivé à des résultats analogues. Ayant mis une sphère électrisée, de  $21$  à  $22^{\text{cm}}$  de diamètre, en contact successivement avec des cylindres d'égale longueur et de  $5^{\text{cm}}, 4; 2^{\text{cm}}, 7; 0^{\text{cm}}, 45$  de diamètre, il trouva sur ces cylindres, après la séparation, les tensions égales à 1,30, 2 et 9, celle de la sphère étant prise pour unité. On voit donc qu'il y a avantage, à égalité de surface, à former les conducteurs secondaires avec des cylindres étroits, comme nous l'avons dit plus haut (1608).

Coulomb a encore étudié la distribution de l'électricité dans une série de sphères égales en contact, de  $5$  à  $6^{\text{cm}}$  de diamètre. Il a trouvé que la tension diminue considérablement de la première à la seconde (le rapport était 1,5), et ensuite très-lentement jusqu'à celle du milieu. Il y a donc analogie avec ce qui a lieu sur un cylindre.

**1630. Théorie mathématique.** — Coulomb a obtenu beaucoup d'autres résultats par la méthode du plan d'épreuve. Il fallait la sagacité, l'adresse et la patience dont il était doué, pour mener à bonne fin ces expériences, malgré les nombreuses difficultés pratiques qu'elles présentent. Cependant les recherches de Coulomb n'ont pas été d'abord appréciées; on ne leur trouvait pas une importance scientifique assez directe. Mais plus tard, lorsque Poisson eut publié sa théorie analytique de l'électricité statique<sup>1</sup>, on trouva, dans les expériences de Coulomb, le moyen de contrôler les résultats numériques donnés par l'analyse, et de confirmer l'exactitude des méthodes et des formules algébriques.

Poisson est parti de l'hypothèse de deux électricités, s'attirant ou se repoussant en raison composée des quantités de fluide et en raison inverse du carré des distances, et résidant en quantité indéfinie dans les corps, à l'état de fluide neutre. L'électricité libre dans un corps conducteur se porte à sa surface, en formant une couche excessivement mince dont l'épaisseur en chaque point est

<sup>1</sup> Mémoires de l'Institut, Académie des sciences, 1811, 1<sup>re</sup> et 2<sup>o</sup> partie.

déterminée par la condition que la couche entière n'ait pas d'action sur un point quelconque placé dans l'intérieur. Poisson a étudié la distribution de l'électricité sur des corps de diverses formes ou sur plusieurs corps en contact, et l'influence exercée par plusieurs conducteurs électrisés les uns sur les autres. Appliquant ensuite ses formules aux nombres trouvés par Coulomb, il a comparé, dans 14 cas différents, les résultats du calcul à ceux de l'observation, et il a toujours trouvé entre eux un accord satisfaisant. Les différences n'ont jamais dépassé  $\frac{1}{30}$  de la quantité évaluée; ce qui est très-remarquable, vu les nombreuses incertitudes des expériences.

Parmi les résultats déduits par Poisson, nous citerons les suivants : sur un ellipsoïde à trois axes, les tensions aux sommets sont entre elles comme les longueurs des axes qui y aboutissent. Il résulte de là que, si l'on a plusieurs ellipsoïdes de révolution ayant le même équateur et des axes différents, les tensions aux sommets seront proportionnelles aux axes. Si donc l'axe s'allonge de plus en plus, la tension augmentera de même, et finira par vaincre la résistance de l'air quand le sommet présentera une courbure à très-petit rayon. Alors l'électricité s'échappera en formant une aigrette, comme nous le verrons plus tard.

M. Plana a fait à Turin un grand travail mathématique sur une partie du sujet traité par Poisson.

**1631. DU POTENTIEL ÉLECTRIQUE.** — Nous avons vu comment on évalue la densité électrique aux divers points de la surface d'un conducteur, ce qui permet de calculer la quantité d'électricité qu'il contient. Cette quantité peut être comparée aux *quantités* de chaleur qu'absorbent les corps, quantités qu'on ne confond pas avec l'accroissement de *température*, qui est un effet que nos organes nous font distinguer. On s'est demandé, relativement à l'électricité, quelle est la qualité qui correspond à la température. Comme nous n'avons pas d'organe capable d'apprécier les effets généraux de l'électricité, il faut le plus souvent, pour en constater la présence, avoir recours à des instruments spéciaux, comme on a recours au thermomètre, dans l'étude de la chaleur. Parmi ces instruments, nous citerons la balance de torsion, et nous allons voir comment elle permet d'évaluer un certain effet électrique, qui joue en électricité un rôle analogue à la température pour la chaleur, et que l'on désigne généralement sous le nom de *potentiel électrique* (*potentia*, puissance). La considération de cette quantité, qui est une fonction des masses d'électricité et de leur distance au point sur lequel elles agissent, comme la température dépend de la quantité de chaleur, a permis de résoudre des questions jusque-là inabordables, relatives aux actions électriques, et a conduit à des formules tout à fait semblables à celles que les géomètres ont trouvées pour représenter la distribution de la chaleur dans les corps. Seulement ici, on est parti des quantités d'électricité, tandis que, pour la chaleur, on a d'abord considéré les *températures*, et ce n'est que plus tard qu'on a distingué les *quantités* de chaleur. — Voyons d'abord comment on a été amené à considérer cette fonction; nous verrons ensuite les applications qu'on en peut faire dans l'étude de l'électricité.

Dans les recherches mathématiques sur les forces qui agissent *suivant les lois de la gravitation*, auxquelles sont soumis les forces magnétiques et électriques, on simplifie singulièrement les problèmes en introduisant dans les calculs la fonction  $V = \sum \frac{m}{r}$  dans laquelle le signe  $\sum$  s'étend à plusieurs masses  $m, m', m'', \dots$  agissant aux distances  $r, r', r'', \dots$ , sur une masse égale à l'unité. Cette fonction a été employée pour la première fois, en 1782, par Laplace, dans sa mécanique céleste, puis par Poisson, vers 1811, dans ses mémoires sur l'électricité. G. Green, en 1828, a montré tout le parti qu'on en peut tirer, et l'a nommée *fonction potentielle*. Mais ce n'est que plus tard, après que Chasles, Gauss, ... eurent repris la question, que l'on comprit toute l'importance du travail de Green, et l'utilité de la fonction potentielle, que Gauss, dans ses calculs sur l'attraction, nomme simplement *potentiel*, terme qui a été généralement adopté. Un des principaux avantages du potentiel est de permettre de calculer facilement les composantes de l'action résultante exercée sur un point par divers corps agissant suivant les lois de la gravitation.

Considérons un point M contenant une masse  $m$  d'électricité, et agissant sur un point P contenant l'unité d'électricité. L'action de M sur P sera  $\mp \frac{m}{r^2}$ , le signe (—) correspondant au cas où il y a attraction. Rapportons les points M et P à 3 axes rectangulaires, et soient  $x, y, z$  et  $a, b, c$  leurs coordonnées, et  $\alpha$  l'angle que fait la direction MP avec l'axe des  $x$ . La composante parallèle à cet axe sera  $\mp \frac{m}{r^2} \cos \alpha$ , ou  $\pm \frac{m}{r^2} \frac{x-a}{r} = \mp \frac{m}{r^3} (x-a)$ . S'il y a plusieurs masses  $m, m', m'', \dots$ , cette composante sera  $\mp \sum \frac{m}{r^3} (x-a)$ . On trouverait de même les deux autres composantes, et les trois composantes seront

$$[1] \quad X = \mp \sum \frac{m}{r^3} (x-a); \quad Y = \pm \sum \frac{m}{r^3} (y-b); \quad Z = \mp \sum \frac{m}{r^3} (z-c).$$

Ces composantes peuvent s'obtenir très-simplement au moyen du potentiel,  $V = \mp \sum \frac{m}{r}$ , de toutes les masses  $m$  agissant sur le point P; car elles en sont les dérivées partielles par rapport à  $a, b, c$ . En effet, considérons la relation

$$r^2 = (x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2.$$

En prenant la dérivée de  $r$  par rapport à  $a$ , et la désignant par  $\frac{dr}{da}$ , nous aurons

$$[2] \quad r \frac{dr}{da} = x-a, \quad \text{d'où} \quad \frac{dr}{da} = \frac{x-a}{r}.$$



Or, dans [1],  $\frac{x-a}{r^3}$  est la dérivée de  $\frac{1}{r}$  par rapport à  $a$ ; car on a

$$\frac{d\frac{1}{r}}{da} = \frac{1}{r^2} \frac{dr}{da} = \frac{x-a}{r^3},$$

en remplaçant  $\frac{dr}{da}$  par sa valeur [2]. La composante X devient donc

$$X = \mp \sum m \frac{d\frac{1}{r}}{da} = \pm \sum m \frac{dV}{da};$$

car  $\sum m \frac{d\frac{1}{r}}{da}$  n'est autre chose que la dérivée par rapport à  $a$ , de  $V = \sum \frac{m}{r}$ , c'est-à-dire du potentiel. Il en est de même pour les autres composantes; on a donc

$$[3] \quad X = \sum \frac{dV}{da}, \quad Y = \sum \frac{dV}{db}, \quad Z = \sum \frac{dV}{dc}.$$

Lors donc qu'on connaîtra le potentiel, on pourra au moyen de ses trois dérivées partielles calculer la force résultante des actions d'un système sur un point P, au moyen des trois composantes de cette force.

Si l'on prend les dérivées secondes du potentiel par rapport aux variables  $a, b, c$  du point P, on démontre que leur somme, qu'on représente ordinairement par  $\Delta V$ , est égale à  $4\pi\rho$ ;  $\rho$  étant la densité au point P de la masse qui agit sur ce point; de sorte que si ce point est extérieur, auquel cas  $\rho$  est nul, on a  $\Delta V = 0$ .

**Second potentiel.** — Au lieu de supposer un système de masses agissant sur un seul point, on peut considérer les actions mutuelles de toutes les masses les unes sur les autres, actions représentées par  $\sum \frac{mm'}{r^2}$ . On considère alors un *second potentiel*  $W = \sum \frac{mm'}{r}$ , et l'on démontre qu'il est lié au premier, par la relation  $W = \frac{1}{2} \sum V m'$ . On démontre aussi que les *variations infiniment petites* de  $W$  représentent le travail élémentaire des actions du système, quand son état électrique change; et que, par conséquent, la valeur de  $W$  représente le travail que produiraient les forces électriques, si le système était déchargé et revenait à l'état naturel. Cette quantité est égale au travail utile qu'il a fallu dépenser pour produire l'électricité qui a servi à charger le système. On appelle souvent la fonction  $W$ , *énergie électrique*, par analogie avec l'expression d'énergie calorifique employée dans la *thermodynamique*<sup>1</sup>.

**1632. Conséquences et applications.** — Poisson a démontré que, pour

<sup>1</sup> Green nommait la fonction  $W$ , *potentiel*, et désignait  $V$ , sous le nom de *fonction potentielle*, ce qui a été adopté par quelques auteurs.

que l'électricité soit en équilibre à la surface d'un système de corps, il faut et il suffit que la résultante des actions de tous les éléments électriques des surfaces, sur un point quelconque de l'intérieur d'un de ces corps, soit nulle. Ce qui se conçoit facilement, car sans cela, il y aurait induction sur le point considéré, dont l'état électrique réagissant ensuite sur les couches superficielles des corps, en détruirait l'équilibre. Les composantes  $X, Y, Z$  doivent donc être nulles, ce qui sera réalisé, d'après les formules [3], si  $V$  est constant pour toutes les valeurs de  $a, b, c$  prises dans un même corps;  $V$  pouvant, du reste, être différent d'un corps à l'autre.

En chaque point de la surface d'un même corps, où l'électricité se porte en couche très-mince, la résultante de toutes les actions électriques devra être normale à cette surface, et G. Green a démontré qu'il faut et qu'il suffit pour cela que le potentiel de toutes les actions des éléments de la couche électrique sur un point quelconque de la surface, soit partout le même. On désigne le lieu des points qui ont même potentiel sous le nom de *surface de niveau*; les surfaces de niveau correspondent aux *surfaces isothermes* des corps échauffés. La surface d'un corps conducteur électrisé est une surface de niveau.

Le potentiel de cette surface est proportionnel à la charge, c'est-à-dire à la quantité d'électricité que contient le corps; car Coulomb a prouvé par l'expérience, que la distribution de l'électricité à la surface d'un conducteur, reste la même quand on lui enlève une partie de son électricité, en le faisant communiquer avec un conducteur identique à l'état neutre. Si donc  $m$  est rendu  $n$  fois plus faible en un point, il en sera de même pour tous les autres, et  $\sum \frac{m}{r}$  sera proportionnel à  $n$ ; de même que l'élévation de température d'un corps est proportionnelle à la quantité de chaleur qu'on lui fournit.

Le potentiel d'une sphère dont le rayon est  $R$ , et qui contient une masse  $M$  d'électricité, est  $V = \frac{M}{R}$ , les  $r$  étant les mêmes pour chaque point de la surface. On voit que, pour une même masse,  $V$  est en raison inverse du rayon de la sphère. — Le potentiel du globe est nul, car on peut regarder son rayon comme infini.

Si nous supposons  $M : R$  égal à l'unité, c'est-à-dire si  $M$  contient autant d'unités d'électricité que  $R$  contient d'unités de longueur, on aura  $V = 1$ ; ce sera l'*unité de potentiel*.

Si l'on fait communiquer, par des fils très-fins, plusieurs corps électrisés assez espacés pour qu'ils ne puissent modifier mutuellement leur état électrique, on pourra les regarder comme ne formant qu'un seul corps, et il faudra, pour qu'il y ait équilibre, que le potentiel soit le même pour tous les points de toutes leurs surfaces. L'équilibre électrique s'établira donc par l'égalisation des potentiels de tous ces corps; de même que l'équilibre calorifique de plusieurs corps s'établit par l'égalisation de leur température.

**Capacité électrique.** — Quand plusieurs corps en communication se

partagent l'électricité de manière que le potentiel soit partout le même, chacun d'eux en prend plus ou moins, suivant sa forme et ses dimensions. De là l'idée de *capacité électrique*, indiquée d'abord par Volta, qui avait reconnu que, à égalité de surface, un cylindre peut prendre d'autant plus d'électricité que sa forme est plus allongée (1629). On nomme *capacité électrique* d'un corps la quantité d'électricité qu'il faut lui fournir pour que son potentiel augmente d'une unité; de même que la capacité calorifique d'un corps est la quantité de chaleur capable d'élever sa température de 1°. Si donc  $C$  est la capacité électrique d'un corps,  $M = C V$  sera la quantité d'électricité correspondant au potentiel  $V$ , et si l'on connaissait  $M$  et  $V$  on en déduirait la capacité  $C$ . Pour une sphère, on a  $M = R V$ ; sa capacité est donc représentée par le même nombre que son rayon.

**Mesure du potentiel.** — On déduit de ce qui précède un moyen de mesurer le potentiel à la surface d'un conducteur électrisé. On fait communiquer ce conducteur par un fil long et fin, dont la capacité est négligeable, avec les deux boules égales d'une balance de Coulomb, et la torsion correspondant à un écart donné de ces boules servira de mesure au potentiel, puisque les deux boules ont dû prendre le même potentiel que le corps, d'après ce que nous avons vu plus haut<sup>1</sup>. Cet effet dans la balance, que l'on doit comparer à la dilatation qui sert à mesurer les températures, ne représente exactement le potentiel possédé par le corps, que si la quantité d'électricité enlevée par les boules est négligeable. Quand il n'en est pas ainsi, on tient compte de la diminution produite sur le potentiel du corps, de même qu'on tient compte, en calorimétrie, de la chaleur enlevée par le thermomètre.

Nous aurons souvent à citer le potentiel électrique des corps; il faudra entendre par là, au point de vue pratique, l'effet produit dans une balance de Coulomb, dont les boules seraient mises en communication par un fil long et fin avec le conducteur<sup>2</sup>. Nous décrirons plus loin des électromètres, entre autres celui de M. Thomson, qui se prête tout particulièrement à la mesure du potentiel et de la capacité électrique.

Ce qui précède suffit pour montrer les analogies entre le potentiel et la température, et l'on peut dire que, le plus souvent, les questions mathématiques relatives à l'électricité ont leurs correspondantes en calorimétrie. Les problèmes se présentent de la même manière et conduisent aux mêmes formules. M. W. Thomson<sup>3</sup>

<sup>1</sup> La torsion ainsi obtenue est toute différente de celle qu'on obtiendrait en touchant un point du corps avec la boule d'épreuve, et la transportant ensuite dans la balance. On aurait alors la *tension* au point touché, tension qui change d'un point à l'autre sur les corps non sphériques, tandis que le potentiel est partout le même.

<sup>2</sup> M. Abria, en partant de cet effet comme définition du potentiel, en a donné une théorie assez élémentaire pour pouvoir être introduite dans l'enseignement secondaire (*Mémoires de la Société des Sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, 2<sup>e</sup> série, t. I).

<sup>3</sup> *Mathematical Journal*, Cambridge, t. III, p. 71 et 189.

a montré, ainsi que M. A. Potier par une méthode plus élémentaire<sup>1</sup>, comment on peut prouver la similitude des deux ordres de problèmes sans qu'il soit nécessaire de les mettre en équation.

### III. Pouvoir des pointes.

**1633. Pointes sur un conducteur.** — Le calcul relatif aux ellipsoïdes de révolution (1630) montre que, si l'axe s'allonge indéfiniment, de manière que le sommet se transforme en une pointe, la tension y devient *infinie*, et la résistance de l'air ne peut plus s'opposer à la sortie du fluide, qui, en effet, s'écoule alors d'une manière continue, et sans bruit appréciable. Aussi ne peut-on obtenir qu'un faible potentiel sur un conducteur armé d'une pointe; celle-ci se comportant sur un conducteur électrisé, comme un orifice dans la paroi d'un vase rempli de gaz comprimé. C'est pour cela qu'on évite les pointes et les angles sur les conducteurs des appareils électriques.

**Pointe présentée à un conducteur.** — Les pointes ont encore la faculté, quand elles communiquent avec le sol, de décharger les conducteurs auxquels on les présente. Par exemple, si l'on dirige vers le conducteur d'une machine électrique en mouvement une pointe que l'on tient à la main, le pendule de l'électromètre de Henley s'abaisse; et il se relève dès qu'on retire la pointe. C'est que le fluide neutre de la pointe est décomposé par l'influence de celui du conducteur; le fluide de même nom est repoussé dans le sol, et le fluide de nom contraire, s'échappant de la pointe, se porte sur le conducteur, qui l'attire, et neutralise l'électricité qu'il contient. La pointe agit dès que l'induction peut se produire, c'est-à-dire à une distance de plusieurs mètres. La machine électrique du musée Teyler rend lumineuse une pointe placée à plus de 10<sup>m</sup> de distance.

**Pointe isolée.** — Si la pointe est placée sur un corps isolé, elle n'enlève que très-peu d'électricité aux conducteurs auxquels on la présente; car le fluide repoussé ne pouvant passer dans le sol, la décomposition du fluide neutre est bientôt arrêtée. Il n'y a donc de neutralisé sur le conducteur, qu'une quantité d'électricité égale à celle que l'on trouve sur le corps qui porte la pointe, comme si celle-ci avait *soutiré* cette électricité, suivant l'expression de Franklin.

Dans la théorie d'un seul fluide, il n'y a rien à changer aux explications quand la pointe est électrisée *en plus*. Dans le cas où elle est placée sur un conducteur électrisé *en moins*, l'électricité naturelle de l'air tend à s'introduire dans le conducteur par la pointe, où l'état négatif est très-prononcé d'après les lois de la distribution, et à y rétablir l'état naturel. — Si la pointe est présentée à un conducteur négatif, elle verse son électricité sur ce conducteur. Si elle est présentée à un conducteur positif, celui-ci repousse l'électricité naturelle de la pointe, y établit l'état négatif et passe sur cette pointe en produisant divers mouvements dans l'air, comme nous allons le voir (1636).

<sup>1</sup> Journal de physique de M. d'Almeida, t. I, p. 145.

**1634. Remarques.** — L'action des pointes sur les corps auxquels on les présente permet de charger des conducteurs isolés, en les armant d'une pointe dirigée vers une machine électrique, et de répéter avec ces conducteurs les expériences que l'on fait sur ceux de la machine; par exemple celles des figures 1105, 1106, 1108 et 1110.

Nous avons vu le rôle que remplissent les pointes dans les peignes des machines électriques.

Il résulte de la propriété qu'ont les pointes de décharger les conducteurs d'une manière continue, qu'on ne doit pas pouvoir tirer une étincelle d'une pointe placée sur un conducteur; ou de ce conducteur, en lui présentant la pointe.

On le peut cependant quand l'électricité sort de la pointe subitement et en grande quantité; ce que l'on obtient, entre autres, comme l'a montré M. E. Puchot<sup>1</sup>, au moyen d'un corps conducteur auxiliaire isolé B (fig. 1142), placé, par exemple, entre la pointe P et le conducteur électrisé A. Une étincelle jaillit en AB, et en même temps, il en part une autre entre B et la pointe, mais plus faible que s'il n'y avait pas de pointe. Si l'on éloigne P peu à peu, les étincelles cessent bientôt en BP et en AB, et l'électricité passe sous forme d'aigrette continue. Les résultats sont les mêmes quand la pointe est fixée en A, ou quand elle est portée par le corps B, et tournée soit du côté de A soit du côté de P.

Le pouvoir des pointes est une des plus remarquables découvertes de Franklin. Nollet avait vu les angles des objets placés près des corps électrisés devenir lumineux dans l'obscurité, et c'est en étudiant ce phénomène que Franklin, en 1750, reconnut aux pointes le pouvoir de *tirer* de loin le fluide électrique, et aussi de le *pousser* quand elles sont placées sur le corps électrisé. Il rapporte que cette dernière propriété lui a été indiquée par Th. Hopkinson, qui ayant voulu tirer des étincelles d'une pointe, comme d'un foyer où l'électricité serait concentrée, fut très-étonné de ne rien obtenir<sup>2</sup>.

**1635. Mouvements dus à l'écoulement de l'électricité par les pointes.** — Citons d'abord le *tourniquet électrique* (fig. 1143) dû à Hamilton. Une chape, mobile sur un pivot, porte des bras horizontaux terminés en pointe recourbée. Si l'on fixe l'instrument sur le conducteur d'une machine électrique, on le voit tourner en sens contraire de l'écoulement de l'électricité par les pointes. L'appareil non isolé, placé à une certaine distance de la machine,

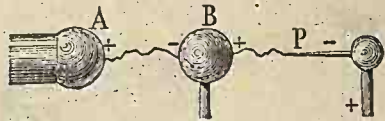


Fig. 1142.



Fig. 1143.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XXVI, p. 310.

<sup>2</sup> *Œuvres de Franklin*, traduction française (1773), t. I, lettre 2.

tourne de même, par l'écoulement de l'électricité de nom contraire dégagée par influence.

La figure 1144 représente une disposition dans laquelle le tourniquet monte en tournant, sur deux tringles inclinées  $ca$ ,  $c'a'$ , isolées par des pieds de verre, et communiquant avec la machine électrique.

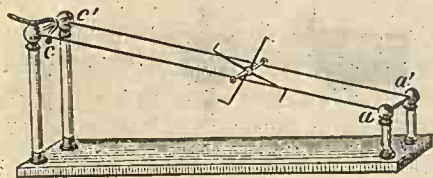


Fig. 1144.

tige métallique traversant la tubulure d'un récipient. Quand cette tige communiquait avec une machine électrique, le tourniquet faisait plusieurs tours, en tordant le fil; mais lorsque l'air avait été extrait du récipient, il n'y avait plus aucun mouvement, même quand l'appareil était recouvert d'une couche de vernis sauf aux pointes, pour que l'électricité ne pût s'échapper que par là. Il arrivait même que le mouvement avait lieu dans le sens de l'écoulement, quand on présentait aux pointes, pour diriger le fluide vers leur extrémité, des lames métalliques non isolées. La présence de l'air est donc nécessaire au mouvement, et on l'explique par la répulsion qui s'exerce entre l'air électrisé et la pointe elle-même, répulsion qui chasse l'air d'une part, comme nous allons le voir, et, de l'autre, fait rétrograder la pointe. Quand le tourniquet est sous une cloche, il s'arrête bientôt, quand tout l'air est électrisé. La rotation a aussi lieu dans l'huile,

liquide mauvais conducteur; mais non dans l'eau.

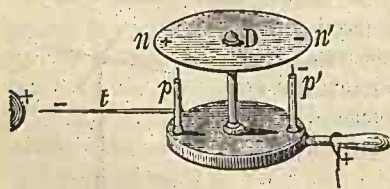


Fig. 1145.

**Mouvement d'un disque par des pointes.** — Dans l'appareil (fig. 1145), imaginé par Ruhmkorff, un disque de mica  $D$ , suspendu par son centre sur un pivot, peut recevoir de l'électricité, de deux pointes isolées  $p'$ ,  $p$ . La première  $p'$  communique avec le sol, et la seconde,  $p$ ,

avec une tige effilée  $t$ , que l'on approche d'une machine électrique positive. L'induction de la machine sur  $tp$  pousse, par la pointe  $p$  du fluide positif en  $n$ , sur le disque  $D$ , tandis que la pointe  $p'$  verse du fluide négatif en  $n'$ . Si la machine n'est pas placée symétriquement par rapport au plan  $pp'$ , le disque tourne; la partie  $n$  la plus rapprochée étant repoussée par la machine, ainsi que l'air, qui alors est chassé obliquement sur la partie  $n$ .

**Poisson de Franklin.** — Une feuille d'or taillée en quadrilatère formé de deux triangles isocèles inégaux réunis par leur base, étant présentée par le gros

bout, ou tête, à un conducteur électrisé, s'en approche en ondulant, et s'arrête à une certaine distance, en oscillant irrégulièrement. Si on la présente par la queue, celle-ci se retourne vers la main qui tient la tête; — placé entre les plateaux de l'appareil à grêle (1597), le quadrilatère se tient la tête en haut, plus près du plateau supérieur que de l'autre. Si les deux moitiés sont égales, se tient à peu près à égale distance des deux plateaux, et l'on a l'expérience dite *du tombeau de Mahomet*. Tous ces résultats sont dus au vent électrique qui se produit aux deux sommets; mais l'explication détaillée en serait très-compiquée.

**1636. Vent électrique.** — Quand l'électricité positive s'échappe d'une pointe, l'air est électrisé et par conséquent repoussé; d'où résulte un courant de gaz, que l'on peut constater, soit en lui présentant la main, auquel cas on sent un léger soufle, nommé *vent électrique*, soit en approchant de la pointe dirigée horizontalement la flamme d'une bougie, qui est repoussée (*fig. 1146*), et peut même être éteinte. On peut encore faire agir ce courant sur une petite roue à ailettes nommée *moulinet électrique*.

M. Neyreneuf a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet<sup>1</sup>. Il remarque d'abord que le vent électrique est fortement augmenté par l'induction des corps qu'on présente à la pointe pour constater le phénomène, et que les effets sont peu prononcés quand la pointe est très-effilée, la tension sur le conducteur qui la porte étant alors très-faible. — Les expériences faites avec une machine de Holtz, sur la flamme du gaz, ont conduit, entre autres, aux résultats suivants :

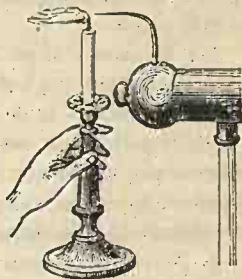


Fig. 1146.

I. *Pointe positive.* — Si la flamme est isolée, le gaz sortant par un tube de verre effilé, la flamme est chassée plus ou moins fortement suivant la distance et la position de la pointe par rapport au bec. — Si le bec est métallique, les effets sur la flamme non isolée sont plus marqués. Il y a à la fois refoulement de l'air, et transport de l'électricité à travers la flamme, vers le bec électrisé négativement par induction, et ce transport entraîne la flamme qui est imparfaitement conductrice, de la pointe positive vers le bec négatif; car, comme nous aurons à le constater plus d'une fois, quand l'électricité est en mouvement dans un fluide peu conducteur, elle l'entraîne, du corps positif vers le corps négatif. Ce résultat peut se voir en plaçant la flamme entre deux plaques conductrices électrisées l'une *en plus*, l'autre *en moins*; la flamme est refoulée vers la plaque *négative*. Si l'on fait agir une pointe sur la flamme très-chaude et très-conductrice d'un bec de Bunsen (II, 1297), l'électricité se précipite sur le bec négatif sans trouver de résistance, et cette flamme n'est pas agitée.

Ces résultats dépendent de la position de la pointe par rapport au bec, et de la

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. II, p. 473.

grandeur de la flamme. Si la pointe, toujours dirigée horizontalement, est au-dessus d'un bec conducteur, la flamme est refoulée, et une partie peu éclairante est rabattue autour du bec. Ce résultat est surtout remarquable dans un bec en couronne, où la flamme peut être renversée tout autour.

II. *Pointe négative*. — Dans le cas d'un bec *isolant*, les résultats sont à peu près les mêmes qu'avec la pointe positive. Mais si l'on amène la pointe au-dessus de la flamme sortant d'un bec *conducteur*, celle-ci s'effile et s'incline vers le bec, au lieu d'être refoulée comme lorsque la pointe est positive; il y a donc comme une attraction vers la pointe, due au transport de l'électricité qui part du bec.

Quand la pointe est présentée vers le milieu de la flamme, le transport produit par le mouvement de l'électricité vers la pointe, contrarie le refoulement produit dans l'air qu'elle a électrisé, et il en résulte des effets complexes qui varient beaucoup avec les circonstances de l'expérience. Par exemple, avec une grande flamme, on voit une partie brillante repoussée et une partie bleue qui se dirige vers la pointe.

Les flammes d'alcool et d'essence de térébenthine donnent à peu près les mêmes résultats que celle du gaz d'éclairage. Mais celles de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone et du sulfure de carbone, dans lesquelles il ne se fait pas de précipité pulvérulent, sont à peine refoulées par une pointe positive, et fortement attirées par une pointe négative; cependant ce dernier effet, très-net pour la flamme d'hydrogène, ne se produit sur celle des deux autres vapeurs qu'avec des flammes de dimensions convenables.

M. Neyrencuf a encore étudié l'effet des pointes sur des poudres étalées sur un disque conducteur horizontal non isolé. Avec du sable sec et fin, une pointe *positive* verticale chasse le sable de tous les côtés, comme le ferait un jet d'air. Il en est de même avec une pointe *négative* suffisamment éloignée. Mais si on la rapproche, il se produit une action centripète; le sable est soulevé vers la pointe, puis en est repoussé, à une certaine hauteur, et est projeté hors du disque. Si la pointe est encore plus rapprochée, le sable forme, autour d'un petit espace mis à nu, un bourrelet circulaire entouré d'une dépression d'où le sable est chassé vers la pointe. Ces effets résultent de l'entraînement de l'air par l'électricité qui se porte vers la pointe négative, et ils viennent à l'appui de l'explication du pouvoir des pointes dans la théorie d'un seul fluide (1633).

#### § 4. — DÉPÉDITION DE L'ÉLECTRICITÉ. PROPAGATION DANS LES MAUVAIS CONDUCTEURS

##### I. Dépédition de l'électricité à travers les gaz.

1637. DÉPÉDITION PAR LE CONTACT DE L'AIR. — Coulomb a laissé sur ce sujet des résultats importants. Il produisait d'abord un certain écart de l'aiguille de sa balance électrique (1618), au moyen d'une balle électrisée, et isolée



complètement par une tige de gomme laque (1620); puis, l'écart diminuant peu à peu par la déperdition due au contact de l'air, il le ramenait à sa première valeur, de 3 minutes en 3<sup>m</sup>, en diminuant la torsion au moyen du micromètre supérieur; et il évaluait les pertes d'électricité, par les diminutions qu'il fallait faire subir à l'angle de torsion. Il a trouvé ainsi que : 1° la déperdition augmente avec l'humidité de l'air; 2° pour un même état de l'air, la déperdition est proportionnelle à la tension électrique; d'où il résulte que le rapport de la quantité perdue à la quantité totale est constant. Cette dernière loi n'est autre chose que la loi de Newton relative à la chaleur (II, 928). Nous verrons (1639) jusqu'à quel point elle est exacte.

Pour vérifier cette seconde loi, on mesure l'angle de torsion  $a$ , puis cet angle,  $a'$ , après un temps  $t$ ; pour les mêmes distances des deux balles de la balance. Si  $t$  est très-petit,  $(a - a') : t$  représentera la diminution de torsion dans l'unité de temps. La torsion moyenne pendant le temps  $t$  étant  $\frac{1}{2}(a + a')$ , la *perte*, rapportée à l'unité de tension sera représentée par  $\frac{2(a - a')}{t(a + a')}$ . Ce rapport a été trouvé le même à toutes les époques de l'expérience, mais il changeait avec l'humidité de l'air.

On peut calculer la quantité d'électricité qui reste sur un corps au bout d'un temps donné, quand on connaît la quantité initiale, et la valeur de  $p$  qui correspond aux circonstances de l'expérience. En effet, comme pour la chaleur, les pertes forment une progression géométrique décroissante, quand les temps forment une progression arithmétique croissante, on a donc

$$[1] \quad a' = am^{-t}; \quad \text{d'où} \quad \log a' = \log a - t \log m \quad [2]$$

$m$  représente le rapport  $a' : a$ , pour  $t = 1$ ; il faut l'exprimer en fonction de  $p$ . Or, si nous prenons la dérivée en signe contraire de la valeur de  $a'$  par rapport à  $t$ , nous aurons la diminution de torsion pendant l'unité de temps, en supposant la charge constante, et nous trouverons  $am^{-t} l \cdot m$ , ou  $a' l \cdot m$ , à cause de [1]. Si nous supposons la charge égale à 1, ou  $a' = 1$ , la dérivée devient  $l \cdot m$ , et représente alors la valeur de  $p$ . Nous avons donc  $l \cdot m = p$ ; ou, en passant aux logarithmes des tables,  $\log m = l \cdot m \cdot \log e = p \frac{1}{M}$ , en représentant le module par  $M$ . Portant dans la formule [2] cette valeur de  $\log m$ , il vient

$$[3] \quad \log a' = \log a - \frac{tp}{M}; \quad \text{d'où} \quad \log e' = \log e - \frac{tp}{2M}, \quad [4]$$

$e$  et  $e'$  étant les quantités d'électricité qui correspondent aux torsions  $a$  et  $a'$ . En effet, les angles de torsion sont proportionnels aux forces répulsives, et celles-ci étant proportionnelles aux carrés des quantités d'électricité, on a  $a = ke^2$ , et  $a' = ke'^2$ ,  $k$  étant une constante.

**1638. Effets électriques dans l'air raréfié.** — Il semble naturel de penser que l'air qui retient l'électricité à la surface des corps conducteurs devrait agir d'autant mieux que sa densité serait plus grande. Mais, s'il en est ainsi pour les fortes tensions, il n'en est plus de même pour celles qui sont faibles. Anciennement, Hauksbée, puis Gray, Dufay, Boyle, avaient vu les attractions exercées sous un récipient, par des corps isolants électrisés, conserver sensiblement leur intensité quand presque tout l'air en était retiré; ce qui peut s'expliquer par l'adhérence de l'électricité à la surface des mauvais conducteurs. Mais depuis on a opéré sur des corps bons conducteurs. H. Davy, ayant suspendu à une tige de platine pénétrant dans une chambre barométrique, deux fils fins de platine ou d'acier, les vit se repousser dans le vide quand il électrisait la tige<sup>1</sup>. Becquerel<sup>2</sup> fixa sous un récipient (fig. 1147) un électromètre *e*, dont le bouton



Fig. 1147.

était remplacé par un plateau métallique, *a*, sur lequel était appliquée une mince lame de verre. Ayant frotté cette espèce d'électrophore avec un petit tampon *f* garni d'or musif, au moyen de la tige *t* qu'il soulevait ensuite, les feuilles d'or s'écartèrent par du fluide positif, et l'écart persista pendant deux jours quand l'air, bien sec, du récipient n'avait que 1<sup>mm</sup> de pression. Ces résultats importants avaient été peu remarqués, lorsque MM. Harris et Riess constatèrent des faits analogues<sup>3</sup>. Une tige de métal pénétrant dans un récipient soutenait dans l'intérieur, une boule de cuivre de 5<sup>cm</sup> de diamètre, et communiquait avec un électromètre placé en dehors. La tige ayant été électrisée, les balles de l'électromètre divergèrent de 40°, et quand le vide eut été fait sous le récipient, la divergence ne changea pas. Les résultats étaient les mêmes quand l'électroscope était sous le ré-

ci-pient. Si l'on approchait de la boule électrisée une autre boule semblable, à l'état neutre, dont la tige traversait une tubulure latérale de la cloche, les balles de l'électromètre se rapprochaient, pour s'écarter de nouveau quand on retirait cette boule.

**1639 Expériences de Matteucci<sup>4</sup>.** — La plupart de ces expériences ont été faites avec la balance électrique (fig. 1148). Sur un plan bien dressé, est posée une cloche à trois tubulures, dans laquelle on peut faire le vide par un tube de plomb *t*. La tubulure du milieu porte le tube à micromètre qui soutient le fil de torsion auquel est suspendue l'aiguille *bm*. À l'une des extrémités de cette aiguille est une petite balle creuse en argent doré, préférable à une balle de sureau peu

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XX, p. 174.

<sup>2</sup> *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. V, 2<sup>e</sup> partie, p. 55.

<sup>3</sup> *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XVII (1838), p. 177.

<sup>4</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 386.

conductrice quand elle est sèche. En *m* est une lame de mica destinée à amortir les oscillations. La tubulure *r* sert à introduire différents gaz, venant d'une vessie *V*, et purifiés et desséchés dans des boules de Liebig. La troisième tubulure fermée hermétiquement, porte la boule isolée *b* en argent doré. La même tubulure donne passage à un tube de verre mince traversé par un fil de cuivre *ff'*, pouvant glisser à travers un lut gras. Des fragments d'acide phosphorique dessèchent l'air de la cloche, qui porte un arc divisé à la hauteur de l'aiguille. Un fil à plomb, *g*, aide à lire les divisions. — Pour électriser les boules, on les met en contact, on enfonce le fil *ff'* de manière qu'il les touche, et l'on électrise l'extrémité *f* avec une très-petite bouteille de Leyde. La boule de l'aiguille est repoussée; aussitôt on décharge le fil *ff'*, et on le retire le plus possible; la boule mobile revient alors sur la boule *b*, et partage avec elle son électricité. Voici les lois trouvées par Matteucci :

1<sup>o</sup> *L'agitation de l'air diminue la perte d'électricité.* Pour établir ce résultat inattendu, la boule *b* était retirée de la balance et laissée à l'air libre pendant 10 minutes, soit à l'état de repos, soit à l'état d'oscillation, au bout d'un fil de soie, soit exposée au vent d'un soufflet. On la reportait ensuite dans la balance pour constater la perte. Par exemple, la torsion primitive étant de 195° et l'écart de 20°, il fallut, pour

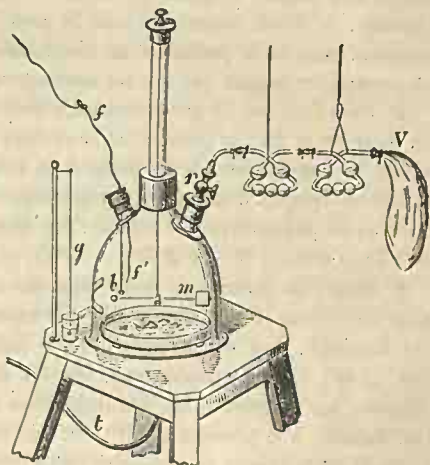


Fig. 1148.

conservier cet écart, réduire la torsion à 105°, quand la boule *b* avait séjourné 10 minutes dans l'air en repos, et à 145° quand l'air avait été agité. — Ce résultat est dû à ce que les molécules de l'air, même le plus sec, enlèvent de l'électricité aux corps, en s'électrisant à leurs dépens, et sont alors repoussées, puis remplacées par d'autres. Or, il faut à ces molécules peu conductrices un certain temps pour s'imprégner d'électricité, de même qu'une balle de résine ne s'électrise en touchant un conducteur que si le contact a quelque durée.

2<sup>o</sup> *La déperdition dépend des corps qui sont en présence de la boule pendant son séjour hors de la balance.* Par exemple, pour un écart de 20° et une torsion primitive de 188°, la boule rapportée dans la balance au bout de 10 minutes, a donné une torsion de 164° après avoir été mise près d'une sphère chargée d'une électricité contraire; 96° seulement, quand cette électricité était de même espèce, auquel cas la perte a été la plus grande; 136°, quand la boule avait séjourné dans un globe creux non isolé; et 105° quand elle était restée simplement à l'air libre.

3° Dans l'air et dans les gaz secs et purs, pour des charges comprises entre certaines limites, la perte est constante. Ce résultat est contraire à celui qu'avait trouvé Coulomb; mais ce dernier n'opérait pas dans l'air sec.

4° La perte est la même dans l'air, l'hydrogène et l'acide carbonique secs, pris à la même température et sous la même pression.

5° La nature du corps électrisé n'influe pas sur la perte de l'électricité et sur la loi de cette perte dans les gaz secs. Coulomb avait constaté cette loi sur une balle de sureau et sur une balle de cire d'Espagne, et Matteucci l'a retrouvée pour une balle métallique et pour une balle de gomme laque.

6° La perte est la même dans les gaz secs, pour l'électricité positive et pour l'électricité négative, quand la tension n'est pas trop forte. Pour les fortes tensions, le fluide négatif se perd le plus rapidement. Belli, avec de fortes tensions, avait vu le pendule d'un électromètre de Henley baisser plus vite sur un conducteur négatif que sur un conducteur électrisé positivement.

7° Dans l'air sec, la perte augmente avec la température. Matteucci n'a opéré qu'entre 0° et 20°, la gomme laque cessant d'isoler vers 40 à 50°. Pour faire varier la température de la balance, il l'entourait de deux espèces de demi-manchons remplis d'un mélange frigorisique ou d'huile chaude, et un peu écartés pour qu'on pût apercevoir l'aiguille. Par exemple, la même déperdition s'est faite en 278 minutes à 0°; en 205<sup>m</sup>, à 13°,5; et en 167<sup>m</sup>, à 22°.

8° Dans l'air humide, la perte augmente avec la quantité absolue d'humidité; mais non en raison du cube du poids de vapeur contenu dans l'air, comme l'avait cru Coulomb. Les expériences ont été faites en remplaçant dans la balance (fig. 1148), l'acide phosphorique, par les mélanges d'eau et d'acide sulfurique employés par Regnault dans ses recherches sur l'hygrométrie (II, 1447). Dans l'air humide, à la pression de 76<sup>cm</sup> et à la température de 13°, quand la force élastique de la vapeur est comprise entre 0<sup>mm</sup>,134 et 3<sup>mm</sup>,699, la perte d'électricité augmente moins vite que la quantité de vapeur; et elle lui est proportionnelle, de 3<sup>mm</sup>,699 à 9<sup>mm</sup>,991. — Des vapeurs bien desséchées de camphre, d'assa-fetida, d'éther et de quelques huiles essentielles très-pures, n'ont pas augmenté la perte de l'électricité dans l'air sec.

9° La perte de l'électricité dans l'air sec est d'autant plus lente que ce gaz est plus raréfié. Nous avons cité les expériences de M. Harris sur ce point (1638); Matteucci les a reprises au moyen d'un appareil différent, et est arrivé aux mêmes résultats. Par exemple, un petit électroscope à feuilles d'or perdait toute sa charge en 3 ou 4 heures dans l'air sec à la pression de 76<sup>cm</sup>, et au bout de 2 jours seulement, dans l'air raréfié à 3<sup>mm</sup>. Ce résultat peut s'expliquer par le moindre nombre des molécules d'air qui touchent le corps électrisé. Matteucci attribue la perte par l'air, à la conductibilité du gaz, transportant l'électricité de molécule à molécule, et il n'admet la répulsion des molécules d'air en contact, que pour les fortes charges; opinion partagée par Faraday.

Ce qui précède suppose que la charge est assez faible pour que la déperdition se fasse lentement et régulièrement. Si elle est forte, il y a d'abord une perte

subite, ou *décharge*, qui limite la charge maximum que l'air peut maintenir sur le conducteur, et celle-ci, comme nous le verrons, est sensiblement proportionnelle à la pression.

## II. De la propagation de l'électricité dans les corps solides isolants.

**1640. Déperdition de l'électricité par les supports isolants.** — Pour évaluer la déperdition d'une balle électrisée, par une tige cylindrique qui la soutient, Coulomb mesurait la perte totale, au moyen de la balance de torsion, et en retranchait la perte due à l'air, calculée au moyen des lois connues (1637), et après avoir observé préalablement la déperdition correspondant à l'état de l'atmosphère. Il est évident que la tige devait isoler complètement, lors de cette dernière observation.

Coulomb a reconnu ainsi que la perte par un support est d'autant plus faible qu'il est plus mince et plus long; ce qui se conçoit facilement. Pour une même substance et pour un diamètre donné, il y a une longueur au-dessus de laquelle l'isolement est complet, et elle est proportionnelle au carré de la charge électrique. Par exemple, l'électricité de la machine du Musée Teyler ne peut être retenue par des colonnes de verre de 1<sup>m</sup>,53 de hauteur, ni par des cordons de soie de 14 mètres, tant la tension est forte. La gomme laque est une des substances qui isole le mieux; une tige de 1<sup>mm</sup> de diamètre, et de 40 à 45<sup>mm</sup> de longueur, isole complètement, pour les charges modérées. Un cordon de soie de même grosseur devrait avoir dix fois cette longueur. Un fil de soie très-fin, trempé dans la cire d'Espagne bouillante, de manière à former une baguette de  $\frac{1}{2}$ <sup>mm</sup> de diamètre et de 15 à 16<sup>cm</sup> de longueur, isole aussi complètement. Il en est de même d'un fil de verre de mêmes dimensions, quand l'air est bien sec, ou quand il est préservé de l'humidité par une couche de vernis.

**1641. Pénétration de l'électricité dans les corps isolants.** — Faraday et Matteucci<sup>1</sup> ont fait beaucoup d'expériences sur ce sujet. Ils ont reconnu que le fluide ne se répand pas seulement à la surface de ces corps, mais qu'il pénètre dans l'intérieur, à une profondeur dépendant de leur nature et de la quantité d'électricité fournie. Par exemple, si l'on appuie une des bases d'un gros cylindre d'acide stéarique sur le conducteur d'une machine électrique et qu'on enlève ensuite tout signe d'électricité en posant cette base sur un plateau métallique ou en fondant la surface dans la flamme d'alcool, et si l'on touche ensuite la base avec une lame métallique non isolée, on trouve bientôt, à la surface, de l'électricité venue des parties intérieures. Un cylindre de soufre qui a reçu de l'électricité positive, puis de la négative, est d'abord électrisé négativement à sa surface; mais au bout d'un certain temps, on y trouve du fluide positif, qui est venu de l'intérieur.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXVII, p. 133.

Quand deux charges électriques contraires sont répandues sur les deux faces d'une lame isolante, les fluides pénètrent encore plus profondément, sous l'influence de leur attraction mutuelle, comme on le constate sur une lame de *spermaceti*, dont on garnit les deux faces de feuilles d'étain qu'on électrise l'une positivement l'autre négativement. Les expériences réussissent également avec des lames de verre minces, si l'on a soin de conserver longtemps les charges électriques, comme Belli l'a aussi reconnu.

Matteucci a encore procédé au moyen de grosses plaques de *spermaceti* garnies de feuilles d'étain, qu'il chargeait faiblement, mais pendant très-longtemps. Ayant ensuite brisé ces plaques au moyen de lames de verre, il put reconnaître que les fragments étaient chargés de fluide positif ou négatif, suivant qu'ils étaient détachés au-dessous de la face positive ou de la face négative. Le *spermaceti*, ou blanc de baleine, étant un peu conducteur, convient particulièrement pour ces sortes d'expériences.

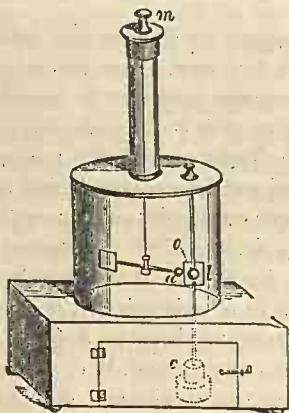


Fig. 1149.

**1642. Quantités d'électricité enlevées par une lame isolante.** — Matteucci a fait de nombreuses expériences, au moyen d'une balance de torsion (fig. 1149), dans laquelle on peut introduire, par dessous, la lame isolante *l*, fixée à une tige de verre portée par un pied *c*. Quand les deux boules électrisées *o* et *a* sont écartées de  $30^\circ$  et en repos, on applique la lame *l*, par son centre, contre la boule *o*, pendant 5 minutes, puis on la retire. On trouve alors que l'écart des boules *a* et *o* a diminué, la lame *l* ayant emporté une partie de l'électricité de la boule *o*. En agissant sur le micromètre *m* de manière à diminuer la torsion du

fil, on ramène l'écart à  $30^\circ$ , et le rapport des angles de torsion donne celui des quantités d'électricité de la boule *o* avant et après le contact de la lame *l*.

Voici les principaux résultats trouvés par cette méthode : 1<sup>o</sup> la quantité d'électricité enlevée par une lame isolante, à une boule métallique électrisée, est plus grande que celle qui serait proportionnelle à la charge de cette dernière, et la dépasse d'autant plus que cette charge est plus forte. 2<sup>o</sup> Pour une même charge, la quantité enlevée est plus grande avec la lame la plus mince et la moins étendue, et ce résultat est d'autant plus prononcé que la charge est plus forte. 3<sup>o</sup> La diminution dans la quantité enlevée quand l'épaisseur augmente, n'est pas proportionnelle à l'augmentation d'épaisseur.

Il résulte de là que la forme d'un corps peu conducteur qui touche une boule métallique électrisée, a une grande influence, à égalité de masse, sur la quantité de fluide enlevée. Par exemple, une lame de soufre de  $25^{\text{cm}}$  carrés de surface et de  $2^{\text{mm}}$  d'épaisseur, enlève, en  $5^{\text{min}}$  à peu près, 4 fois plus d'électricité à la

boule, quand elle la touche par son contour, que lorsqu'elle la touche par le centre d'une de ses faces. La même masse de soufre, mise sous la forme d'un cylindre de 40<sup>mm</sup> de long, terminé par une pointe par laquelle elle touche la boule, lui enlève encore plus d'électricité dans le même temps.

**Influence de la substance de la lame.** — Le soufre et la gomme laque enlèvent à peu près les mêmes quantités d'électricité, mais le verre en enlève beaucoup plus et en quantité différente suivant l'espèce. Il suffit qu'une même lame de verre ait été chauffée et refroidie dans de l'air plus ou moins sec, ou que l'état de sa surface ait été modifié, pour qu'elle produise des effets différents. Si l'on enduit une lame de verre de couches de gomme laque sur ses deux faces, la perte qu'elle produit diminue à mesure que le nombre des couches augmente, et finit par être égale à celle que produirait une lame formée entièrement de gomme laque. Avec les charges qu'employait Matteucci, la couche de vernis devait avoir une épaisseur de  $\frac{1}{4}$ <sup>mm</sup> pour qu'il en fût ainsi.

**Influence de la température.** — Une très-petite augmentation de température diminue notablement le pouvoir isolant des corps. Ainsi, la boule fixe de la balance de Coulomb, qui est complètement isolée par une tige de gomme laque (1640) sous la température de 15 à 20°, ne l'est qu'imparfaitement à 22°. L'influence de la chaleur est moindre sur le soufre, et vers 13° son pouvoir isolant est à peu près le même que celui de la gomme laque. Matteucci ayant enveloppé une boule métallique électrisée de deux hémisphères creusés dans les moitiés d'un cube en gomme laque, trouva que la perte de la boule était exprimée, à 13°, 8, par la fraction  $\frac{4}{57}$ ; et dans un moule semblable en soufre, par  $\frac{1}{51}$ ; la perte dans l'air sec étant  $\frac{1}{337}$  pendant le même temps. Mais à 35°, cette perte fut de  $\frac{1}{21}$  dans le moule de gomme laque, et de  $\frac{1}{40}$ , dans le soufre.

**1643. Différence entre les deux fluides.** — Il résulte d'expériences faites avec les deux espèces d'électricité, que le fluide négatif passe plus facilement que le fluide positif, d'une boule électrisée, sur une plaque de soufre ou de gomme laque qui la touche.

**Figures de Lichtenberg.** — Une expérience ancienne montre la différence de propagation des électricités sur les matières résineuses. On prend un plateau de résine bien uni, et l'on dépose sur sa surface, au moyen d'un bouton et suivant des lignes quelconques, de l'électricité positive. On dépose ensuite et suivant d'autres lignes, de l'électricité négative<sup>1</sup>. On projette ensuite sur le plateau, au moyen d'un petit soufflet, un mélange de poudres fines de minium et de soufre. Les deux poudres s'électrisent en passant par la tuyère du soufflet; le soufre, qui est électrisé négativement, se porte sur les courbes positives, et le minium, sur celles qui sont électrisées négativement. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que les bandes jaunes du soufre présentent des ramifications multipliées et divergentes, tandis que les bandes rouges ont des contours unis;

<sup>1</sup> On se sert ordinairement d'une bouteille de Leyde (1663) dont on a électrisé l'intérieur positivement ou négativement.

ce qui indique une différence dans la manière dont les fluides déposés sur la résine se sont propagés à sa surface.

M. E. Douliot forme des dessins d'une finesse merveilleuse sur des plaques de verre ou d'ébonite bien desséchées, par le moyen suivant. On passe sur la surface une pointe de métal ou de bois, comme pour écrire ou dessiner, puis on projette le mélange de soufre et de minium. Les traits, d'abord invisibles, que le frottement de la pointe a électrisés, sont marqués, en rouge sur l'ébonite, en jaune sur le verre, avec une netteté telle qu'on peut lire l'écriture la plus fine. Si l'on électrise d'avance la lame, et qu'on écrive ensuite avec une pointe *métallique*, les traits apparaissent en jaune sur fond rouge si la plaque a été électrisée négativement, et en rouge sur fond jaune, si elle l'a été positivement; mais les traits ne sont plus aussi nets<sup>1</sup>.

L'expérience des figures de Lichtenberg avait produit d'abord une vive sensation, parce qu'elle faisait ressortir un nouveau caractère distinctif entre les deux électricités. Mais il est facile de voir qu'elle s'explique aussi facilement dans l'hypothèse d'un seul fluide; elle prouverait alors que le fluide unique pénètre dans un corps isolant, ou en sort pour se répandre sur un bouton électrisé *en moins*, avec des facilités différentes.

**1644. CONDUCTIBILITÉ SUPERFICIELLE DES CRISTAUX.** — Les propriétés physiques des cristaux, considérées dans différentes directions, dépendent du système cristallin auquel ils appartiennent. C'est ce que nous avons vu pour l'élasticité (I, 785) pour la conductibilité calorifique et pour la dilatation (II, 969 et 1001). La conductibilité électrique d'un même cristal dans différentes directions est aussi en relation avec l'arrangement moléculaire qu'indique sa forme. Les premiers essais faits à cet égard, n'ont pas réussi. MM. d'Hausmann et Henrici avaient reconnu cependant que le *diopside* conduit le mieux l'électricité dans le sens de son axe cristallographique, et la *diallage*, dans le sens parallèle à ses clivages. De Senarmont a résolu la question par la méthode suivante<sup>2</sup>. Il recouvre la face du cristal, d'une feuille d'étain présentant une large ouverture circulaire à contours nets, obtenue à l'emporte-pièce. Cette feuille, collée avec une dissolution claire de gélatine ou de vernis, se replie de manière à envelopper tout le cristal. Au centre de la partie découverte, s'appuie normalement l'extrémité d'une pointe isolée, par laquelle arrive de l'électricité. Ce fluide sort de la pointe, en rayonnant, glisse sur la surface découverte, et gagne les bords de la feuille d'étain, qui communique avec le sol.

Dans ses premiers essais, De Senarmont faisait passer l'électricité par explosion, et l'étincelle laissait sur la surface du cristal une trace permanente indiquant par sa forme, le sens de la plus facile transmission; mais l'action était trop violente pour qu'on pût distinguer de faibles différences. De Senarmont opéra alors dans l'air raréfié sous un récipient, et fit arriver par la pointe, un

<sup>1</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. II, p. 260.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 257.



flux continu d'électricité *positive* qui se répandait sur la surface du cristal, en formant une couche lumineuse violacée d'une certaine épaisseur. Cette lueur, qui se produit encore quand l'extrémité de la pointe est un peu éloignée de la surface, de 1<sup>mm</sup>, par exemple, s'épanouit régulièrement sur les surfaces homogènes; mais sur les autres, elle affecte la forme d'une bande diamétrale, un peu épanouie à ses extrémités, et dans laquelle on distingue un courant de fluide partant du centre. Cette bande lumineuse oscille un peu autour de sa position d'équilibre; on la rend souvent plus stable en laissant une certaine pression dans le récipient. Quand cette pression est assez grande, on voit des étincelles jaillir à travers la lueur violacée, et l'on peut en conserver la trace sur de la fleur de soufre dont on saupoudre la surface. — Des stries légères, des altérations superficielles modifiant les résultats, surtout si la force directrice est faible, il faut, autant que possible, employer des faces naturelles ou obtenues par clivage. Les stries naturelles des cristaux n'ont pas d'influence, à moins qu'elles ne soient très-prononcées. — L'électricité négative donne toujours des lueurs sensiblement uniformes.

Voici maintenant les résultats donnés par l'expérience :

1<sup>o</sup> Sur les surfaces homogènes, comme des lames de verre, de gutta-percha, de soufre, de gomme laque, de résine coulées sur une glace polie, la pointe positive est entourée d'une lueur uniforme. Si l'on dépolit une partie de la surface avec du papier de verre, la lueur est quelquefois plus vive dans cette partie. Si l'on moule du soufre, de la gomme laque, sur des surfaces de cristaux rugueuses ou striées naturellement, la conductibilité ne présente pas de différences sensibles dans les divers sens; à moins que les stries ne soient de véritables cannelures serrées et profondes, comme sur certains cristaux de fer oxydulé dodécaèdre. Du soufre coulé sur de semblables surfaces paraît laisser passer l'électricité plus facilement dans le sens des stries.

2<sup>o</sup> Les cristaux du système régulier se comportent comme les corps homogènes; la conductibilité est la même en tous sens et sur toutes les faces.

3<sup>o</sup> Les cristaux de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> système, qui sont symétriques autour d'un axe, offrent une conductibilité égale en tout sens, sur les faces normales à l'axe. Sur les faces obliques à l'axe, il y a une direction de conductibilité maximum, tantôt perpendiculaire, tantôt parallèle à la projection de l'axe sur ces faces.

4<sup>o</sup> Une face quelconque des cristaux des autres systèmes présente une direction de conductibilité maximum. Quand la face contient un ou deux axes de symétrie, cette direction lui est perpendiculaire ou parallèle.

Ces lois ont été constatées sur 36 substances différentes. Quelques résultats ont été douteux, mais aucun n'a été contradictoire.

M. Wiedemann a fait des expériences analogues sur une douzaine de cristaux, à peu près à la même époque que De Senarmont<sup>1</sup>. Il procédait en saupoudrant la surface, d'une poussière fine peu conductrice, comme du lycopode ou du

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXIX, p. 227.

minium ; puis, il faisait arriver l'électricité positive par une pointe, et il voyait la poudre s'éloigner de la pointe dans toutes les directions, et laisser un espace à découvert. Si la lame était homogène, cet espace était circulaire ; mais sur les faces de certains cristaux, il prenait la forme d'une ellipse dont le grand axe avait deux ou trois fois la longueur du petit. — Le fluide négatif ne donnait que des figures petites et mal définies.

### III. Polarisation des corps diélectriques. — Pouvoir inductif.

**16-15. Polarisation dans les corps mauvais conducteurs.** — Quand un corps mauvais conducteur est soumis à l'action d'un corps électrisé, il prend un état électrique intérieur dans lequel ses molécules présentent les électricités contraires, en deux points opposés de chacune d'elles. Cet état électrique est analogue à l'état magnétique que prend le fer doux sous l'influence d'un aimant, et détermine deux pôles électriques analogues aux pôles des aimants. Ce phénomène, a été découvert par Avogrado, Belli et Faraday, qui l'a désigné sous le nom de *polarisation électrique*, Matteucci, procédait ainsi : on suspend par un fil de cocon, dans une grande cage de verre bien desséchée, des baguettes d'acide stéarique, gomme laque ou soufre, de 8 à 10<sup>mm</sup> de longueur et de 2<sup>mm</sup> d'épaisseur, et l'on approche un corps électrisé de l'extrémité d'une de ces baguettes à l'état naturel. On la voit s'approcher et osciller, comme une tige de fer en présence d'un aimant. On peut reconnaître alors que l'extrémité de la baguette la plus rapprochée du corps est électrisée d'une manière contraire, tandis que l'extrémité opposée est électrisée de la même manière. Quand on enlève le corps, l'aiguille revient aussitôt à l'état neutre. — Dans cette expérience, comme dans celles qui suivent, il faut prendre des précautions minutieuses pour être certain de l'état neutre des baguettes. Matteucci les faisait chauffer sur des charbons ardents, et les laissait refroidir dans l'air sec. Quand elles étaient fusibles, il se contentait d'en fondre légèrement la surface dans une flamme d'alcool.

Si l'on électrise l'une des faces d'une plaque isolante, on trouve la face opposée électrisée d'une manière contraire, comme cela a lieu dans l'électrophore (1611). Nollet avait déjà remarqué que, lorsqu'on frotte extérieurement un ballon de verre dans lequel on a fait le vide, on aperçoit des lueurs dans l'intérieur. L'expérience des figures de Lichtenberg (1643) peut aussi servir à mettre ces résultats en évidence. Si l'on remplace le plateau de résine par une lame de verre mince vernie à la gomme laque sur ses deux faces, et qu'on opère comme à l'ordinaire, on obtient, en projetant le mélange de soufre et de minium sur la face opposée à celle sur laquelle on a promené le bouton électrisé, des lignes présentant des couleurs opposées à celles de l'autre face.

Pour montrer directement la polarisation électrique, Matteucci serra entre deux plaques métalliques, des feuilles minces de mica superposées; ayant ensuite séparé ces feuilles, en se servant de tiges de verre, il trouva sur leurs deux faces des états électriques différents, allant en diminuant d'intensité des lames externes à celles du milieu. Cependant, quand le système restait longtemps et fortement chargé, il y avait pénétration des électricités (1641), et chaque feuille de mica possédait le même fluide sur ses deux faces, mais en quantité d'autant plus petite que la feuille était plus éloignée des plaques métalliques.

M. Buff, ayant superposé quatre disques de résine très-minces, et frotté la face supérieure du plateau ainsi formé, vit la face inférieure s'électriser d'elle-même positivement, et les disques présenter, après la séparation, des états électriques contraires sur leurs deux faces.

Matteucci, ayant interposé entre les balles de deux pendules électrisés d'une manière contraire, une lame isolante, a vu les boules se rapprocher aussitôt par l'effet de l'électricité polaire qu'elles y avaient développée. On peut encore interposer la lame isolante entre le bouton d'un électroscope à cloche (1598) et le corps électrisé qui fait diverger les feuilles; on voit celles-ci diverger davantage. M. A. Pacinotti, au moyen d'un électromètre bifilaire semblable à la balance de Harris (1622), a reconnu qu'une sphère électrisée attire plus faiblement une balle de gomme laque creuse qu'une balle massive de même matière et de même grosseur; ce qui montre que l'induction polaire peut se faire sentir jusqu'au centre.

Citons encore l'expérience suivante de Faraday : on fait flotter dans de l'essence de térébenthine, de petits filaments de soie de 2 ou 3<sup>mm</sup> de longueur. On plonge dans le liquide deux pointes métalliques, dont une est électrisée et l'autre en communication avec le sol; on voit alors les filaments se disposer suivant la direction des pointes, de manière à former des séries continues. Les filaments se tiennent assez fortement pour qu'on ait quelque peine à les séparer au moyen d'une tige isolante; ils indiquent l'état électrique des molécules de l'essence qui les soutient. Des parcelles de sucre ou de feuilles d'or peuvent remplacer les filaments de soie, et l'on voit alors de petites étincelles qui passent d'une parcelle à l'autre.

Les gaz peuvent éprouver aussi la polarité électrique, comme nous le verrons, quand nous parlerons des aigrettes électriques.

**1646. Déplacement des fluides dans l'intérieur des corps.** — Tandis que, dans les corps magnétiques, les fluides séparés ne quittent pas les éléments magnétiques, dans les corps isolants, l'électricité polaire peut passer d'une molécule à l'autre avec une facilité qui dépend de la conductibilité de ces corps et de l'intensité de l'action exercée. Dans les *bons conducteurs*, la polarisation moléculaire se produit d'abord, mais les électricités quittent aussitôt les éléments électriques, par des décompositions et recompositions successives, pour se transporter à la surface du corps; de manière que l'état électrique moléculaire est détruit presque aussitôt que produit.

La polarisation électrique et la faculté qu'ont les électricités de quitter les molécules polarisées vont nous servir à expliquer divers phénomènes.

1<sup>o</sup> Si, comme l'a fait Matteucci, on électrise la balle métallique de l'aiguille d'une balance électrique, et qu'on en approche une sphère de gomme laque, soufre ou verre à l'état naturel, on voit la balle de l'aiguille se précipiter vers le corps isolant, qui a pris l'électricité polaire, y adhérer pendant quelque temps, puis être repoussée. Si la balle est à l'état neutre et la boule isolante électrisée, l'attraction est plus vive, et il faut plus de temps pour que la répulsion se manifeste. Ces expériences montrent que l'électricité entre difficilement dans la substance isolante, et s'en sépare lentement.

2<sup>o</sup> Une lame de soufre, gomme laque ou acide stéarique, touchée avec une boule isolante électrisée, prend au point de contact du fluide contraire à celui de la boule, comme *Æpinus* l'avait déjà remarqué, et, autour de ce point, on trouve une zone chargée de fluide de même nom. Ce n'est qu'avec de fortes charges et après un contact prolongé, que la lame touchée ne présente que l'espèce de fluide de la boule électrisée. Si cette boule est bonne conductrice, la lame prend bientôt la même électricité qu'elle au point de contact, surtout si elle est mince et d'un petit diamètre. Si le contact ne durait que très-peu de temps, et si la lame avait une grande masse, l'électricité pourrait être de nom contraire à celle de la boule.

**1647. Électricité polaire dans les différentes substances.** — La décomposition électrique moléculaire n'a pas lieu au même degré dans les différentes substances isolantes. Matteucci s'en est assuré par la méthode des oscillations, en faisant agir sur la balle électrisée d'une balance de Coulomb bien desséchée, des sphères égales de verre, résine, soufre à l'état neutre, et placées à la même distance. Les sphères, qui avaient 15<sup>cm</sup> de diamètre, étaient placées sur une règle glissant dans une coulisse.

Voici les principaux résultats obtenus : un ballon de verre et une sphère de métal de même diamètre ont exercé sensiblement la même action sur la balle oscillante, le ballon étant vide ou rempli d'un liquide conducteur ou non. Des sphères de résine et de soufre ont donné des attractions moindres. L'attraction d'une sphère de plomb étant représentée par 1, celle du globe de soufre a été 0,6, et celle du globe de résine, 0,47; la distance des centres du globe et de la balle étant de 10<sup>cm</sup>. Quand cette distance augmente, l'attraction du globe métallique baisse plus rapidement que celle des sphères isolantes, et les différences deviennent moindres. Il en est de même quand on diminue les diamètres des sphères; quand elles n'ont que 5<sup>cm</sup> de diamètre, la différence entre le soufre et le plomb est très-petite. La nature de l'électricité de la balle oscillante ne paraît pas avoir d'influence.

**1648. Effet de la structure.** — Quand on place entre deux conducteurs électrisés d'une manière opposée, une lame circulaire suspendue horizontalement par son centre, elle reste en équilibre dans une position quelconque, si elle est homogène; mais il n'en est plus de même quand elle est taillée dans un cristal

n'appartenant pas au système régulier. M. Knoblauch a fait de nombreuses expériences sur ce sujet<sup>1</sup>. Les conducteurs électrisés étaient représentés par les pôles d'une *pile sèche* de 2,000 couples formés de papier argenté et de peroxyde de manganèse, appareil que nous décrirons plus tard. Voici les principaux résultats observés : 1° Des plaques de *nitre*, *spath d'Islande*, *carbonate de fer*, taillées *parallèlement* à l'axe du cristal, se placent de manière que cet axe soit perpendiculaire à la ligne des pôles ; 2° l'axe se place suivant cette ligne, avec le *béryl* et la *tourmaline* ; 3° une plaque de *sulfate de baryte* ou de *gypse* taillée *parallèlement* au plan du clivage principal se dirige de manière que la petite diagonale du losange déterminé par les clivages secondaires soit perpendiculaire à la ligne des pôles. — Il faut éviter que le bord de la lame ne prenne par influence de l'électricité permanente, qui la ferait rester dans une position fixe. L'aragonite, le quartz et la topaze sont surtout sujets à cet inconvénient.

M. Knoblauch a obtenu des résultats analogues avec des corps fibreux, comme le bois, l'ivoire, et avec des poudres diverses, de verre, sulfate de baryte, oxydes métalliques, craie, bismuth, antimoine, etc., liées par de l'eau gommée, puis comprimées fortement. Des lames circulaires taillées *parallèlement* à la direction de la compression se sont toujours placées de manière que cette direction fût perpendiculaire à la ligne des pôles.

**1649. Polarisation dans l'induction.** — Le développement de l'électricité polaire a évidemment lieu, pendant l'induction électrostatique (1591), dans la substance isolante qui sépare toujours le corps électrisé du conducteur sur lequel il agit. Cette électricité polaire du milieu interposé doit ensuite réagir sur l'état électrique du conducteur, et d'une manière variable, suivant la nature de ce milieu. L'expérience suivante, due à Faraday, met ce fait en évidence :

Deux disques métalliques B, C (*fig. 1150*), communiquant avec le sol, sont placés de part et d'autre et à la même distance d'un plateau A électrisé positivement. Les deux disques C et B se chargent par influence de fluide négatif, qui se trouve tout entier sur leur face intérieure. Si l'on supprime la communication de ces disques avec le sol, et qu'on place entre A et B une lame isolante *rr'*, on trouve aussitôt du fluide positif sur la face extérieure de B, et du fluide négatif en c. Ce résultat montre l'influence du milieu interposé ; car il n'y a de changé qu'une lame d'air, remplacée par une lame solide. Pour l'expliquer, remarquons que la lame *rr'* prend, sous l'influence de l'électricité de A, un état polaire dans lequel elle agit comme si elle était électrisée positivement sur la face *r* et négativement sur la face *r'*. Le fluide positif qui agit en *r* augmente la décomposition du fluide neutre de B, en donnant naissance au fluide positif que

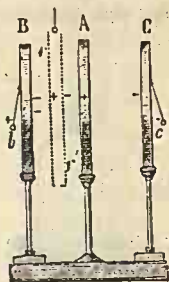


Fig. 1150.

<sup>1</sup> Ann. de Pogg., t. LXXXIII, p. 289 ; et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> s., t. XXXIV, p. 417.

l'on trouve en  $b$ . Le fluide négatif qui agit en  $r'$  attire vers lui le fluide positif du disque A, d'où il résulte une diminution d'action sur le disque C, dont une partie du fluide négatif se répand en  $c$ . Dès qu'on retire la lame  $rr'$ , les pendules  $a$  et  $b$  retombent.

**Inductionomètre différentiel.** — Dans l'expérience précédente, on trouve que l'effet est plus marqué avec une lame de soufre qu'avec une lame de gomme laque; ce qui se voit facilement en interposant des lames égales de ces substances, l'une entre A et B, l'autre entre A et C; le résultat est, avec une moindre intensité, celui que produirait la lame de soufre seule. Faraday, pour rendre les résultats plus faciles à apprécier, au lieu de suspendre simplement des pendules aux plateaux B et C, les fait communiquer respectivement avec les feuilles d'or  $b$  et  $c$  (fig. 1151) écartées et isolées l'une de l'autre, d'un électroscope particulier V; on voit ces feuilles d'or s'incliner l'une vers l'autre sous l'influence des plus petites quantités d'électricité, et l'on constate de quelle espèce d'électricité elles sont chargées. Faraday a nommé l'appareil ainsi modifié, *inductionomètre différentiel*.

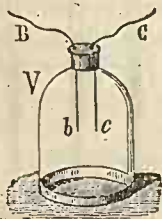


Fig. 1151.

**1650. Des corps diélectriques et du pouvoir inductif.** — Longtemps, on a regardé les substances isolantes qui séparent les conducteurs pendant l'induction, comme purement passives. Nous voyons que ces substances jouent un certain rôle, par l'électricité polaire qu'elles prennent sous les influences réunies du corps électrisé inducteur et du corps induit. Pour rappeler ce rôle actif des corps isolants, Faraday les nomme *corps diélectriques*. Comme ces corps ne produisent pas tous des effets également

marqués, il a été conduit à comparer les *capacités inductives* ou les *pouvoirs inductifs* des diverses substances isolantes. Voici comment l'*inductionomètre différentiel* se prête à cette comparaison, en s'appuyant sur ce résultat de l'expérience que l'induction électrique entre deux disques métalliques très-grands par rapport à leur distance est sensiblement en raison inverse de l'épaisseur de la couche d'air qui les sépare. On interpose entre les plateaux B, A (fig. 1150) la lame  $rr'$  d'épaisseur  $e$ ; il y a augmentation d'influence du côté B, la lame remplaçant une couche d'air d'épaisseur  $e$ ;  $i$ , en appelant  $i$  son pouvoir inductif comparé à celui de l'air. On écarte alors le disque B d'une quantité  $d$ , telle que l'induction étant la même sur les plateaux  $b$  et  $c$ , les feuilles d'or redeviennent verticales. Alors, c'est comme si l'on avait remplacé entre A et B une couche d'air d'épaisseur  $e$  par une autre d'épaisseur  $\frac{e}{i} + d$ , et l'on a  $e = \frac{e}{i} + d$ , d'où l'on tire  $i = \frac{e}{e-d}$ . Comme  $d$  est toujours plus petit que  $e$ , la valeur de  $i$  est positive.

Faraday a encore comparé les pouvoirs inductifs, au moyen de l'appareil (fig. 1152). Il consiste en une sphère métallique  $c$ , placée au centre d'une

enveloppe sphérique en métal, qui en est isolée par une colonne de gomme laque et peut se séparer en deux suivant un grand cercle horizontal  $ab$ . La sphère intérieure et l'enveloppe  $ab$ , sont séparées par un espace que l'on peut remplir de divers gaz, par le robinet que porte le pied de l'appareil. On peut aussi le remplir de substances solides, travaillées en forme de calottes hémisphériques s'appliquant exactement sur les deux surfaces sphériques, et que l'on introduit en séparant les deux hémisphères, en  $ab$ .

Pour comparer les pouvoirs inductifs de l'air et d'un autre diélectrique, par exemple la gomme laque, on emploie deux appareils identiques, l'un contenant de l'air, et l'autre de la gomme laque. On charge le premier, en faisant communiquer le bouton B avec une machine électrique, et l'enveloppe extérieure, avec le sol; et au moyen du plan d'épreuve appliqué en B, on détermine la tension  $T$  de l'électricité libre du bouton B, c'est-à-dire de celle qui n'est pas retenue dans la sphère par l'attraction de l'enveloppe. On fait ensuite communiquer les boutons des deux appareils, de manière que la charge du premier passe en partie dans l'autre, puis on supprime la communication. On trouve alors que la tension  $T'$  de l'électricité libre, dans l'appareil à air, est beaucoup plus petite que  $\frac{1}{2}T$ ; ce qui montre que l'appareil à gomme laque a enlevé plus de la moitié de l'électricité de l'autre appareil, tandis que le partage eût été égal si les deux appareils eussent été remplis d'air.

Pour déduire de l'expérience, le pouvoir inductif de la gomme laque, celui de l'air étant pris pour unité, il faut remarquer que la tension du fluide libre en B, sur l'appareil à gomme laque, est  $T'$  comme sur l'appareil à air, puisqu'il y a eu communication. Or, la quantité d'électricité libre perdue par ce dernier est  $T - T'$ ; et si la condensation se fût faite dans le premier comme s'il eût été rempli d'air, la quantité d'électricité qu'il eût accumulée eût donné lieu à une tension d'électricité libre égale à  $T - T'$ ; mais cette tension n'est que  $T'$ , moindre que  $\frac{1}{2}T$ ; les forces inductives de l'air et de la gomme laque sont donc entre elles comme  $(T - T') : T'$ ; car, comme nous allons le voir en traitant du condensateur, pour une même quantité totale  $P$  d'électricité, la force condensante  $P : v$  est en raison inverse de la quantité  $v$  d'électricité libre (1656). On déterminera donc le pouvoir inductif  $x$  de la gomme laque par rapport à l'air en écrivant la proportion  $1 : x = T' : (T - T')$ . Comme vérification, Faraday a fait l'expérience inverse, en chargeant d'abord l'appareil à gomme laque, et le mettant en communication avec celui qui contenait l'air : il a trouvé la tension du bouton du premier, plus grande que la moitié de sa tension primitive.

**1651. Remarques.** — Les nombres trouvés pour les pouvoirs inductifs, par différents physiciens, Harris, Masson, Belli, Siemens, Rossetti..... sont

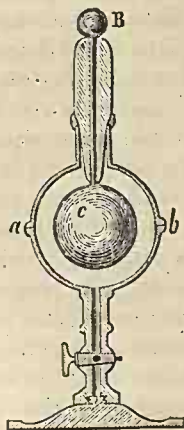


Fig. 1152.

loin d'être d'accord. Le pouvoir de l'air étant pris pour unité, celui du *spermacéti* oscille entre 0,78 et 2,25, et celui du verre, entre 3,35 et 7,83; en outre, Matteucci a trouvé ce dernier plus faible que celui du *spermacéti*.

Des expériences de M. Muller et de M. Knochenhauer, faites en interposant une lame isolante entre un électroscope à feuille d'or et une boule électrisée placée au dessus, ont donné des résultats opposés à ceux qu'on aurait pu prévoir. Mais, comme le fait remarquer M. Mascart, cet effet peut provenir de l'emploi de larges lames, tandis que Faraday employait trois plateaux égaux.

Quant aux discordances citées ci-dessus, on serait tenté de les attribuer aux incertitudes qu'apporte, comme l'a remarqué M. Félici, l'électricité qui peut pénétrer dans la plaque diélectrique, quand les surfaces sont en contact, ou à travers l'air quand elles ne se touchent pas. Les expériences de Matteucci tendraient même à faire attribuer à un semblable effet, une grande partie de la différence entre les pouvoirs diélectrique des diverses substances : Les boules électrisées de la balance électrique (*fig. 1148*) ayant été écartées, on engage entre elles une lame isolante dont une des faces est garnie d'une feuille d'étain communiquant avec le sol, et dont l'autre s'applique sur la boule fixe. On voit aussitôt la balle mobile se rapprocher; et, en détordant le fil pour revenir à l'écart primitif, on peut évaluer la force répulsive qui reste. Quand on ôte ensuite la lame isolante, après 5 minutes de contact, on évalue de même la quantité d'électricité enlevée par cette lame, en reproduisant encore l'écart primitif. On peut comparer ainsi les degrés d'induction de différentes lames interposées entre les deux boules. On trouve d'abord que les répulsions électriques pendant le contact, et après qu'on a enlevé la lame, sont beaucoup plus faibles quand elle est armée d'une feuille d'étain que lorsqu'elle est nue; ce qui montre encore que la perte est due à la pénétration des fluides, et que les différences observées dans la comparaison des pouvoirs inductifs pourraient bien provenir, en grande partie, d'une cause semblable.

Pour vérifier cette conjecture, Matteucci construisit une petite caisse, avec des feuilles de mica laissant entre elles un espace de 10<sup>mm</sup>, et ayant recouvert les deux faces de cette caisse, d'une couche de gomme laque de 2<sup>mm</sup>,5 d'épaisseur, il opéra comme nous venons de le dire, avec cette caisse pour lame isolante. Il répéta ensuite l'expérience, après avoir coulé du soufre dans l'intérieur, qui d'abord ne contenait que de l'air; et les résultats furent les mêmes. Les parties intérieures n'eurent donc pas d'influence, ce qui est en contradiction avec la supposition que l'induction est produite par la polarité du diélectrique interposé. Des expériences faites avec une lame de soufre, ou avec des lames de verre ou de gomme laque recouvertes d'une couche de soufre suffisamment épaisse, ont conduit à la même conclusion.

Ajoutons qu'il résulte de l'expérience, que les divers gaz comprimés ou raréfiés et à des températures de 0° à 200°, ont les mêmes pouvoirs inductifs.

**1652. De la théorie de l'induction de Faraday.** — Il est incontestable que le milieu isolant interposé entre deux conducteurs, joue un rôle actif dans



l'induction. Faraday va plus loin; il considère ce milieu comme nécessaire au phénomène, et ce ne serait que par suite d'une décomposition moléculaire d'électricité neutre se propageant de proche en proche avec une rapidité extrême, que l'induction se produirait à distance. En partant de là, il a été conduit à repousser les actions à distance à travers les milieux pondérables (si ce n'est à la distance des molécules), et il les ramène à des effets d'induction se manifestant par la polarisation électrique. De plus, l'état électrique absolu d'un corps ne pourrait exister sans qu'il y ait à l'extérieur, des corps conducteurs ou isolants dans un état électrique opposé; de même qu'un ressort ne peut être tendu et prêt à agir qu'autant qu'il existe une réaction égale à l'action dont il est capable, et exercée en sens contraire sur quelque obstacle. Dans cette théorie, l'accumulation de l'électricité à la surface des conducteurs ne serait qu'apparente. On ne trouverait pas d'électricité dans l'intérieur, parce que toutes les particules s'y neutraliseraient mutuellement, tandis que l'électricité serait sensible à la surface, dont tous les points reçoivent l'induction du milieu extérieur. Si cette électricité est plus marquée aux parties saillantes, aux pointes, c'est que l'induction des corps environnants s'y fait sentir dans un plus grand nombre de directions. Les corps électrisés de la même manière s'écartent, par l'attraction des molécules polarisées du milieu ambiant, ou des corps placés en dehors de part et d'autre, qui sont constitués, par induction, dans un état électrique opposé. Cependant, Faraday admet l'induction à distance, dans le cas où est interposé un espace vide.

Nous ne donnerons pas de plus longs détails sur cette théorie, dont le point de départ est la polarisation des diélectriques. Mais il règne encore tant d'incertitudes sur les pouvoirs inductifs des diélectriques, de plus comme Faraday a lui-même admis l'induction à travers le vide, nous pensons que l'explication de l'induction par les actions à distance, de deux ou d'un seul fluide, est toujours celle qui rend le mieux compte de l'ensemble des phénomènes. Le fait de la polarisation moléculaire dans les corps isolants ne lui est pas contraire, et vient même la compléter, en montrant comment les deux électricités prennent naissance (dans la théorie de Franklin, comment le fluide unique est déplacé) autour des molécules, pour les quitter et venir à la surface quand le corps est bon conducteur.

## § 5. — CONDENSATION ÉLECTRIQUE

### I. Théorie du condensateur.

**1653.** La charge que peut recevoir un conducteur isolé dépend de la puissance de la machine qui sert à le charger, et le maximum de son potentiel (1631) est limité par celui que peut maintenir la machine malgré les différentes causes de déperdition. Quand on veut, avec une machine médiocre, obtenir de fortes décharges pour produire des effets intenses, on accumule dans des appareils spéciaux, nommés *condensateurs*, des quantités d'électricité beaucoup

plus considérables que celles qu'ils pourraient contenir par eux-mêmes. Nous allons exposer la théorie du condensateur, en nous appuyant sur l'hypothèse des deux électricités. Il sera facile au lecteur d'appliquer à la même question la théorie d'une seule électricité, en se reportant à ce que nous avons dit pour expliquer la décomposition par influence dans le système de Franklin (1592).

**1654. De l'électricité dissimulée.** — Considérons une lame isolante *cc* (fig. 1153), sur laquelle sont appliqués deux minces plateaux métalliques AA et BB un peu plus petits, isolés et munis de pendules *a* et *b*. Faisons communiquer par un fil le plateau A avec une machine électrique, et négligeons pour le moment l'induction qui peut se faire dans la lame isolante. Le plateau A se charge d'électricité, que nous supposons positive, et la charge atteint son maximum quand le potentiel est égal à celui de la machine, et le pendule *a* s'écarte. En même temps, on voit le pendule *b* s'écarter aussi, par suite de la décomposition par influence qui se fait dans le plateau B. Mais le pendule *b* s'écartere moins que le pendule *a*; car il y a moins de fluide positif en B qu'en A (1591).

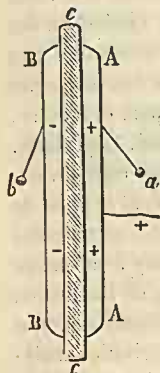


Fig. 1153.

Supposons maintenant que, après avoir séparé de la machine le plateau A, on fasse communiquer B avec le sol. On verra aussitôt le pendule *b* retomber tout à fait, le fluide positif de B passant dans le sol; mais, en même temps, le pendule *a* s'abaissera notablement. Pour expliquer ce dernier résultat, remarquons que l'électricité de A, obéissant à l'attraction du fluide négatif resté seul sur B, se portera vers la lame isolante; de sorte qu'il n'en restera que très-peu sur la face extérieure de A. Cet effet ne pouvait avoir lieu auparavant, parce que le fluide positif de B contrebalançait l'action du fluide négatif, et d'autant plus complètement que le plateau B est plus mince.

Du reste, toute l'électricité de A n'est pas retenue ainsi contre la lame isolante: en effet, il y a moins de fluide négatif en B que de fluide positif en A; une partie de ce dernier se porte donc d'abord vers la lame isolante, puis s'oppose, par répulsion, à l'arrivée d'une nouvelle quantité de fluide de même nom. La portion qui restera, sera aussi fortement repoussée qu'attirée par le fluide négatif de B; elle sera donc complètement libre, et, comme le fluide qui l'attire est plus éloigné d'elle que le fluide qui la repousse, ce dernier sera en moindre quantité que celui de B. L'électricité du plateau A sera ainsi divisée en deux parties: l'une libre, l'autre attirée vers la lame isolante et ne produisant pas de tension à l'extérieur. Celle-ci se nomme *électricité dissimulée* ou *latente*, expressions qui ne veulent pas dire que cette électricité a perdu ses propriétés ordinaires, mais simplement qu'elle ne produit pas d'effets extérieurs, son action étant contrebalancée par celle de l'électricité du plateau opposé. On voit que toute l'électricité du plateau B est dissimulée.

La quantité d'électricité qui reste libre en A possède un potentiel beaucoup plus faible que celui qui avait lieu avant qu'on eût fait communiquer B avec le sol; il est donc actuellement moindre que celui de la machine électrique. Si donc on la fait de nouveau communiquer avec le plateau A, elle fournira de nouvelle électricité, jusqu'à ce que le potentiel en A soit de nouveau égal à celui des conducteurs de la machine. Cette nouvelle électricité déterminera une nouvelle décomposition par influence dans le plateau B, et le pendule *b* s'écartera. Si ensuite, après avoir supprimé la communication de A avec la machine, on fait communiquer B avec le sol, le pendule *b* retombera, et le pendule *a* se rapprochera, parce que la plus grande partie du fluide positif reçu en second lieu par le plateau A, sera rendue latente par la nouvelle quantité de fluide négatif produite par influence sur B. Il y aura donc en A une plus grande quantité d'électricité positive dissimulée, et aussi une plus grande quantité de fluide libre, qu'avant la seconde opération. On voit aussi que l'électricité négative de B sera entièrement dissimulée, et qu'elle sera en plus grande quantité que celle qui est dissimulée en A. — En répétant de nouveau la même série d'opérations, on fournira aux deux plateaux A et B de nouvelles quantités d'électricité, et l'on en *condensera* ainsi des quantités énormes, qu'ils n'auraient pu recevoir s'ils n'avaient pas été en présence l'un de l'autre.

#### 1655. Condensateur. —

A cause de cette propriété, le système des deux plateaux conducteurs séparés par une lame isolante a reçu le nom de *condensateur électrique*. Les plateaux se nomment les *armatures* du condensateur. Celui qui reçoit directement l'électricité s'appelle *plateau collecteur*; l'autre, *plateau condenseur*.

**Condensateur d'Épinus.** — Pour suivre facilement toutes les phases des opérations que nous avons décrites, on emploie un condensateur à plateaux mobiles A, B (*fig. 1154*), soutenus par des colonnes de verre P, P', et munis d'électromètres *a*, *b*. Ces plateaux peuvent être éloignés ou rapprochés l'un de l'autre au moyen de la manivelle *m* et de deux crémaillères fixées aux pieds des colonnes et représentées à part en *e*, *e'*. La lame isolante I est formée d'une plaque de verre, qui peut s'enlever, et est alors remplacée par une couche d'air. Si, dans ce cas, on écarte les plateaux A et B, les électricités qui se trouvaient retenues à leur surface intérieure deviennent libres, et les pendules s'écartent, pour retomber quand on les rapproche.

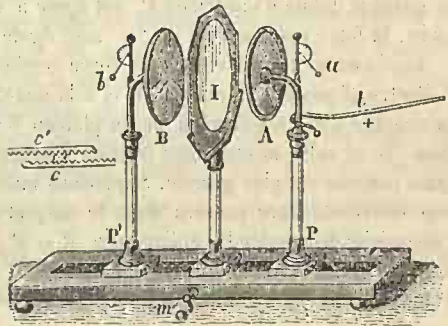


Fig. 1154.

**Manière de charger le condensateur.** — Pour charger un condensateur, au lieu de procéder par intermittences, comme nous l'avons supposé dans l'explication précédente, on fait communiquer un des plateaux avec le sol, et l'autre avec la machine électrique, qui lui fournit l'électricité d'une manière continue.

**Limite de charge.** — Les quantités d'électricité que l'on peut accumuler dans un condensateur sont limitées par deux causes : 1° la quantité d'électricité libre augmentant graduellement sur le plateau A, il arrivera un moment où le potentiel y sera égal à celui de la machine électrique, qui, dès lors, ne pourra plus lui céder d'électricité ; 2° il peut arriver, avant qu'on ait atteint ce maximum de charge, que la lame isolante ne puisse résister à l'attraction des deux fluides accumulés de part et d'autre ; alors ces fluides se combinent à travers cette lame, qui est percée.

**1656. Force condensante.** — On nomme ainsi le rapport entre la quantité totale d'électricité que contient le plateau collecteur, et celle qu'il recevrait s'il ne faisait pas partie d'un condensateur ou, ce qui revient au même, celle qui reste libre quand l'appareil a reçu son maximum de charge. Si, par exemple, la quantité totale d'électricité  $P$ , est égale à 100 fois la quantité  $v$  d'électricité libre, la force condensante  $P : v$  sera égale à 100.

Voici comment Biot calcule la force condensante <sup>1</sup> : Soit  $P$  la quantité totale d'électricité positive du plateau A, et  $v$  la quantité d'électricité libre ; soit aussi  $N$  la quantité d'électricité négative du plateau B ;  $N$  sera moindre que  $P$  ; on aura donc  $N = mP$ ,  $m$  étant une fraction d'autant plus petite que l'épaisseur de la lame isolante est plus grande. Supposons maintenant qu'on touche le plateau A ; son électricité libre passera dans le sol, et il ne restera sur ce plateau que l'électricité dissimulée  $P'$ , et l'on aura  $P - P' = v$ . La quantité  $N$  du plateau B sera alors plus grande que  $P'$  (1591), et l'on aura  $P' = mN = mP^2$ , en remplaçant  $R$  par sa valeur. La quantité d'électricité libre est donc

$$[1] \quad v = P - P' = P(1 - m^2), \quad \text{d'où l'on tire} \quad \frac{P}{v} = \frac{1}{1 - m^2},$$

pour la force condensante. Par exemple, si  $m = 0,99$ , c'est-à-dire si 100 d'électricité positive du plateau A condense 99 de fluide négatif sur le plateau B, on aura  $P : v = 50,25$ , c'est-à-dire que le plateau A pourra recevoir à peu près 50 fois plus d'électricité que s'il était seul. — On voit que la force condensante est d'autant plus grande que  $m$  diffère moins de l'unité, c'est-à-dire que la lame isolante est plus mince. Mais il y a un milieu à garder ; car, quand la lame est mince, on est forcé d'arrêter la charge au-dessous du maximum, si l'on ne veut pas que cette lame soit percée par une décharge spontanée.

Il nous reste à voir comment on peut évaluer le rapport  $m$ . On a  $N = mP$ , d'où  $m = \frac{N}{P}$ , et il semble qu'on pourrait séparer les plateaux et prendre le

<sup>1</sup> *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. II, p. 365.

rapport  $N : P$ , au moyen du plan d'épreuve. Mais, comme nous le verrons (1661), la plus grande partie des électricités reste adhérente à la lame isolante. Heureusement qu'on peut remplacer le rapport  $N : P$  par le rapport  $r : v$  entre la quantité d'électricité libre du plateau A, et la quantité  $r$  d'électricité qui devient libre en B quand on touche le plateau A. En effet, nous avons trouvé  $v = P(1 - m^2)$ ; on a de même  $r = N(1 - m^2)$  ou  $r = mP(1 - m^2)$ ; d'où  $\frac{r}{v} = \frac{N}{P} = m$ . Ce qui s'énonce en disant que *les quantités totales d'électricité sur les deux plateaux sont entre elles comme les quantités successives d'électricité libres sur chacun d'eux, quand l'autre communique avec le sol*. Pour obtenir  $m$ , il suffira donc de trouver le rapport  $r : v$ , ce qui se fera au moyen du plan d'épreuve et de la balance électrique <sup>1</sup>.

Dans cette méthode, on a à comparer rapidement les tensions d'électricités contraires, ce qui est peu commode. M. Riess, pour n'avoir à comparer que des électricités de même nature, emploie la méthode qui suit, dans le cas du condensateur à lame d'air. On détermine d'abord la tension sur le plateau collecteur, l'autre étant éloigné; on obtient ainsi un angle de torsion  $\alpha$ , et l'on a  $\alpha = nP$ ,  $n$  étant une constante et  $P$  la charge totale du plateau. On approche ensuite le second plateau *communiquant avec le sol*, celui-ci contient alors une quantité d'électricité  $N = mP$ . On supprime la communication avec le sol, on réunit les deux plateaux par un fil métallique, et la charge totale de l'appareil est alors  $P - N$ . On mesure la tension qui reste, et l'on a pour angle de torsion  $\alpha' = n'(P - N)$ . Divisant membre à membre par  $\alpha = nP$ , on tire  $\frac{N}{P} = m = 1 - \frac{n\alpha'}{n'\alpha}$ . Pour obtenir le rapport  $n : n'$ , on recommence l'expérience, le plateau condensateur étant isolé; on a alors  $N = 0$ , et, par conséquent,  $1 - \frac{n\alpha'}{n'\alpha} = 0$ , d'où l'on tire  $n : n' = \alpha : \alpha'$ .

**1657. Expériences de M. Riess.** — Autrefois, on supposait que l'électricité dissimulée était dans un état particulier dans lequel elle ne présentait plus ses propriétés ordinaires; mais, il n'en est rien, et les choses se passent comme dans l'expérience de la décomposition par influence, où l'on voit les pendules les plus rapprochés du corps électrisé diverger, comme si l'électricité attirée était libre. Or il n'y a pas de différence entre cette expérience et celle du condensateur, si ce n'est que dans ce dernier, l'électricité est renouvelée pendant quelque temps, afin d'en accumuler de grandes quantités. La distribution de l'électricité dans les plateaux du condensateur dépendra donc de leur forme et de leur étendue. M. Riess a étudié cette question à divers points de vue, au moyen d'un

<sup>1</sup> Dans ce qui précède, nous avons supposé que  $m$  reste constant. Cela peut paraître évident, et peut être vérifié par l'expérience, en mesurant  $m$  dans différents états de charge d'un même condensateur. Du reste, la formule ne peut être qu'approchée; car elle suppose que la distribution est la même sur les deux armatures, et que la lame isolante n'intervient pas.

appareil à lame d'air et à plateaux mobiles, dont le collecteur, de 184<sup>mm</sup> de diamètre, portait au centre un cylindre de cuivre de 33<sup>mm</sup> de longueur, soutenu par une tige de verre, et un gros fil de cuivre horizontal de 228<sup>mm</sup> de longueur, terminé par une sphère, S, de 16<sup>mm</sup> de diamètre. Le plateau condenseur communiquait avec les tuyaux de conduite du gaz <sup>1</sup>.

M. Riess s'est d'abord occupé d'évaluer la *force condensante* : pour cela, il mesurait la tension en un point du collecteur, d'abord quand il était séparé du plateau condenseur, puis quand il en était rapproché ; le rapport de ces tensions représentait évidemment la force condensante.

1° Quand les tensions sont mesurées sur la boule S, les forces condensantes varient à peu près en raison inverse des distances des plateaux, quand ces distances sont petites ; quand elles sont un peu grandes, les variations sont beaucoup moins rapides ; 2° la grosseur de la boule S n'a que peu d'influence sur les résultats, si ce n'est quand la distance est très-petite ; 3° quand on prend les tensions près des bords arrondis du plateau, on obtient des forces condensantes moindres que lorsqu'on les prend sur la boule. Les résultats se voient dans le tableau suivant :

DISTANCE DES PLATEAUX		$\infty$	112 <sup>mm</sup> ,8	45 <sup>mm</sup> ,1	33 <sup>mm</sup> ,9	22 <sup>mm</sup> ,6	11 <sup>mm</sup> ,3	9 <sup>mm</sup> ,0	6 <sup>mm</sup> ,8	4 <sup>mm</sup> ,5
Valeur inverse de la force condensante prise	sur la boule. 1		0,90	0,68	0,59	0,49	0,33	0,29	0,23	0,17
	près du bord. 1		0,94	0,83	0,73	0,62	0,46	0,41	0,34	0,26

4° On peut conclure de là qu'un condensateur à grande surface doit donner une plus forte condensation qu'un plus petit ; car l'influence du contour est d'autant moins marquée relativement, que la surface est plus grande, les surfaces variant comme les carrés des contours. C'est, en effet, ce que M. Munk et Rosenschöld avait remarqué, et ce qui a été constaté par M. Riess, avec deux condensateurs ayant, l'un 184<sup>mm</sup> de diamètre, l'autre 117<sup>mm</sup>.

5° La disposition du fil métallique qui met le plateau condenseur en communication avec le sol, a aussi son influence ; M. Riess a trouvé la force condensante plus grande quand le fil, partant du centre, quittait normalement le plateau que lorsqu'il lui était d'abord parallèle, à 11<sup>mm</sup> environ de distance. Le tableau suivant contient les nombres relatifs aux deux dernières lois :

DISTANCE DES PLATEAUX		$\infty$	33 <sup>mm</sup> ,9	22 <sup>mm</sup> ,6	11 <sup>mm</sup> ,3	9 <sup>mm</sup> ,0	6 <sup>mm</sup> ,8	4 <sup>mm</sup> ,5
Valeur inverse de la force condensante.	grand condensateur. 1		0,63	0,49	0,30	0,27	0,22	0,15
	petit condensateur. 1		0,77	0,69	0,44	0,39	0,33	0,23
	fil normal. .... »		»	0,69	0,44	0,39	0,33	0,23
	fil parallèle. .... »		»	0,60	0,41	0,34	0,27	0,19

<sup>1</sup> Pogg. ann., t. LXXIII, p. 367, et *Annales de chimie et de phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 376.

On voit que la force condensante dépend de bien des conditions. L'expression  $\frac{1}{1-m^2}$ , par laquelle on la représente ordinairement, ne peut donc être qu'approchée. C'est, en effet, ce qui résulte de la comparaison faite par Verdet des valeurs de la force condensante obtenues par M. Riess, à celles que donne la formule, dans laquelle il a introduit les valeurs de  $m$  trouvées par le même physicien au moyen de sa méthode (1656). Les différences entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience, considérables pour des distances un peu grandes des plateaux, le sont bien moins pour les petites distances.

**1658. Décharge du condensateur par contacts successifs.** — On peut décharger le condensateur en enlevant successivement aux plateaux isolés, le fluide qui y devient libre quand on touche le plateau opposé. Mais, pour obtenir une décharge complète par ce moyen, il faudrait un nombre infini de contacts; ce qui résulte du calcul suivant, calqué sur celui qui sert à déterminer les pressions successives dans la machine pneumatique (I, 330).

Soient  $P, P_1, P_2, \dots, P_n$  les quantités d'électricités qui restent sur le plateau A, et  $N, N_1, \dots, N_n$ , celles qui restent sur B, après qu'ils ont reçu 0, 1, 2, 3...  $n$  contacts alternatifs. On a, en exprimant toutes les valeurs en fonction de  $P$ ,

$$\begin{array}{ll} N = \dots = mP & P_1 = mN = m^2P \\ N_1 = mP_1 = m^3P & P_2 = mN_1 = m^4P \\ N_2 = mP_2 = m^5P & \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ N_n = mP_n = m^{2n+1}P & P_n = mN_{n-1} = m^{2n}P \end{array}$$

On voit que les quantités qui restent sur chaque plateau forment une progression géométrique décroissante dont la raison est  $m^2$ . — Pour que  $P_n$  ou  $N_n$  soient nuls, il faut que  $n$  soit infini,  $m$  étant plus petit que l'unité.

Les quantités enlevées par les divers contacts successifs forment aussi une progression géométrique décroissante dont le rapport est  $m^2$ . En effet, ces quantités sont, sur les deux plateaux :

$$\begin{array}{ll} N - N_1 = mP(1 - m^2) & P - P_1 = m^0P(1 - m^2) \\ N_1 - N_2 = m^3P(1 - m^2) & P_1 - P_2 = m^2P(1 - m^2) \\ N_2 - N_3 = m^5P(1 - m^2) & P_2 - P_3 = m^4P(1 - m^2) \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ N_{n-1} - N_n = m^{2n+1}(1 - m^2) & P_{n-1} - P_n = m^{2(n-1)}P(1 - m^2) \end{array}$$

et la quantité enlevée ne peut être nulle qu'autant que  $n$  est infini.

Si l'on fait la somme des termes en nombre infini des deux progressions qui précèdent, on trouve  $P$  pour la première somme, et  $N$  pour la seconde, comme on pouvait facilement le prévoir.

**1659. Décharge par l'air.** — Quand l'air est humide, il décharge peu à peu le condensateur. Soit le condensateur chargé et isolé (*fig. 1155*); le pendule *a* du plateau collecteur est écarté, mais l'air enlevant peu à peu l'électricité libre de ce plateau, le pendule *a* s'abaisse. En même temps, le pendule *b* s'élève lentement, de l'électricité devenant libre en *b*. Cette électricité se perd bien aussi par l'air, ce qui en met une quantité correspondante en liberté sur l'autre plateau; mais comme la tension est plus faible en *b* qu'en *a*, la déperdition s'y fait aussi moins rapidement, et le pendule *b* continue de s'élever, et le pendule *a*, de s'abaisser, jusqu'à ce que les pertes de part et d'autre soient égales. A partir de ce moment, les pendules s'abaissent également, et de plus en plus lentement, jusqu'à ce que l'appareil soit entièrement déchargé. — On voit par cette expérience, ce que du reste la théorie indique, qu'il y a toujours de l'électricité libre, au moins sur l'un des plateaux, et si l'on en enlève un peu, une partie du fluide du plateau opposé est mise en liberté, et il y a du fluide libre sur les deux plateaux en même temps.



Fig. 1155.

**1660. Décharge instantanée du condensateur.** — Si l'on fait communiquer les deux plateaux, au moyen d'un arc métallique, on obtient une décharge subite, avec vive étincelle. Il y a trois cas à examiner :

1<sup>o</sup> Si l'arc métallique *e* (*fig. 1156*) est mis d'abord en contact avec le plateau B, qui ne contient pas d'électricité libre, le fluide libre de A décompose par influence, avant qu'il n'y ait contact, le fluide neutre de l'arc *e*, repousse le fluide positif vers B, et attirant le fluide négatif, se combine avec lui en produisant une étincelle, dès que la distance est assez petite, et il y a neutralisation d'une partie du fluide de A. Il en résulte que du fluide négatif de B, devient libre et se répand sur l'arc *e*, où il est détruit par le fluide positif qui vient d'y être repoussé. Alors de nouvelle électricité libre apparaît sur A, agit de même sur le fluide neutre de l'arc *e*, et une nouvelle étincelle se produit..., et ainsi de suite jusqu'à ce que le condensateur soit entièrement déchargé. Ces décompositions et recompositions se succèdent avec la rapidité de l'éclair; de sorte qu'on n'aperçoit en réalité qu'une seule décharge; et si l'appareil et l'arc sont isolés, il ne reste que l'électricité qui était libre sur le plateau A.

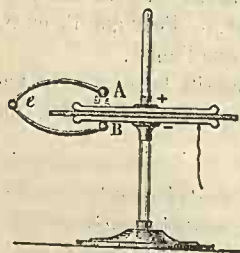


Fig. 1156.

2<sup>o</sup> Si l'arc est appuyé d'abord sur le plateau A, une partie de l'électricité libre de ce plateau se répand sur l'arc, et quitte ainsi le plateau. Une petite quantité de fluide négatif de B devient donc libre, et se trouvant en présence du fluide positif qui s'est répandu dans l'arc, se combine avec lui à travers l'air, dès que la distance est assez petite. La décharge s'achève ensuite comme ci-dessus. Il est évident qu'il faut que l'arc *e* soit isolé; sans cela on se



trouverait dans le premier cas, car l'arc communiquerait d'avance avec B, par l'intermédiaire du sol.

3° Si l'on approche les deux extrémités de l'arc isolé, des deux plateaux en même temps, sans en toucher un avant l'autre, on aura deux étincelles, l'une produite sur A au moyen de son électricité libre et du fluide négatif développé par influence sur l'arc, l'autre sur B par la combinaison du fluide positif repoussé dans l'arc, avec le fluide négatif mis en liberté sur B au moment de la neutralisation du fluide positif de A.

La tension de l'électricité libre est généralement assez faible sur le collecteur, parce qu'on craint que l'explosion ne se fasse à travers la lame isolante, c'est pourquoi l'étincelle est le plus souvent assez courte; mais elle est très-grosse, étant produite par de grandes quantités d'électricité, et d'autant plus que l'appareil présente une plus grande surface armée.

**Commotion électrique.** — Si l'on touche en même temps avec les mains les deux plateaux d'un condensateur, les électricités se combinent à travers les bras, et l'on éprouve la *commotion électrique*, secousse brusque et violente accompagnée d'une contraction des muscles et d'une douleur vive mais instantanée, principalement aux articulations.

**Excitateur.** — La commotion des grands condensateurs pouvant être dangereuse, on les décharge au moyen de l'*excitateur* (fig. 1157) formé de deux arcs métalliques, *om*, *on* terminés par des boules, et articulés en *o*. On les tient au moyen de manches de verre *v*, *v*, qui sont inutiles avec les petits condensateurs, l'électricité suivant de préférence les métaux.

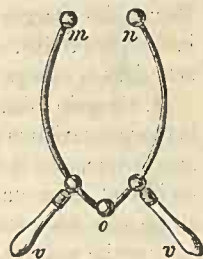


Fig. 1157.

#### 1661. L'électricité adhère à la lame isolante.

— Les fluides en présence sur les deux plateaux du condensateur tendent l'un vers l'autre avec d'autant plus d'énergie qu'ils sont plus rapprochés; tellement qu'ils adhèrent aux faces de la lame isolante et y pénètrent même à une petite profondeur, et que les plateaux métalliques n'en conservent qu'une faible quantité. Pour le prouver, on sépare les plateaux d'un condensateur isolé (fig. 1156); on les trouve à peine électrisés, et l'on reconnaît, que les deux faces de la lame isolante sont fortement chargées d'électricités de nom contraire. Si l'on rétablit les plateaux, on obtient une décharge presque aussi forte que celle qu'on eût obtenue avant de les séparer. Le rôle des plateaux dans la décharge est donc de recueillir sur la lame isolante, en chaque point qu'ils touchent, l'électricité qui s'y trouve, pour la transporter aux points où aboutit l'excitateur.

**Carreau magique.** — On met ce dernier résultat en évidence au moyen d'un condensateur nommé *carreau magique*, dont la lame de verre est garnie d'aventurine sur une de ses faces. Quand on décharge ce condensateur, on voit l'électricité se rendre de tous les points de l'aventurine, au point où aboutit l'excitateur, en formant une foule de lignes sinuées d'un vif éclat.

Si l'on sépare les plateaux d'un condensateur chargé, et si l'on touche avec deux doigts les faces de la lame isolante, on n'éprouve pas de commotion, l'électricité ne pouvant se déplacer sur le verre pour se rendre aux points de contact. Mais si l'on applique les mains sur ces deux faces, on reçoit une commotion provenant de toute l'électricité recueillie par les mains.

**Charge résiduelle.** — Quand on a déchargé un condensateur, on peut, au bout de quelque temps, obtenir une faible étincelle, plus tard une troisième et une quatrième, plus faibles encore. Ces *charges résiduelles* proviennent de la pénétration des électricités à une certaine profondeur dans la lame isolante; car si, après avoir déchargé le condensateur, on enlève les plateaux, cette lame ne semble pas d'abord électrisée, et ce n'est qu'au bout de quelques instants qu'on trouve sur ses faces, les électricités qui arrivent de l'intérieur.

**1662. Influence de la lame isolante.** — Dans ce qui précède, nous avons négligé l'induction exercée par les armatures sur la lame isolante. Déjà, Musschenbroek, Wilke, Cuthberston avaient remarqué de notables différences dans les effets de condensateurs construits avec diverses qualités de verre. Depuis, les charges résiduelles, les phénomènes de pénétration et de polarisation inductives (1649), ont prouvé surabondamment que la lame isolante joue un rôle actif dans la charge et la décharge des condensateurs.

M. Gaugain, dans un grand travail sur ces sortes d'appareils<sup>1</sup>, a établi que la charge maximum qu'ils reçoivent d'une source d'électricité constante, augmente avec le temps de la communication avec cette source. Ce maximum est obtenu en un instant, avec un condensateur plan à lame d'air, pourvu que l'électricité y arrive sans rencontrer de résistance et que la capacité de ce condensateur soit assez petite pour ne pas modifier sensiblement le potentiel de la source; mais il faut un certain temps, quand la lame isolante est solide. Par exemple, ce temps était d'une heure environ, avec une lame de soufre, et la charge maximum était alors double du maximum atteint au premier instant; et ce temps était d'un quart d'heure, avec une lame de gomme laque, et la charge devenait triple.

M. Gaugain mesurait les charges de la manière suivante : Pendant que l'armature opposée communique avec le sol, il fait communiquer celle qu'il veut étudier, avec le bouton B (*fig. 1158*) de son *électromètre de jauge*, ou *électromètre de décharge*, par un fil de coton peu conducteur, qui laisse passer lentement l'électricité. Les feuilles d'or *a* et *b* s'écartent, et dès que *a* touche la colonne *b* non isolée, les feuilles retombent, pour s'écarter et se décharger de nouveau. Le nombre de ces oscillations donne une mesure de la quantité d'électricité abandonnée par l'armature. Du reste, une seule feuille d'or peut suffire, pour la marche régulière de l'instrument.

Pour connaître l'état électrique que les armatures ont communiqué à la lame isolante, on les applique sur la lame des disques à manches de verre que l'on touche simultanément, puis on les écarte; ils sont électrisés par induction

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. II, pp. 264 et 281.

d'une manière opposée à celle des faces qu'ils ont couvertes, et l'on reconnaît que l'électricité de ces faces est *de nature contraire* à celle que possédait l'armature remplacée. On conclut de là qu'il y a eu décomposition par influence dans la lame interposée, comme si elle était conductrice et était séparée des armatures par des lames isolantes très-minces.

M. Gaugain a encore étudié les charges maximum, en séparant les armatures, de la lame interposée, par de minces couches d'air dont l'épaisseur était limitée au moyen de petits amas de gomme laque. Quand la lame interposée était métallique, la charge s'obtenait en un instant et elle était la même qu'en l'absence de cette lame, si la somme des deux couches d'air restait constante. Quand on employait une lame isolante, le temps était plus ou moins long; et, chose difficile à expliquer, la charge était généralement indépendante de la nature et de l'épaisseur de cette lame.

Dans ses expériences, M. Gaugain n'employait que de faibles charges. M. Neyreneuf, au moyen de charges plus fortes, a constaté le phénomène de pénétration des électricités apportées par chaque armature. Il se servait d'un condensateur à pièces mobiles, comme celui d'Épinus (1655). Voici quelques-unes des nombreuses expériences qu'il a publiées<sup>1</sup> : — 1° Après quelques contacts alternatifs sur les armatures du condensateur chargé, il écarte brusquement celle qui a été touchée la dernière, et il la trouve électrisée assez fortement et d'une manière contraire à ce qu'on devait supposer; — 2° après avoir déchargé l'appareil au moyen d'un exciteur isolé, il écarte les armatures, et il leur trouve des électricités contraires à celles avec lesquelles elles avaient été chargées; — 3° après avoir laissé pendant longtemps l'exciteur en contact avec les armatures, il trouve qu'on peut faire fonctionner l'appareil comme un électrophore à deux faces. M. Neyreneuf conclut, en effet, de ses expériences qu'un condensateur à couche isolante solide se comporte comme un électrophore double, dont les faces ont été fortement chargées par pénétration des électricités des armatures (1614).

L'influence de la lame isolante dans le condensateur a été signalée d'abord par M. Crahay, vers 1838. On voit qu'elle dépend à la fois de la polarisation moléculaire et de la pénétration des électricités; aussi varie-t-elle avec l'intensité de la charge. Dans les appareils fortement chargés et qu'on ne laisse pas longtemps dans cet état avant d'utiliser la décharge, on peut généralement négliger ces effets accessoires, et c'est ce que l'on fait ordinairement.

**1663. BOUTEILLE DE LEYDE.** — On construit souvent le condensateur avec un flacon de verre (*fig. 1158*), revêtu à l'extérieur d'une feuille d'étain n'allant pas jusqu'en haut, et rempli dans l'intérieur, de feuilles d'or qui remplacent la

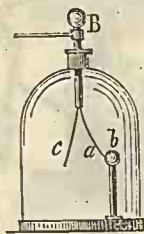


Fig. 1158.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. V, p. 356.

seconde lame métallique. Une tige à crochet *c*, fixée par un bouchon, communique avec l'intérieur. Sous cette forme, le condensateur porte le nom de *bouteille de Leyde*. La lame d'étain forme l'*armature* extérieure ou *panse* de la bouteille, et les feuilles d'or, l'*armature* intérieure. Pour charger la bouteille de Leyde, on la tient par la *panse*, et l'on fait communiquer le bouton *c* avec la machine électrique. On peut remplacer les feuilles d'or de l'intérieur par de l'eau ou même par le vide imparfait; dans ce dernier cas, l'électricité passe à travers l'air très-raréfié, et vient se fixer à la surface intérieure du verre.

C'est sous la forme de la bouteille, que le condensateur a été découvert, à Leyde, en 1746. Cuneus, élève de Muschenbroeck, en répétant les expériences de son maître, eut l'idée d'électriser de l'eau dans un vase de verre tenu à la main. Ayant voulu retirer avec l'autre main, le fil de fer par lequel l'électricité passait dans l'eau, il ressentit une violente commotion, qui l'effraya beaucoup. On voit que l'eau formait l'armature intérieure d'un véritable condensateur, dont



Fig. 1459.

la main appliquée à l'extérieur formait l'autre armature<sup>1</sup>. La nouvelle de cette expérience se répandit rapidement, et la curiosité fut fortement surexcitée par les récits exagérés qu'on en fit. Muschenbroeck écrivit à Réaumur qu'il ne voudrait pas, pour la couronne de France, s'exposer à recevoir une nouvelle commotion. Allaman, élève de Sgravesande, affirma qu'il avait perdu un instant la respiration, et Winkler qu'il avait éprouvé de violentes convulsions. Ces exagérations doivent être mises sur le compte de la frayeur des premiers expérimentateurs; frayeur bien légitime, lorsqu'on songe à la violence et à l'instantanéité de la secousse. On se familiarisa bientôt

avec le phénomène, et Nollet répéta l'expérience sur 300 gardes du roi, *formant la chaîne*, c'est-à-dire se donnant la main deux à deux. La main du premier homme de la série étant appuyée sur l'armature extérieure de la bouteille, au moment où le dernier toucha le bouton, les 300 hommes reçurent simultanément la commotion. Nollet a encore fait passer la décharge à travers le corps d'oiseaux, par l'intermédiaire d'un fil métallique de 4000 mètres de longueur, et la commotion fut assez forte pour les tuer. En 1746, Wilson augmenta l'effet de l'appareil en enveloppant le vase d'une couche d'eau, et Bevis, puis Watson, appliquèrent des feuilles d'étain sur le verre, et employèrent des condensateurs plans, dont la théorie fut ensuite établie, principalement par Æpinus.

**1661. L'électricité de la bouteille reste sur le verre.** — C'est par l'étude de la bouteille de Leyde que Franklin débuta dans l'étude de l'électricité.

<sup>1</sup> Un an avant, l'évêque poméranien von Kleist avait éprouvé une forte commotion en touchant par hasard le conducteur d'une machine électrique, pendant qu'il électrisait du mercure renfermé dans une bouteille qu'il tenait à la main; mais il ne put reproduire ce phénomène, dont il n'avait pas trouvé l'explication.

Il découvrit que les deux faces sont électrisées d'une manière opposée, et reconnut que l'électricité adhère au verre (1661). Pour le prouver, il isola la bouteille, qui contenait de l'eau, et, après l'avoir électrisée, il versa le liquide dans une autre bouteille, qui ne donna pas de décharge. Ayant ensuite versé de l'eau fraîche dans la première bouteille, il en tira une forte étincelle. D'Alibart a répété cette expérience en employant du plomb de chasse ou de la limaille métallique, au lieu d'eau. Aujourd'hui, on opère au



Fig. 1160.

moyen d'une bouteille de Leyde pouvant se démonter (fig. 1159). Elle est composée d'un vase de métal un peu conique *b*, dans lequel s'adapte aussi exactement que possible un vase de verre, *v*, dans lequel on introduit un second vase de métal *a*, muni d'un crochet. Après avoir chargé cette bouteille à armatures mobiles, on enlève le vase intérieur *a*, au moyen d'une baguette de verre, puis on retire le vase de verre *v*. Après avoir reconnu que ce vase est électrisé, et différemment sur ses deux faces, on touche les deux armatures, on



Fig. 1161.

recompose le condensateur, en ayant soin de tenir le vase *a* avec une tige isolante, et l'on peut ensuite en obtenir une forte décharge.

Pour montrer que les armatures recueillent l'électricité du verre pour la transporter au point où aboutit l'excitateur, on emploie une bouteille à aventurine (fig. 1160), dont le bouton est assez rapproché de l'armature extérieure pour que la décharge se fasse d'elle-même. On la suspend à la machine électrique, l'armature extérieure communiquant avec le sol; et il se fait de temps en temps des décharges, à chacune desquelles on voit des serpenteaux qui convergent vers le point où aboutit l'étincelle.

**1665. Mouvements produits par l'électricité libre de la bouteille.** — L'armature intérieure de la bouteille de Leyde contenant toujours de l'électricité libre quand l'armature extérieure communique avec le sol, on s'en sert pour produire divers mouvements.

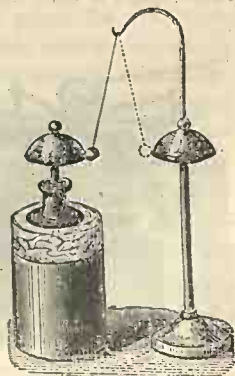


Fig. 1162.

**Carillon à bouteille.** — Une balle métallique est suspendue par un fil de soie, entre le timbre adapté à la tige d'une bouteille de Leyde chargée, et le timbre non isolé placé à côté (fig. 1162). La balle, attirée par l'électricité libre du premier timbre, s'électrise en le touchant, est repoussée, se décharge en frappant le timbre de droite; après quoi elle est de nouveau attirée. — On peut substituer à la balle, l'araignée de Franklin (1271).

**Balancier électrique.** — Deux bouteilles de Leyde A et B, chargées et communiquant avec le sol (fig. 1163), sont placées de chaque côté d'une colonne soutenant un balancier de verre *ab*, terminé par deux boules métalliques. Ces boules oscillent entre les boutons A, B et les boules *c* et *d* qui communiquent avec le sol.

**1666. Jarres; batteries.** — Une jarre est un condensateur formé d'un grand vase de verre à large ouverture, par laquelle on a pu coller une feuille

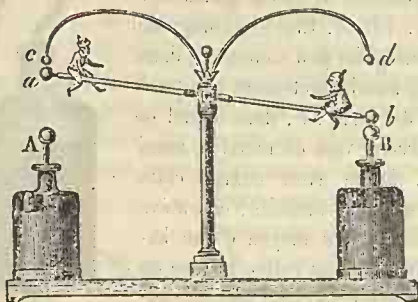


Fig. 1163.



Fig. 1164.

d'étain en dedans aussi bien qu'en dehors (fig. 1164). Une tige *t*, qui s'appuie sur le fond, sert à charger la jarre, pendant que son armature extérieure communique avec le sol.

**Batteries électriques.** — Bevis et Watson ont eu l'idée de réunir plusieurs jarres, placées dans une même boîte doublée d'étain (fig. 1165), de manière que toutes les armatures extérieures communiquent avec le sol par une chaîne, K. Les armatures intérieures communiquent aussi entre elles par des tringles métalliques, fixées à des tiges qui pénètrent dans chaque jarre à travers un bouchon, et auxquelles sont attachés des fils de laiton qui vont toucher le fond. Un semblable système se nomme une *batterie électrique*. On réunit souvent plusieurs batteries en faisant communiquer entre elles, les armatures intérieures.

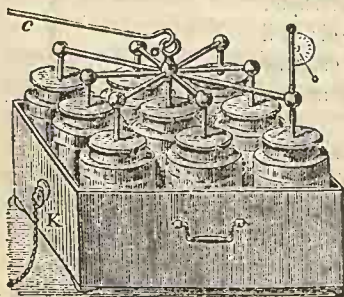


Fig. 1165.

**1667. Charge par cascade.** —

Quand une batterie présente une grande surface armée, il faut, pour la charger, de grandes quantités d'électricités, et l'opération est très-longue, quoi qu'elle soit beaucoup abrégée par l'emploi des machines d'induction (1613). Franklin a imaginé de la rendre beaucoup plus prompte en divisant la batterie en plusieurs groupes de jarres B, B', B''

(fig. 1166), isolés sur des tabourets à pieds de verre, et communiquant deux à deux par des tringles  $t, t'$ , de manière que l'armature extérieure de B, qui reçoit l'électricité en  $n$ , communique avec l'armature intérieure de la suivante, B'; l'armature extérieure de celle-ci, avec l'intérieur de B'', dont l'armature extérieure communique avec le sol par une chaîne  $c$ . Dans cette méthode, nommée *charge par cascade*, les différentes batteries partielles se chargent les unes par les autres, et l'on n'a à fournir que l'électricité nécessaire pour charger la première B. En effet, le fluide repoussé dans l'armature extérieure de B passe dans l'intérieur de B'; de même, le fluide repoussé à l'extérieur de B' passe dans l'intérieur de B''.

Il est facile de voir que les quantités d'électricités des armatures intérieures et extérieures des différentes batteries B, B', B'',... forment des progressions géométriques décroissantes. En effet soit P la quantité d'électricité positive que reçoit l'armature intérieure de la première; son armature extérieure recevra par induction la quantité  $-mP$ , et l'armature intérieure de la seconde,  $+mP$ ; de sorte qu'à l'extérieur de celle-ci, il y aura  $-m^2P$ ; et dans l'intérieur de la 3<sup>e</sup>,  $+m^2P$ ,... et ainsi de suite. S'il y a  $n$  groupes, le dernier contiendra intérieurement  $m^{n-1}P$ , et extérieurement  $-m^n P$ .

Quand la batterie B est suffisamment chargée, on enlève les tringles  $t, t'$ , au moyen de crochets de verre, on en dépose

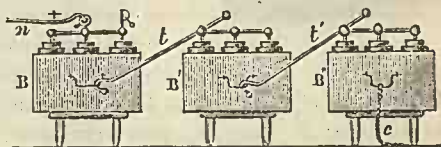


Fig. 1166.

d'autres de manière à faire communiquer entre elles toutes les armatures intérieures et l'on fait communiquer toutes les armatures extérieures avec le sol. Les charges s'égalisent alors et l'on fait de nouveau marcher la machine électrique pour compléter la charge. — Il reste à savoir si cette seconde opération ne fait pas perdre le bénéfice obtenu dans la première. Le calcul indique qu'il en est ainsi, et Franklin avait lui-même remarqué qu'il ne tirait que peu d'avantage de la méthode par cascade, ce qu'il attribuait au défaut d'isolement des appareils.

**1668. Manière de limiter la charge des batteries.** — Pour connaître à chaque instant la tension de l'électricité libre intérieure, afin de ne pas risquer de percer quelque jarre, on place un électromètre de Henley sur une de ces jarres (fig. 1165). On emploie aussi des appareils qui déchargent spontanément la batterie quand elle est trop chargée, et qui constituent de véritables appareils de sûreté qui la préservent des inconvénients d'une trop forte charge. Parmi ces appareils, nous citerons la *bouteille de Lane*, décrite plus loin (1670), et l'*électromètre du Cuthberston*.

**Électromètre de Cuthberston.** — Une boule isolée  $c$  (fig. 1167) communique avec l'intérieur de la batterie. Un fléau  $ba$  terminé par deux boules  $a, b$ ,

mobile en *o*, et communiquant avec la boule *c*, est équilibré de manière que *b* s'appuie sur *c* quand la charge est au-dessous d'une certaine limite; mais quand cette charge devient trop forte, la boule *b*, repoussée, s'élève peu à peu. La boule *a* s'approche alors de la colonne *e* qui communique avec l'armature extérieure, et la décharge a lieu. Un électromètre de Henley fait connaître si l'on approche du moment de l'explosion.

**1669. Remarque.** — Il est facile de voir en se reportant à ce qui précède, sur les expériences de M. Riess, et sur l'influence de la lame isolante, que la

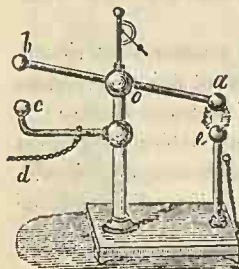


Fig. 1167.

théorie du condensateur telle que nous l'avons exposée ne peut représenter les faits que d'une manière approximative. Il ne faut pas oublier non plus que nous avons supposé que les deux armatures sont égales et placées symétriquement de chaque côté de la lame isolante, ce qui est loin d'être réalisé dans les bouteilles et les jarres. C'est surtout sur la formule de la force condensante qu'ont porté les recherches des physiciens. M. Gaugain, entre autres, a fait de nombreuses expériences sur des condensateurs de formes et de dimensions très-variées<sup>1</sup>. Plus tard, M. Moutier<sup>2</sup> a développé les conséquences théoriques du travail de

M. Gaugain, et a retrouvé la formule connue de la force condensante, mais en prenant avec M. Gaugain, pour représenter cette force, le rapport entre la quantité d'électricité que reçoit le collecteur en présence du condensateur non isolé, et la quantité qu'il avait d'abord reçue quand ce condensateur était isolé.

## II. Applications du condensateur aux appareils électrométriques.

**1670. Bouteille électrométrique de Lanc.** — Cet instrument sert à évaluer, au moyen d'une unité spéciale, les quantités d'électricité fournies par une machine, ou reçues par une batterie. Il consiste en une jarre ou une bouteille de Leyde, *O* (fig. 1168), dont l'intérieur communique par la tige *B* avec la source d'électricité. Le bouton *c* est en présence d'un autre bouton *b* qu'on peut en rapprocher plus ou moins, au moyen d'une vis à micromètre *v*, qui communique avec l'armature extérieure de la jarre, par le fil de platine en spirale, *t*. L'électricité arrivant en *B* charge la jarre *O*, et celle-ci se décharge d'elle-même par les boules *c*, *b*, dès qu'elle contient une quantité d'électricité suffisante. Le nombre de décharges fait connaître combien de fois cette quantité a été fournie par la source. Pour que les résultats soient comparables, il faut faire tourner la machine aussi régulièrement que possible. Il faut aussi éviter

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 230.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. IX, p. 409.



que la jarre ne se décharge en partie par l'air ou par la surface du verre. On rend ces pertes négligeables en mettant les boules assez près l'une de l'autre pour que les décharges soient fréquentes. En outre, en procédant ainsi, on empêche l'altération de la surface des boules, qui a une influence marquée sur la facilité de la décharge. C'est pour éviter cette altération qu'on interpose le fil de platine *l*, dont la résistance au passage de l'électricité rend la décharge moins brusque.

Voici, comme exemples, quelques résultats de comparaison entre les débits, c'est-à-dire les quantités d'électricité fournies, de diverses machines électriques, pour un tour du plateau :

	Mach. de Ramsden.	M. de Holtz simple.	M. de Holtz double.	M. Carré.
Diamètre.	0 <sup>m</sup> ,98	0,55	0,55	0,21
Débit. . . . .	1	0,45	0,86	0,21

Ces nombres ont été obtenus par M. Mascart<sup>1</sup>, en mettant les boules de la bouteille de Lane à 1<sup>mm</sup> de distance. Pour des distances plus grandes, les rapports entre les débits sont différents. Il faut remarquer aussi que le débit *par minute*, et non plus *par tour*, dépend de la vitesse de rotation du plateau, et l'on sait combien les machines d'induction l'emportent à cet égard sur les machines à frottement. Citons encore les résultats comparés des machines de Ramsden et hydro-électrique de l'Institut polytechnique de Londres : la première donne 3 décharges par minute, d'une grande jarre électrométrique, tandis que la seconde en donne 140 dans le même temps.

Quand on veut évaluer la quantité d'électricité introduite dans une batterie, on l'isole, et l'on fait communiquer son armature extérieure avec la tige *B* (fig. 1168). Le nombre de décharges fait connaître la quantité d'électricité repoussée dans l'armature extérieure, et, par conséquent, la quantité de fluide contraire accumulée sur cette armature.

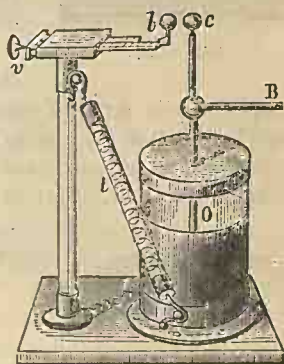


Fig. 1168.

**1671. Condensateur de Volta.** — Cet appareil, destiné à reconnaître l'électricité d'une source *continue*, donnant de l'électricité à tension trop faible pour qu'on puisse en constater la présence, consiste en un plateau conducteur recouvert d'une feuille de taffetas gommé, sur laquelle on pose un plateau métallique garni d'une couche de vernis isolant et muni d'un manche de verre. Ce système constitue un condensateur dont la lame isolante est formée par le taffetas et le vernis. On fait communiquer la source d'électricité avec le plateau

<sup>1</sup> *Traité d'électricité statique*, t. II, p. 521.

métallique, pendant que le plateau inférieur communique avec le sol, et ce condensateur se charge peu à peu. La force condensante étant très-grande à cause de la faible épaisseur de la lame isolante, on peut au bout d'un certain temps, en soulevant le plateau supérieur, y reconnaître la présence de l'électricité. La couche de vernis est destinée à arrêter l'électricité, qui adhère à la lame isolante, de manière que le plateau puisse l'emporter avec lui (1661).

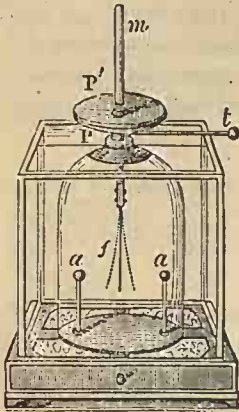


Fig. 1169.

1672. **Électroscope condensateur.** — Pour les très-faibles sources d'électricité, Volta a associé le condensateur à l'électromètre à feuille d'or. L'appareil ainsi formé consiste en un électromètre à feuilles d'or *f* (fig. 1169) surmonté d'un condensateur PP' dont les plateaux sont, l'un et l'autre, garnis d'une mince couche de gomme laque. Les deux couches réunies forment une lame isolante se partageant en deux quand on enlève le plateau supérieur. On fait communiquer la source électrique avec le plateau P', et le plateau P avec le sol en touchant la tige *t*. Au bout d'un certain temps, on supprime cette dernière communication, et l'on enlève le plateau P', par le manche isolant *m*. La couche de gomme laque du plateau P' emporte avec elle le fluide de ce plateau, tandis que le fluide de nom contraire développé dans le plateau P, devient libre et fait écarter les feuilles d'or. Les petites colonnes *a, a* réagissent pour augmenter l'écart, et elles déchargent les feuilles d'or quand elles s'écartent trop.

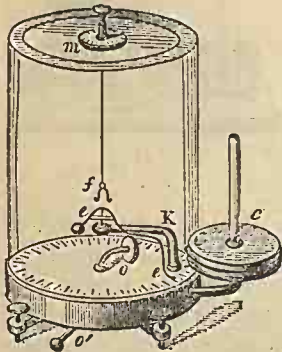


Fig. 1170.

L'électromètre condensateur doit être desséché avec soin; on l'entoure d'une cage de verre dont le socle est muni d'un tiroir contenant de la chaux vive. Il faut aussi prendre les plus grandes précautions pour que les surfaces vernies des deux plateaux ne subissent aucun frottement, qui pourrait les électriser d'avance.

1673. **Électromètre de Peltier.** — Cet instrument (fig. 1170) est muni d'un condensateur *e*, semblable à celui de l'appareil précédent, et dont le plateau inférieur communique avec un support isolé K. Une aiguille *ee*, formée

d'un fil de cuivre, porte une pointe, qui s'appuie au fond d'une petite coupe d'acier, fixée au support K. Une aiguille aimantée donne au système une légère force directrice. On oriente l'appareil de manière que l'aiguille *ee* touche le support K. Quand ensuite, après avoir chargé le condensateur *e*, on enlève son

plateau supérieur, l'aiguille *ee*, partageant l'électricité du support *K*, s'en écarte d'une quantité angulaire que l'on mesure sur un cercle gradué. Le petit plateau conducteur *o*, que l'on approche plus ou moins de l'aiguille, au moyen du levier *o'*, augmente la déviation. Enfin, on peut transformer l'appareil en balance de torsion, en soulevant l'aiguille *ee*, au moyen du double crochet *f* suspendu à un fil fixé au micromètre *m*.

**1674. Électromètre condensateur à trois plateaux.** — Peccet a imaginé, vers 1838, un électromètre condensateur dont la sensibilité dépasse de beaucoup celle des instruments qui précèdent<sup>1</sup>. Cet appareil consiste en un électromètre à feuilles d'or (*fig. 1171*), surmonté d'un condensateur à trois plateaux *a, b, c* en verre dépoli et doré, dont on voit la coupe en *a', b', c'*. Les deux premiers forment un condensateur ordinaire. Le plateau *b, b'*, muni de son manche isolant *n, n'*, est garni d'une couche de gomme laque sur ses deux faces, et non sur son contour. Un troisième plateau *c, c'*, verni en dessous, peut s'appliquer sur lui, et être soulevé au moyen d'un tube de verre *t, t'* que traverse le manche isolant *n*. — Pour se servir de cet appareil, on met la source électrique en contact avec le plateau *c, c'* pendant qu'on touche *b, b'* avec le doigt, et le condensateur *cb, c'b'* se charge comme à l'ordinaire. On enlève ensuite le plateau *c, c'*; l'électricité qui était dissimulée sur la face supérieure de *b*, devient libre, et si l'on fait communiquer *a, a'* avec le sol, le condensateur *ab, a'b'* se charge, et l'électricité de *b* est dissimulée presque totalement. Si maintenant on replace le plateau *c, c'*, qui a conservé son électricité, ou bien auquel on en communique une nouvelle dose, le condensateur *cb, c'b'* se charge comme précédemment, et en enlevant le plateau *c, c'*, l'électricité nouvellement dégagée en *b* devient libre et vient augmenter la charge du condensateur *ba, b'a'*, dont on fait communiquer le plateau *a* avec le sol. En continuant ainsi, on pourra accumuler en *ba* des quantités d'électricité croissantes, au moyen de la quantité limitée fournie d'abord au plateau *c*. Si l'on enlève ensuite les plateaux *b* et *c*, les feuilles d'or divergent. Peccet a reconnu que l'écart, s'il ne dépasse pas 20°, est proportionnel au nombre d'opérations, c'est-à-dire à la quantité d'électricité accumulée dans le plateau *a*. Pour évaluer

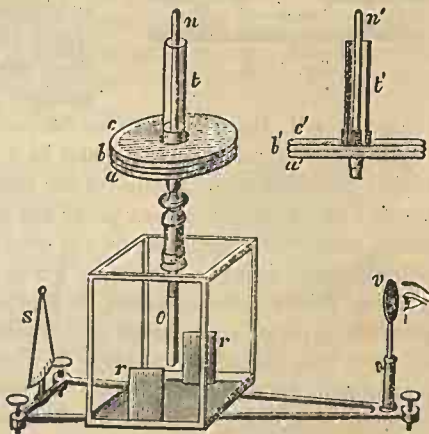


Fig. 1171.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXVII, et 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 100.

cet écart, on regarde par un petit trou *v*, sur quelles divisions du secteur *S* se projettent les feuilles d'or.

Bennet avait déjà eu l'idée de multiplier la charge d'un électromètre, au moyen d'un condensateur à trois plateaux, qu'il nommait *doubleur* d'électricité; mais il opérerait d'une manière toute différente, et Cavallo a reconnu qu'il y avait de nombreuses incertitudes dans sa méthode.

**1675. Condensateur double de MM. Pfaff et Svanberg.** — Ce système de condensateurs permet d'obtenir des étincelles, au moyen d'une dose unique

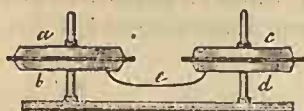


Fig. 1172.

et très-faible d'électricité. Deux condensateurs isolés *ab*, *cd* (fig. 1172), dont la lame isolante est une lame de verre très-mince mastiquée au plateau inférieur, ont leurs plateaux *b* et *d* réunis par un fil métallique *c*. Le plateau *a* reçoit une charge  $+P$ , pendant que *b* communique avec le sol; *b* prend alors une

charge  $-mP$ . On enlève *a* et l'on fait communiquer *c* avec le sol; l'électricité négative de *b*, devenue libre, se porte en *d*, et *c* prend la charge  $+m^2P$ . On replace le plateau *a*, qui a conservé son électricité  $+P$ , et l'on fait communiquer *b* avec le sol; ce plateau prend une nouvelle dose  $-mP$ , que l'on fait encore passer sur *d*, en soulevant *a* et touchant *c*. Les choses se passent jusqu'à présent comme dans le condensateur à trois plateaux de Pecllet. En répétant une troisième fois la même opération, la charge de *d* devient  $3mP$ . Cela fait, on pourra transporter cette charge en *b*, comme on a transporté celle de *b* en *d*, et, après trois opérations, la charge de *b* sera  $3 \times 3mP = 3^2mP$ . En transportant alors cette charge de *b* en *d*, on pourra, par trois opérations nouvelles, avoir sur *d* la charge  $3 \cdot 3^2mP$ ; et en faisant *n* fois la triple manipulation, on aura sur le plateau chargé en dernier lieu,  $3^n mP$ . On ne fait que tripler la charge de chaque plateau avant de la transporter sur l'autre, parce que ce

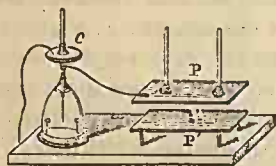


Fig. 1173.

nombre donne le résultat le plus favorable, pour un nombre déterminé d'opérations simples. Par exemple, pour 24 opérations, si l'on double seulement la charge avant de la transporter, il y aura à faire 12 transports, et la charge définitive sera  $2^{12}mP = 4096mP$ . Avec la charge triple, on aurait  $3^8mP = 6561mP$ ; et avec la charge quadruple, il viendrait  $4^6mP = 4096mP$ . Un appareil de ce genre,

construit pour l'Université d'Upsal, et dont les plateaux ont 16 centimètres de diamètre, donne, au bout de 24 opérations et avec une quantité d'électricité très-faible, une vive étincelle, et une commotion qui se fait sentir jusqu'au coude.

**1676. Électromètre à double condensation.** — M. Gaugain a imaginé une disposition (fig. 1173) qui, avec les sources donnant rapidement leur tension maximum, permet d'augmenter beaucoup l'effet produit. Il associe un

électromètre condensateur  $c$ , avec un condensateur de grandes dimensions  $PP'$ , qu'il charge d'abord ; puis il fait communiquer avec le plateau de l'électromètre, le plateau  $P$ , le soulève, et fait passer sa charge dans le condensateur  $c$ . Cet appareil est très-sensible ; M. Gaugain ayant chargé directement le condensateur de l'électromètre au moyen d'une source électrique très-faible, et ayant soulevé le plateau  $c$ , vit les feuilles d'or diverger de 7 à 8° au plus. Ayant ensuite chargé le même instrument, par l'intermédiaire du condensateur  $PP'$ , les feuilles d'or vinrent frapper les colonnes de décharge, ce qui exigeait un écart de 90°.

**1677. Électromètres de Thomson.** — M. Thomson a imaginé plusieurs électromètres, qu'il a successivement perfectionnés, et dans lesquels un condensateur sert à maintenir un potentiel constant sur une partie de l'appareil. Le plus employé est l'*électromètre à quadrants* et à torsion, dans lequel on observe directement la déviation sans modifier la torsion, de manière qu'on peut, au besoin enregistrer ses indications.

Cet instrument consiste en une aiguille d'aluminium, ne pesant que de 6 à 8 centigrammes, suspendue par un système bifilaire ou par un simple fil de torsion. Cette aiguille peut osciller dans une boîte cylindrique (*fig. 1174*) en métal, partagée en 4 parties égales  $A, A', B, B'$ , réunis deux à deux par des fils métalliques, de manière à constituer deux conducteurs séparés, formés chacun de deux secteurs opposés. L'axe de figure de l'aiguille, mince et large, est parallèle à l'un des diamètres de séparation des secteurs quand elle n'est soumise à aucune action. Sa forme,  $E$  (*fig. 1175*) est telle que, pour de petits déplacements, les actions électriques exercées sur elle restent sensiblement constantes. De plus, étant enveloppée par les secteurs, les dilatations des fils de suspension n'ont pas d'influence, et elle est soustraite aux actions extérieures.

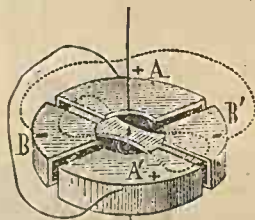


Fig. 1174.

Les quatre secteurs sont suspendus en  $s$ , par des colonnes verticales, à un plateau métallique, et communiquent avec les fils  $n, n'$  (*fig. 1175*) destinés à leur apporter l'électricité. Le plateau ferme une cloche de verre renversée  $C$ , dont le fond est garni en dehors d'une feuille d'étain, communiquant avec le sol, et qui contient en dedans de l'acide sulfurique concentré  $a$ , de manière à former une bouteille de Leyde tellement bien desséchée que sa charge, quand le verre est bien choisi <sup>1</sup>, ne varie pas de  $\frac{1}{100}$  en 24 heures. On introduit l'électricité dans ce condensateur, par le fil de suspension de l'aiguille, à laquelle pend un

<sup>1</sup> M. Thomson emploie un verre spécial fabriqué exprès à Glasgow, très-isolant et très-peu hygrométrique. Les appareils fabriqués avec d'autres espèces de verre n'ont pas, le plus souvent, donné de bons résultats.

fil de platine qui plonge dans l'acide. L'électricité libre de l'acide maintient ensuite dans l'aiguille un potentiel constant; ce que l'on vérifie au moyen d'un électromètre spécial (*jauge*) *e*, fixé sur le couvercle. Quand cette charge diminue, on la rétablit en imprimant, au moyen d'un bouton *v*, quelques tours à une petite machine d'induction particulière (*reproducteur de charge*) qui est installée sous le couvercle, et qui est amorcée par l'électricité de l'aiguille.

Quand on veut évaluer le potentiel d'un conducteur, on le fait communiquer avec un des systèmes de secteurs, l'autre communiquant avec le sol. L'aiguille électrisée est déviée, et, si l'on suppose la déviation proportionnelle au potentiel, on déduira celui du corps, de la déviation produite par un potentiel connu. — Si l'on fait communiquer deux corps électrisés avec les fils *n*, *n'*, on mesurera la différence de potentiel de ces deux corps.

Les déviations ne sont proportionnelles aux charges qu'autant qu'elles ne dépassent pas 3°. On les maintient dans cette limite en chargeant faiblement le

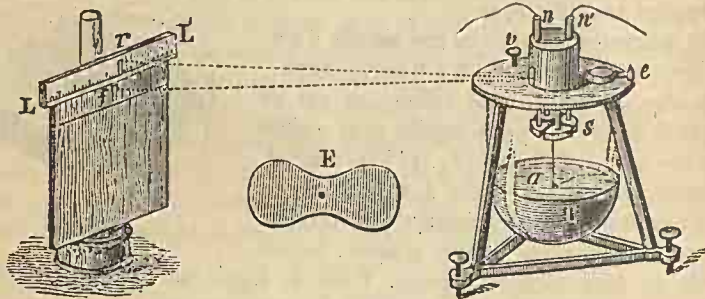


Fig. 1175.

condensateur et, par conséquent, l'aiguille; en donnant à la suspension une grande rigidité de torsion; en isolant ou supprimant même deux secteurs; enfin, en approchant une plaque métallique nommée *inducteur* d'un des secteurs supposé isolé.

Les déviations, quoique très-faibles, se mesurent avec précision au moyen d'un petit miroir concave de verre très-léger, fixé au-dessus de l'aiguille. Au centre de courbure de ce miroir est disposée une fente éclairée par derrière *f* (fig. 1175), dont l'image, renvoyée par le miroir, est projetée sur une règle divisée LL', placée à la même distance du miroir. — M. Angot éclaire vivement la règle, divisée en dixièmes de millimètres, et en observe l'image renvoyée par le miroir, au moyen d'un microscope placé un peu au-dessus de la division. Dans ce cas, le rayon de courbure du miroir n'est que de 15 à 20<sup>cm</sup>.

**1678. Électromètre Branly.** — L'électromètre de M. Thomson est extrêmement précis, mais en même temps d'un usage très-délicat, et difficile à construire. Plusieurs physiciens ont essayé de le simplifier sans lui enlever de

ses qualités. Tel est l'électromètre de M. Branly (*fig. 1176*), construit par M. Bourbouze, et dont nous empruntons la figure à l'*Annuaire de l'Observatoire de Montsouris*. Cet électromètre est un des mieux combinés. Dans cet instrument, qui a la forme d'une balance Coulomb, le couvercle et les montants qui soutiennent les glaces sont en ébonite. L'aiguille *i* est suspendue, par un fil de torsion, à la virole mobile que porte le tube qui surmonte l'appareil. Cette aiguille oscille au-dessus des quatre secteurs, formés de simples lames et suspendus par des colonnes de métal, au couvercle au-dessus duquel on voit les fils qui réunissent ces secteurs deux à deux. L'aiguille soutient un petit miroir qui sert à la mesure des déviations, et elle peut être plus ou moins rapprochée des secteurs pour faire varier la sensibilité de l'appareil. Elle reçoit l'électricité par le fil de torsion. Le potentiel constant n'est plus fourni par un condensateur, mais par une *pile voltaïque* composée de cent petits couples formés de *cuivre, zinc et eau*, bien isolés par de la paraffine, qui les sépare et en bouche l'ouverture. Une des extrémités de la série communique avec le sol, et l'autre avec l'aiguille. Le niveau potentiel donné est constant dans un même état de la pile; mais, d'un jour à l'autre, il peut varier, ce qui n'a pas d'inconvénient dans les expériences comparatives.

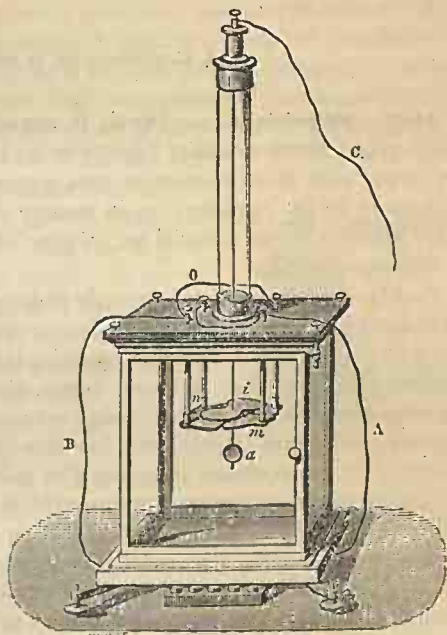


Fig. 1176.

M. Angot a fait beaucoup d'expériences avec cet appareil pour déterminer la capacité électrique de quelques corps (1632)<sup>1</sup>. Au lieu de donner le niveau potentiel constant à l'aiguille et de faire communiquer l'un des systèmes de secteurs avec le sol, et l'autre avec le corps à étudier, il fait communiquer les deux systèmes de secteurs avec les deux pôles de la pile, ce qui les porte à des potentiels égaux mais de signe contraire. L'aiguille, dont l'axe est parallèle à un des diamètres de séparation des secteurs, n'est pas alors influencée. On la

<sup>1</sup> *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 2<sup>e</sup> série, t. II.

fait ensuite communiquer avec le corps à étudier; elle prend le même potentiel et est déviée. Dans ces expériences, M. Angot a découvert que l'influence des murs de la salle où l'on opère apporte des erreurs notables aux résultats. Par exemple, la capacité électrique d'une sphère de 10<sup>cm</sup> de diamètre est augmentée de  $\frac{1}{30}$  et de  $\frac{1}{20}$ , dans des salles de 10<sup>m</sup> ou de 4<sup>m</sup> de côté. Il faut donc opérer dans des espaces aussi grands que possible.

## § 6. — EFFETS DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE

### I. Conditions de la décharge.

**1679. Définitions.** — Depuis le commencement de ce chapitre, nous avons généralement considéré l'électricité à l'état statique, ou en équilibre sur les corps; nous allons maintenant nous occuper des phénomènes résultant de la rupture de cet équilibre, ou du passage de l'électricité d'un corps sur un autre ayant un niveau potentiel nul ou plus faible que le sien, ce qui constitue la *décharge électrique*.

Faraday considérait quatre sortes de décharges : — 1<sup>o</sup> la *décharge disruptive* se faisant à travers un milieu non conducteur, qui est divisé ou refoulé; décharge qui peut se diviser en *décharge explosive* toujours accompagnée d'une vive lumière (étincelle), et en aigrettes, lueurs, décharges obscures, qui se font plus ou moins lentement; — 2<sup>o</sup> la *décharge inductive*, pendant laquelle il y a décomposition polaire dans les molécules du milieu plus ou moins mauvais conducteur interposé, et recombinaison successive d'une molécule à l'autre, comme les tubes étincelants nous en montreront une image (1690); — 3<sup>o</sup> la *décharge conductive*: l'électricité se déplace par *conduction* le long d'un conducteur, par une sorte d'écoulement de durée appréciable et en éprouvant plus ou moins de résistance; — 4<sup>o</sup> la *décharge par convection*, dans laquelle l'électricité est enlevée à la surface d'un corps par les molécules de l'air ou les parcelles qu'il tient en suspension, et qui étant ensuite repoussées, emportent l'électricité qu'elles ont prise pendant le contact. Ici il n'y a pas déplacement spontané de l'électricité, elle est emportée par des molécules pondérables, et le phénomène doit se comparer à la *convection* de la chaleur dans les liquides, phénomène bien différent de la conduction (II, 975).

Les trois premiers genres de décharge peuvent exister simultanément, et concourir à un même phénomène, dans des proportions très-variées. C'est pourquoi nous n'établirons pas de classification d'après le mode de décharge, mais d'après la nature des effets produits, effets que nous diviserons en effets *lumineux*, *physiologiques*, *mécaniques*, *calorifiques*, *chimiques* et *magnétiques*.

Nous allons commencer par étudier les conditions de la *décharge explosive*, et nous nommerons *électrodes* les extrémités des corps entre lesquels elle éclate.



**1680. Distance explosive.** — La distance ou portée explosive dépend de l'état de la surface et de la forme des *électrodes*. Ainsi, M. Riess a reconnu que cette distance, toutes choses égales d'ailleurs, est plus grande entre deux plateaux, puis entre un plateau et une boule, qu'entre deux boules. Elle varie aussi avec la grosseur des boules. Mais entre les deux mêmes corps, elle est généralement soumise aux mêmes lois.

**1681. Influence de la charge.** — Harris a trouvé la distance explosive proportionnelle à la charge. Il employait une grande jarre dont les armatures communiquaient avec deux boules de décharge. L'électricité de la machine arrivait dans l'intérieur de cette jarre en passant par une bouteille de Lane (1670), dont le nombre de décharges mesurait la quantité d'électricité introduite dans la jarre. Le nombre de décharges de la bouteille de Lane, comptées entre deux décharges consécutives de la jarre, était proportionnel à la distance explosive.

M. Riess et M. Knochenhauer ont trouvé la même loi. M. Riess opérait sur une batterie, dont il faisait varier le nombre des jarres égales. Il mesurait la distance explosive au moyen de son *micromètre de décharge*, consistant en deux boules *a, b* (fig. 1177), dont une, *b*, peut s'approcher plus ou moins de l'autre, au moyen d'une vis micrométrique *bv*. La distance explosive s'est trouvée proportionnelle à la *densité électrique* de la batterie. M. Riess nomme ainsi le rapport  $E : S$  entre la quantité d'électricité ou charge, *E*, et la surface armée, *S*, de la batterie, surface proportionnelle en nombre des jarres.

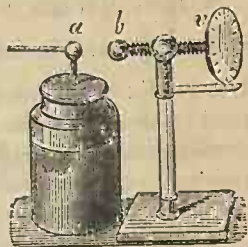


Fig. 1177.

M. Thomson a reconnu que, entre deux plateaux, la distance explosive est proportionnelle à la différence de leurs potentiels, quand la distance dépasse  $1^{\text{mm}}$ . Pour des distances plus petites, la distance explosive augmente beaucoup plus rapidement que la différence des potentiels<sup>1</sup>.

Les expériences qui précèdent ont été faites sur des distances ne dépassant guère  $5^{\text{mm}}$ . M. Gaugain a opéré sur de grandes distances et a trouvé que, si le rapport entre la distance et le potentiel est à peu près constant au-dessous de  $5^{\text{mm}}$  de portée explosive, ce rapport augmente rapidement pour de plus grandes distances. L'électricité était fournie par un plateau isolé, communiquant avec une machine électrique que l'on faisait tourner régulièrement; le potentiel de ce plateau était représenté par l'écart des feuilles d'or d'un électromètre muni d'une longue tige horizontale, sur laquelle le plateau agissait par influence. La quantité d'électricité fournie à ce plateau était mesurée par un électromètre de décharge (1662)<sup>2</sup>.

**1682. Influence de la densité d'un même gaz.** — Harris a trouvé que

<sup>1</sup> *Traité d'électricité statique*, par M. E. Mascart, t. II, p. 70.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 75.

la quantité d'électricité, condensée dans une même jarre, nécessaire pour qu'il y ait décharge entre deux boules maintenues à une distance constante, est en raison inverse de la densité de l'air; et comme, cette densité restant la même, la quantité d'électricité nécessaire est proportionnelle, entre certaines limites, à la distance explosive (1681), on voit que, si la charge reste la même, la distance explosive est en raison inverse de la densité de l'air. Nous disons la *densité* et non la *pression*, parce qu'il résulte des expériences de Harris, que, jusqu'à la température de 148°, la distance explosive est la même dans l'air froid, et dans l'air chaud, en vase clos, où la densité du gaz ne peut pas varier. S'il est libre de se dilater, sa résistance diminue. Cependant dans les températures très-élevées, la résistance est réellement diminuée par la chaleur.

La *densité électrique* (1681) a aussi une influence sur la distance explosive. M. Knochenhauer et Masson, chacun de leur côté, ont trouvé que, pour obtenir la décharge à une même distance, il faut que la densité électrique soit proportionnelle à la densité de l'air.

M. Riess, à la suite de nombreuses expériences, est arrivé au même résultat, et il a représenté la distance explosive, par la formule  $D = K \frac{E}{S}$ , dans laquelle  $E : S$  représente la densité électrique, et  $K$  une constante qui correspond à la densité 1. Cette formule permet de calculer la charge  $E$  d'une batterie, quand on connaît  $D$ ,  $S$  et  $K$ . Nous voyons qu'il y a une grande différence entre la résistance à la déperdition, qui augmente quand la densité de l'air diminue, et la résistance à la décharge explosive, qui augmente au contraire avec cette densité.

M. Cailletet a opéré sous de très-fortes pressions dans l'appareil au moyen duquel il a étudié la loi de Mariotte (I, 382). La partie supérieure du tube, qui sortait en dehors du cylindre d'acier enveloppant la partie renflée, était traversée par des tiges de platine entre lesquelles se faisait la décharge. L'électricité était fournie par une bobine de Ruhmkorff, et l'éclat des étincelles augmentait avec la pression de l'air. Vers 50 atmosphères elles étaient environ 200 fois plus brillantes qu'à la pression ordinaire, puis cessaient tout à coup de se produire, la résistance du gaz ne pouvant plus être vaincue par la tension électrique<sup>1</sup>.

**1683. Expériences de MM. Wiedemann et Ruhmann.** — La méthode employée par ces deux physiciens est très-remarquable<sup>2</sup>. D'abord, pour éviter l'influence de l'électricité qui adhère au verre, ils plaçaient les boules de décharge dans un récipient cylindrique en laiton, qui les préservait des influences extérieures, et les résultats étaient les mêmes quand ce récipient était isolé ou non isolé. Deux ouvertures opposées garnies de glaces permettaient de voir les étincelles. Le flux d'électricité, fourni par une machine de Holtz, était évalué par la déviation de l'aiguille d'un *rhéomètre* (II, 841) dont il parcourait le fil de cuivre, déviation qui, d'après l'expérience, est proportionnelle à l'intensité du flux.

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. LXXIV, p. 1283.

<sup>2</sup> Annales de Poggendorff, t. CXLV, et Journal de physique, t. I, p. 259.

Pour évaluer le temps qui séparait deux étincelles consécutives, qui étaient très-rapprochées, on observait leur image dans un miroir tournant (1, 634) fixé à l'arbre de la machine, de manière que les étincelles vues dans ce miroir correspondaient toujours à une même position du disque tournant, qui n'est pas généralement parfaitement plan. Comme, en outre, les étincelles partant successivement de divers points des boules, changeaient continuellement de position, on observait leur image au moyen d'une lunette héliométrique, dont la lentille objective est partagée suivant un diamètre, en deux moitiés pouvant glisser l'une contre l'autre de quantités données par une vis micrométrique. Le plan de séparation des deux moitiés étant perpendiculaire sur le milieu de la droite horizontale joignant les centres des deux boules, chaque étincelle linéaire vue dans le miroir conservait cette même forme, quand les deux moitiés de la lentille étaient juxtaposées de manière à présenter un contour circulaire. Mais si l'on abaissait l'une des moitiés, le trait lumineux paraissait formé de deux parties parallèles l'une plus basse que l'autre.

On pouvait voir dans le miroir tournant deux étincelles successives à la fois, qui se divisaient en quatre moitiés, et l'on faisait marcher la vis micrométrique de manière à amener la moitié de gauche d'une des images à coïncider avec la moitié de droite de l'autre. Cette coïncidence persistait ensuite quelque fussent les oscillations des étincelles. On reproduisait la coïncidence en sens inverse; et, du déplacement total de la vis, on déduisait par le calcul la distance angulaire des images de deux étincelles consécutives.

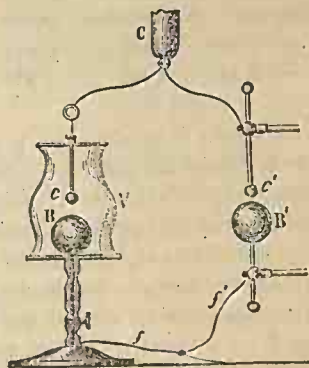


Fig. 1178.

On a trouvé par cette méthode, que la coïncidence persiste quelque soit la vitesse de la machine, et comme la quantité d'électricité qu'elle fournit est proportionnelle à cette vitesse, on voit que l'intervalle de temps entre deux étincelles correspond à un même déplacement des plateaux et que, par conséquent, chaque décharge est produite par la même quantité d'électricité. — Quand la pression  $p$  du gaz change, l'intervalle de temps,  $t$ , qui sépare deux décharges consécutives est donné approximativement par la formule empirique  $t = a + bp - \frac{c}{p^2}$ , dans laquelle  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , sont des constantes qui dépendent de la distance, de la grosseur relative et de la matière des boules de décharge, et de la nature du gaz.

**1684. Résistance des divers gaz.** — Les divers gaz, sous la même pression, présentent des résistances à la décharge un peu différentes. Debe-reimer, Schaufault, Morgan avaient fait quelques observations sur ce sujet, dont Faraday s'est longuement occupé. La figure 1178 représente l'appareil employé.

L'électricité d'une machine arrive sur le conducteur C, et passe sur les boules isolées et égales  $c$ ,  $c'$ , d'où elle peut s'élaner sous forme d'étincelle sur l'une des boules égales B et B', qui communiquent avec le sol par les fils  $f$ ,  $f'$ . La boule B est renfermée dans un récipient contenant successivement différents gaz, et dans lequel la boule  $c$  peut s'enfoncer plus ou moins. L'expérience consistait à chercher quelle distance il fallait donner aux boules  $c'$ , B' pour que la décharge se fit indifféremment entre elles ou entre les boules  $c$  et B dont la distance restait constante. Les résistances d'un gaz et de l'air étaient alors en raison inverse des distances B  $c$ , B'  $c'$ . En prenant pour unité la résistance dans l'air, la distance B  $c$  étant de  $n^{\text{mm}}$ , la résistance du gaz était  $x = D : n$ , D étant la distance B'  $c'$ . Voici quelques résultats, les boules  $c$ ,  $c'$  recevant soit de l'électricité positive soit de l'électricité négative :

	Hydrogène,	gaz d'éclairage,	oxygène,	azote,	a. carbonique,	gaz oléfiant,	a. chlorhydrique.
(+)	0,597	0,790	0,815	0,992	1,032	1,020	1,782
(-)	0,444	0,847	0,823	1,040	0,952	1,177	1,161

Il résulte de ce tableau que la résistance à la décharge ne dépend pas seulement de la densité des gaz, mais aussi de leur nature; car le gaz oléfiant résiste plus que l'oxygène et l'acide carbonique, qui sont plus denses que lui. Du reste, ces nombres ne sont qu'approximatifs, à cause des incertitudes du procédé. En outre des causes très-légères, comme un peu d'humidité, un peu de poussière, l'altération des surfaces des boules, peuvent modifier la distance explosive. On remarque aussi qu'une fois que l'étincelle a franchi la distance des boules B,  $c$  ou B',  $c'$  on peut les écarter sans qu'elle cesse de se produire, comme si l'air avait été modifié par les premières décharges, de manière à moins résister à celles qui suivent. Ce fait général a été attribué par Faraday à la polarité électrique communiquée aux molécules de l'air par la première décharge, et qui diminue leur résistance au passage de l'électricité. Mais il peut provenir aussi de la présence dans l'air de parcelles de métal détachées des boules, comme nous le verrons (1720), par les premières décharges, d'où il résulte que, lorsque cela a lieu, la distance explosive dépend de la nature des boules.

Remarquons encore que l'étincelle n'est pas rectiligne et ne mesure pas la distance des boules, et enfin que les parois du récipient s'électrisent plus ou moins. Aussi la résistance étant 1 en  $c'$  B', Faraday l'a trouvée égale à 1,121 dans le récipient plein d'air, avec l'électricité positive, et à 1,024 avec le fluide négatif. Ces causes d'erreur expliquent aussi pourquoi Masson a trouvé des nombres plus grands que ceux qui sont cités plus haut, en opérant sur l'hydrogène et l'acide carbonique au moyen d'électricité positive. Ce dernier physicien a aussi opéré sur quelques liquides; il a trouvé les résistances 7,4; 12,3; 13; 15,5; dans l'éther, l'eau, l'alcool et l'essence de térébenthine.

**1685. Différence de résistance aux deux fluides.** — Nous avons encore ici à faire la distinction entre la décharge lente, et la décharge explosive. Nous

avons vu que le fluide négatif se perd plus vite par le contact de l'air, pour les fortes tensions, que le fluide positif (1639). Quand il s'agit de l'explosion, le contraire a lieu, et le fluide positif traverse plus facilement l'air, en le divisant, que le fluide négatif. Entre deux boules égales, il n'y a aucun moyen de juger du plus ou moins de facilité des deux fluides à traverser l'air; mais si l'une des boules, plus petite que l'autre, favorise la sortie du fluide (1629), cette influence sera plus sensible sur le fluide qui traverse le plus facilement l'air, et la portée explosive sera plus grande quand ce fluide arrivera par la plus petite des deux boules. C'est, en effet, ce qui a lieu. Faraday adapta des boules inégales aux extrémités de deux arcs identiques, et les présenta l'un à l'autre de manière que les boules inégales fussent en présence, et deux à deux à la même distance. Il vit toujours la décharge se faire du côté de la petite boule de l'arc qui apportait l'électricité positive. — Becquerel a fait beaucoup d'expériences du même genre. Ayant pris deux boules, l'une de 18<sup>mm</sup>, l'autre de 75<sup>mm</sup> de diamètre, il vit l'étincelle jaillir entre elles à une distance de 125<sup>mm</sup> quand la petite boule était en communication avec une machine positive, et l'autre boule; avec le sol; et à 45<sup>mm</sup> seulement quand les boules étaient placées d'une manière inverse.

Les gaz autres que l'air présentent aussi une résistance différente aux deux fluides, comme le montre le tableau précédent (1684), et l'on voit que les uns laissent passer le plus facilement le fluide positif arrivant par la petite boule, les autres, le fluide négatif.

## II. Lumière électrique.

**1686.** Tant que l'électricité est en repos sur les corps, tant qu'elle reste à l'état d'*électricité statique*, elle ne produit pas d'effet lumineux. Ce n'est que dans l'état de mouvement qu'elle peut communiquer à l'éther le mouvement vibratoire qui constitue la lumière; comme lorsqu'elle s'échappe par une pointe, quand elle s'écoule en grande quantité le long d'un mince conducteur. La lumière est très-vive dans la décharge explosive, dont l'*étincelle électrique* forme le caractère le plus saillant, tout en donnant des indications précieuses sur les conditions de sa production.

**1687. Étincelle électrique.** — Nous avons vu comment l'étincelle est produite par le passage brusque de l'électricité à travers un milieu mauvais conducteur, et comment l'ébranlement communiqué à ce milieu violemment divisé explique l'explosion qui l'accompagne. Les fortes machines électriques, les batteries à grande surface armée, donnent des étincelles longues et volumineuses dont le bruit peut être comparé à celui d'une arme à feu.

**De la forme de l'étincelle.** — La forme de l'étincelle dans les gaz dépend de sa longueur. Dans l'air, elle est rectiligne quand elle est suffisamment courte (*fig.* 1179), les parties légèrement ombrées sont d'un éclat plus faible que les autres, et d'une teinte violacée. Quand la distance dépasse 5 ou 6<sup>cm</sup>, l'éclat

est tellement vif qu'on ne distingue plus de différence de teintes, et le trait lumineux commence à présenter des sinuosités. Quand la longueur est plus grande encore, l'étincelle est très-irrégulière; elle présente ordinairement la forme d'une courbe brillante à sinuosités compliquées *ab* (fig. 1180), laissant échapper de fines ramifications inclinées vers le conducteur négatif. Il arrive, parfois, que l'étincelle se divise en plusieurs branches, quand elle est très-longue.



Fig. 1179.

La forme irrégulière de l'étincelle est assez difficile à expliquer. On l'a attribuée à la résistance de l'air, qui, refoulé brusquement par l'impétuosité du fluide, est comprimé dans le sens où s'élançait ce fluide de manière à offrir plus de résistance; ce qui force l'électricité à changer de direction. On a aussi invoqué le défaut d'homogénéité de l'air, et la présence de parcelles étrangères en suspension. Ajoutons

que l'étincelle emporte souvent avec elle, à l'état de vapeur ou de poussière impalpable, des traces de matière arrachées aux boules de décharge. Nous verrons, plus tard, comment on peut, par l'analyse spectrale, reconnaître dans l'étincelle la présence de ces traces de matière, qui peuvent en modifier un peu la couleur.

**Œuf électrique.** — Pour montrer l'influence de l'air sur la forme de l'étincelle, on fait l'expérience suivante : Un vase de

verre ovale, à robinet (fig. 1181), porte deux tiges métalliques à boules, dont une peut glisser dans une boîte à cuirs. On fait communiquer l'une des tiges avec une machine électrique, et l'autre avec le sol, et l'on



Fig. 1080.



Fig. 1181.

voit des étincelles sinuées jaillir entre les deux boules. Si l'on raréfie l'air, on peut écarter les boules, et les étincelles sont moins sinuées. Enfin, quand la pression n'est plus que de quelques millimètres, l'électricité passe d'une manière continue entre les deux boules, en formant un sphéroïde lumineux, connu sous le nom d'*œuf électrique* ou d'*œuf philosophique*, noms que l'on donne aussi à l'appareil. L'ovale lumineux est d'autant plus renflé que l'air est plus raréfié, et en même temps d'un éclat d'autant plus faible,

surtout dans la partie moyenne, où il présente une teinte plus ou moins violette.

Quand il se trouve entre deux conducteurs, entre lesquels on fait partir l'étincelle, une lame isolante, l'étincelle peut la suivre et jaillir à une bien plus grande distance. Elle peut aussi contourner une lame de verre et en franchir le bord, comme en *acb* (fig. 1182), ou même se détourner pour venir en longer la surface, comme on le voit en A.

#### 1688. Couleur de l'étincelle électrique. —

Faraday a reconnu que l'étincelle électrique présente des couleurs différentes dans

les divers gaz. Dans l'air, l'oxygène, l'acide chlorhydrique sec, l'étincelle est blanche avec une légère nuance bleuâtre, surtout dans l'air; dans l'azote, elle est bleue ou pourpre, et fait entendre un son remarquable. Dans l'hydrogène, la couleur est cramoisie et disparaît quand on raréfie ce gaz. Dans le chlore, l'étincelle est verte; il en est de même dans l'acide carbonique, où sa forme est très-irrégulière. Dans l'oxyde de carbone, elle est tantôt rouge et tantôt verte. L'œuf électrique (fig. 1181) convient à ces sortes d'expériences; on y introduit successivement les gaz qui n'attaquent pas les métaux. — M. E. Becquerel montre, d'un seul coup d'œil, les différentes couleurs de l'étincelle, au moyen de l'appareil (fig. 1183). Les tubes *a*, *a'*, *a''*, ont été fermés à la lampe, après avoir été remplis de divers gaz, et sont réunis par des fils de platine *c*, *n*, *n*, traversant le verre, et interrompus en dedans. Si l'on fait communiquer *c* avec le sol, et *b* avec une boule sur laquelle on fait jaillir des étincelles, on voit d'autres étincelles de couleurs variées se produire aux mêmes instants dans chaque tube. M. E. Becquerel a remarqué que la lumière est d'autant plus blanche que la densité propre du gaz est plus grande.

La matière des boules modifie aussi la couleur de l'étincelle quand la décharge est assez forte pour enlever à ces boules des traces de matière entraînées sous forme de vapeurs ou de poussière impalpable. Par exemple, dans l'air, une forte étincelle est rouge entre deux boules de fer ou de bismuth; verdâtre pour le cuivre et le zinc; violette pour le plomb; jaune pour l'or; cramoisie pour le buis, l'ivoire. Une orange placée entre les deux boules paraît enveloppée, pendant une forte décharge, d'une atmosphère d'un beau rouge orangé.



Fig. 1182.

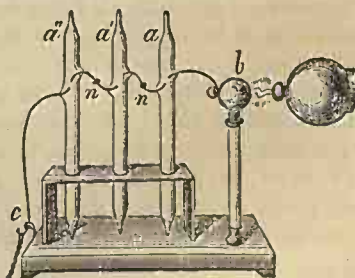


Fig. 1183.

**1689. Durée de l'étincelle.** — Comme tous les phénomènes, l'étincelle a nécessairement une certaine durée, que l'on a cherché à évaluer. Quand l'électricité n'éprouve aucune résistance pour se rendre aux boules de décharge, comme dans la simple étincelle d'une machine, sa durée est moindre que *un millionième* de seconde. Mais quand elle a des résistances à vaincre, ou quand elle doit se détacher de la lame isolante d'un condensateur, sa durée est mesurable. M. Feddersen a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet par la méthode du miroir tournant de Wheatstone<sup>1</sup>. Quand la durée est appréciable, le miroir ayant le temps de tourner autour de son axe parallèle à l'étincelle verticale, l'image paraît élargie horizontalement. Quand une colonne d'eau, ou un fil métallique de plus de 1000<sup>m</sup> ralentit le mouvement de l'électricité, la décharge est intermittente : on aperçoit plusieurs traits lumineux d'autant plus espacés et faibles qu'on approche davantage de la fin de la décharge. Ces traits se resserrent quand on diminue la résistance en remplaçant l'eau par de l'acide sulfurique dilué, de plus en plus conducteur, et la décharge finit par devenir continue, l'image unique étant suivie d'une traînée portant en haut et en bas des bordures peu brillantes entre lesquelles est une partie sombre, qui s'éclaire peu à peu à mesure que la résistance diminue encore. Mais il arrive un moment où la durée de la décharge atteint un minimum, après lequel cette durée augmente quand la résistance continue de diminuer. Dès lors la décharge devient *oscillante* et part alternativement des deux boules. La bande semble formée de rubans de plus en plus inclinés, et entrelacés comme dans une tresse plate, et elle est bientôt remplacée par deux bordures de taches d'un faible éclat, séparées par un espace sombre. Enfin, quand la résistance est très-faible, on voit de nouveau plusieurs traits un peu élargis, dont le nombre est d'autant plus grand que la résistance est plus faible. Il faut ordinairement, pour distinguer ces apparences, remplacer le miroir plan par un miroir sphérique, qui projette une image de l'étincelle sur une lame de verre recouverte de collodion sensibilisé, sur lequel la traînée est *photographiée*. Mais il faut alors que l'étincelle, qui était fournie par une bouteille de Leyde, parte toujours des mêmes points; ce que l'on obtenait en recouvrant les boules de gomme laque, excepté aux points les plus rapprochés. A l'œil nu, des effets de coloration, probablement dus à des matières arrachées aux boules, prolongent la durée de l'apparence lumineuse.

La durée de l'étincelle a aussi été étudiée par une seconde méthode, due à Wheatstone; elle consiste à éclairer, au moyen de l'étincelle, un disque tournant rapidement et sur lequel sont tracés des rayons très-serrés. Wheatstone constata que ce disque paraissait fixe quand il était illuminé par l'étincelle d'une machine électrique; d'où il conclut qu'il ne tournait pas d'une quantité appréciable pendant la durée de cette étincelle, durée qui, d'après son calcul, n'était pas de *un millionième de seconde*.

M. Felici a appliqué cette méthode à la décharge d'une bouteille de Leyde;

<sup>1</sup> *Annales de Poggendorff*, t. CIII, et *Annales de chimie et de phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. LIV et LXIX.



et, pour les grandes vitesses, il a toujours vu les traits un peu élargis<sup>1</sup>.

MM. Cazin et Lucas ont beaucoup perfectionné cette méthode<sup>2</sup>. Un disque opaque, de 15<sup>cm</sup> de diamètre, porte sur son bord 180 traits transparents; il est masqué par un second disque opaque et fixe portant près de son contour 6 traits transparents, distribués dans une étendue égale à l'espace occupé par 5 traits du disque tournant, de manière à former un vernier permettant d'évaluer  $\frac{1}{5}$  des divisions de ce dernier. Les étincelles partent au foyer d'une lentille, qui envoie des rayons parallèles et perpendiculaires aux disques, qu'on observe au moyen d'une petite lunette. Quand le disque mobile tourne d'une de ses 180 divisions, les 6 traits du vernier sont successivement mis en coïncidence avec un trait du disque tournant; et si ce dernier fait un tour entier, il y a  $180 \times 6$  ou 1080 coïncidences; et il y en a  $n \times 1080$  par seconde, si le disque fait  $n$  tours en une seconde.

MM. Lucas et Cazin ont étudié, au moyen de leur appareil, la durée de l'étincelle de batteries chargées par une machine de Holtz mise en mouvement, ainsi que le disque tournant, par un moteur Hugon (II, 1243). Avec une décharge n'ayant pas de durée, on ne verrait qu'un trait lumineux, si l'on avait la chance d'avoir une coïncidence au moment où l'étincelle éclate. Si celle-ci présente une certaine durée, on verra plusieurs coïncidences successives qui paraîtront simultanées à cause de la durée de l'impression dans l'œil. Soit  $0$  le temps qui sépare deux coïncidences successives et  $t$  la durée de l'étincelle; on pourra poser  $t = k0$ . Si l'étincelle commence immédiatement après une coïncidence, on verra  $k$  traits brillants, et l'on en verra  $k + 1$ , si elle commence un peu avant une coïncidence. Pour tenir compte de ces deux éventualités, soit  $\mu$  la probabilité de voir  $k + 1$  traits,  $1 - \mu$  sera celle d'en voir  $k$ . Sur  $N$  étincelle, on en verra donc  $\mu N$  fois  $k + 1$  et  $(1 - \mu)N$  fois  $k$ ; de sorte que la somme des coïncidences sera

$$S = \mu N (k + 1) + (1 - \mu) N k = N (k + \mu) = N \left( \frac{t}{0} + \mu \right)$$

en remplaçant  $k$  par sa valeur  $t : 0$ . On tire de là, pour la durée de l'étincelle,  $t = 0 \left( \frac{S}{N} - \mu \right)$ . — Pour déterminer la probabilité  $\mu$ , on faisait de nombreuses expériences avec une lumière fixe, en donnant au disque des positions variées prises au hasard. On observait combien de fois sur cent, deux traits coïncidaient. Pour l'appareil employé, on avait  $\mu = 0,70$ . — Les différentes lois constatées par l'expérience sont résumées dans la formule

$$t = H \frac{(1 - a^x) (1 - b^y)}{1 + cz^{\frac{1}{2}}}$$

dans laquelle  $t$  est la durée de l'étincelle,  $x$  la surface armée de la batterie,  $y$  la

<sup>1</sup> *Nuovo cimento* (1862), et *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXIX, p. 248.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XXVI, p. 477.

distance explosive,  $z$  la résistance du circuit, et  $H, a, b, c$  des constantes, dont la première seule dépend des boules de décharge.

**1690. Jeux de l'étincelle électrique.** — On trouve dans les cabinets de physique une foule d'appareils disposés de manière à multiplier l'étincelle, et à produire des effets variés. Le principe de tous ces appareils est le même : on colle, en séries, sur du verre, de petits morceaux de feuille d'étain  $a, b, c, d, e$  (fig. 1184), laissant entre eux un petit espace. Si l'on fait communiquer l'extrémité  $a$  de la série, avec une machine électrique, positive par exemple, et l'autre extrémité avec le sol, l'électricité de  $a$ , décompose par influence le fluide neutre de  $b$ , l'électricité positive provenant de cette décomposition agit de même sur  $c$ , et ainsi de suite jusqu'au dernier morceau d'étain, dont le fluide positif passe dans le sol. Dès que la charge est assez forte en  $a$ , l'étincelle jaillit entre  $a$  et  $b$ .

Fig. 1184.

Elle se produit en même temps entre  $b$  et  $c$ , le fluide négatif de  $b$  étant détruit, ce qui permet à son fluide positif de se porter subitement vers  $c$ , et d'y produire une nouvelle décomposition de fluide neutre, et l'étincelle part. La destruction du fluide négatif qui en résulte sur  $c$ , détermine de même l'explosion entre  $c$  et  $d$ ; et ainsi de suite de proche en proche. Ce mouvement se fait avec une telle rapidité, que les étincelles apparaissent au même instant dans tous les intervalles.

— On produit le même effet au moyen de globules métalliques enfilés dans un brin de soie, et séparés par des nœuds.

**Tubes et carreaux étincelants.** — Quand les morceaux d'étain sont collés sur des tubes de verre, on a les *tubes étincelants* (fig. 1185). Quand ils sont collés sur des lames de verre, on a les *carreaux* ou *tableaux étincelants*. L'abbé Bertholon a surtout varié ces sortes d'appareils. Quand il voulait former un dessin avec lignes qui se coupent, il en

Fig. 1185.

mettait une partie d'un côté de la lame de verre, et l'autre, du côté opposé. La disposition suivante permet de former les dessins les plus compliqués sans avoir besoin de se préoccuper de l'entrecroisement des lignes. On colle sur la lame de verre (fig. 1186) une bande d'étain très-étroite, allant d'un côté à l'autre, et formant une ligne continue, dont une des extrémités communique avec le sol par le pied de

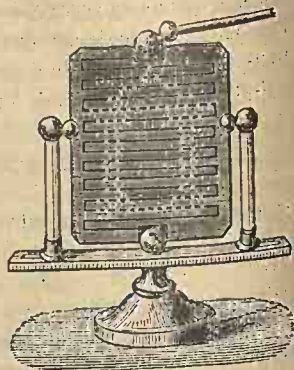


Fig. 1186.

l'instrument, et l'autre aboutit à une sphère placée à la partie supérieure. On pratique ensuite sur cette bande des solutions de continuité formant un dessin. Si l'on fait arriver l'électricité par la boule supérieure, il se produit une étincelle à chaque solution de continuité. Plus les bandes parallèles sont étroites et rapprochées, plus le dessin peut contenir de petits détails.

**Carreau magique.** — On étend, sur une lame de verre, une couche d'eau épaissie par de la gomme, et l'on y projette de la limaille de cuivre qui reste collée après la dessiccation, de manière à imiter l'aventurine. On fait passer à travers la surface ainsi préparée la décharge d'une machine électrique, et l'on voit (*fig. 1187*) des serpenteaux lumineux circuler à travers les grains métalliques, les uns très-brillants et allant d'une extrémité à l'autre, les autres plus fins et interrompus après un faible parcours. Ils changent à chaque instant de figure et de position, et sont produits par une foule de petites étincelles jaillissant entre les grains métalliques, comme dans les tubes étincelants.



Fig. 1187.

**1691. LUMIÈRE DANS L'ÉCOULEMENT CONTINU DE L'ÉLECTRICITÉ.** — Au lieu d'être produite par une décharge explosive, la lumière électrique peut être le résultat d'un écoulement continu d'électricité, comme nous en avons vu un exemple dans l'œuf électrique.

**Aigrette.** — Lorsque l'électricité positive s'échappe dans l'air, d'une partie saillante, par exemple d'une petite boule placée sur un conducteur fortement électrisé *positivement*, elle présente l'apparence d'une *aigrette lumineuse divergente*, dont l'éclat, assez vif au point de départ, où se trouve souvent une sorte de pédicule rectiligne, va en diminuant à mesure qu'elle s'épanouit. Cette aigrette, signalée d'abord par Gray, est composée de séries ramifiées de points brillants, d'autant plus faciles à distinguer qu'elle est plus grande (*fig. 1188*). Elle fait entendre une sorte de petillement. Plus la boule est petite, plus ces effets sont faibles. Le bruit est, en même temps, plus continu, forme un son plus aigu, et les points brillants de l'aigrette sont moins distincts. Avec un petit cylindre arrondi, implanté sur le conducteur, l'aigrette est encore plus faible; et avec une pointe, elle n'est plus qu'une lueur continue et silencieuse. Ces changements sont dus à l'affaiblissement de la tension, à mesure que l'électricité s'échappe plus facilement.



Fig. 1188.

Pour expliquer l'aspect de l'aigrette, Faraday admet qu'elle est composée d'une multitude de petites étincelles qui jaillissent entre les particules de l'air, comme entre les grains des carreaux magiques, et produisent le petillement observé. Au point de départ, la lumière est plus vive, parce que les molécules d'air, qui reçoivent toute l'influence électrique, sont moins nombreuses qu'à une plus

grande distance. On rend l'aigrette plus brillante en approchant un plateau bon conducteur non isolé (fig. 1189), qui est induit et agit dans le même sens que la machine pour *polariser* les particules de l'air. L'aigrette présente alors des aspects variés qui dépendent de la forme et des dimensions de ce corps, vers lequel elle s'incline. Quand la distance est telle qu'une étincelle soit près de jaillir, on voit les ramifications de l'aigrette se rapprocher à leurs extrémités et se réunir au plateau par une colonne de filaments blanchâtres, assez brillants tout près du plateau.



Fig. 1189.

Wheatstone a démontré que l'aigrette est discontinue, et que les décharges moléculaires se transmettent successivement, à cause de la mauvaise conductibilité de l'air, au moyen de son miroir tournant placé en face d'une aigrette, et auquel est imprimée une vitesse de 6 à 8 cents tours par seconde. On voit alors, dans le miroir, une foule de petits traits lumineux, allongés dans le sens du mouvement et se dépassant les

uns les autres ; ce qui prouve la discontinuité de l'aigrette, et en même temps la durée appréciable de chaque étincelle moléculaire. — Il suffit souvent de déplacer rapidement les yeux, la tête restant fixe, pour observer cette discontinuité.

Faraday a obtenu des aigrettes dans l'essence de térébenthine contenue dans un vase conducteur non isolé, dans laquelle il faisait arriver de l'électricité positive par un fil de platine enveloppé d'un tube de verre, excepté à son extrémité. L'aigrette, difficile à obtenir, était très-petite, composée de ramifications simples très-divergentes, visibles seulement dans l'obscurité la plus profonde.



Fig. 1190.

**1692. Différence entre les aigrettes positives et négatives.** — On peut dire, en général, que l'aigrette sortant librement dans l'air d'un conducteur positif est plus belle que celle d'un conducteur négatif. C'est surtout aux pointes que la différence devient sensible : tandis que la pointe positive donne une gerbe divergente, la pointe négative ne donne qu'un point lumineux plus ou moins diffus (fig. 1190), cela se voit nettement aux peignes des machines d'induction : des traînées lumineuses s'étendent, des pointes qui versent l'électricité positive sur le plateau tournant, vers les parties de ce plateau qui s'en approchent, tandis que les pointes négatives

ne présentent que des points brillants. La différence entre les deux sortes d'aigrettes, signalée d'abord par Cavallo, est moins marquée quand l'air est raréfié. Elle n'est pas la même dans divers gaz ; elle est plus prononcée dans l'azote que dans l'air. Dans l'hydrogène et dans l'oxygène, l'aigrette positive est moins belle que dans l'air, tandis que la négative reste la même. Dans l'oxyde

de carbone et dans l'acide carbonique, les deux aigrettes sont à peu près les mêmes et peu brillantes. On peut, du reste, donner, dans l'air, à l'aigrette négative l'apparence d'une aigrette positive, en fournissant beaucoup plus d'électricité. Faraday a conclu de là que les différences proviennent de ce que le fluide négatif s'échappe plus facilement dans l'air que le fluide positif; de manière que, dans les mêmes conditions de production, la charge est toujours moindre quand elle est formée de fluide négatif. Nous avons vu, en effet (1685), que l'électricité négative se perd plus facilement dans l'air que la positive, et que la différence n'est pas la même dans les divers gaz, ce qui a été regardé comme donnant un caractère distinctif entre les deux électricités. Mais ces résultats s'expliquent aussi très-facilement dans la théorie de Franklin, par la facilité différente qu'a l'électricité unique à entrer ou à sortir par les parties saillantes des conducteurs, et il est à remarquer que l'aigrette entre deux conducteurs part toujours de celui qui est électrisé *en plus*.

#### 1693. Lumière électrique dans les gaz raréfiés. —

Quand on diminue la pression de l'air, les aigrettes se produisent plus facilement, et peuvent atteindre une grande longueur. En même temps, elles se transforment en lueurs continues de nature toute différente. On suit facilement cette transformation avec l'œuf électrique (1687). Quand la pression intérieure est de 5 à 6<sup>cm</sup>, on voit entre les deux boules une aigrette ovale composée de traits violacés ou de bandes longitudinales accompagnées de quelques ramifications dirigées vers les parois. Mais quand la pression n'est que de 2 à 3<sup>mm</sup>, l'espace entre les boules est occupé par une lueur purpurine diffuse, plus brillante près de la boule positive, tandis que la boule négative et sa tige continuent à être enveloppées d'une épaisse auréole de lumière violacée. Si l'électricité arrive directement à la boule positive, c'est-à-dire sans étincelles au point où elle communique avec la machine, la lueur intermédiaire disparaît, et l'on a ce que Faraday appelait une *décharge obscure*.

Les lueurs ou *efflues* ne montrent aucune discontinuité dans le miroir tournant (1691). On les attribue généralement à un transport d'électricité par conduction à travers le gaz très-raréfié. Elles peuvent se montrer dans l'air à la pression ordinaire, sur les parties saillantes des machines fortement chargées; on les voit aussi apparaître quand on électrise les corps par le frottement, ce qui avait beaucoup émerveillé les premiers électriciens.

Dans les gaz raréfiés, l'électricité peut franchir des distances considérables. Par exemple, si l'on raréfie notablement l'air dans un gros tube de plusieurs mètres de longueur (*fig. 1191*) terminé par des viroles métalliques qui communiquent, l'une avec le sol l'autre avec une machine électrique, on voit de longues aigrettes ramifiées partant de l'extrémité positive. Quand l'air est très-raréfié,



Fig. 1191.

on ne distingue plus d'aigrettes, mais le tube est rempli d'une lueur purpurine qui semble marcher tumultueusement dans le sens de l'électricité positive, et qui augmente d'éclat dans les points dont on approche un corps conducteur non isolé.

**1694. Lumière électrique dans différents milieux.** — Faraday a reconnu que les aigrettes, comme on devait s'y attendre, présentent des apparences différentes dans les divers gaz. C'est dans l'*azote* qu'elles sont le plus remarquables : quand ce gaz est raréfié, l'aigrette est magnifique. Dans l'*hydrogène*, elle est verdâtre, même quand il est raréfié, auquel cas elle se ramifie d'une manière très-prononcée. Dans l'*oxygène*, l'aigrette est comme dans l'air, mais bien moins brillante. Dans l'*oxyde de carbone*, elle est courte, de couleur verte, et, quand le gaz est raréfié, grise et d'un très-faible éclat. On peut en dire autant de l'*acide carbonique*, si ce n'est que la couleur est légèrement pourpre. Enfin, dans l'*acide chlorhydrique*, il est très-difficile d'obtenir des aigrettes, et elles sont extrêmement faibles.



Fig. 1192.

**Tubes de Geissler.** — C'est surtout dans les *tubes de Geissler* qu'on voit bien les différences de couleur des lueurs électriques dans les gaz ou vapeurs très-raréfiés. On nomme ainsi des tubes à renflements et inflexions variés (fig. 1192), dans lesquels on a fait le vide en y laissant des traces de gaz ou de certaines vapeurs. L'électricité arrive par deux fils de platine soudés au verre et pénétrant dans les extrémités. Le fil négatif apparaît enveloppé de son auréole violette, et l'effluve électrique paraît souvent se mouvoir du fil positif au négatif, en présentant plus d'éclat dans les parties les plus étroites. On varie beaucoup les formes de ces tubes ; on en fait à plusieurs enveloppes composées de différentes espèces de verre dans lesquelles la lumière électrique produit une illumination particulière connue sous le nom de *fluorescence* et dont la couleur est indépendante de celle que produit le gaz.

M. Daguenet a trouvé moyen de faire varier la densité du gaz ou de la vapeur en opérant dans la chambre d'un baromètre dans laquelle pénètre un fil de platine, et dont il enfonce plus ou moins le tube dans une cuvette profonde. La chambre peut être renflée de différentes manières.

**Stratification de la lumière électrique.** — La lueur électrique, dans les expériences ci-dessus, est souvent divisée en couches transversales à la direction

de l'écoulement électrique. Nous étudierons plus tard ce phénomène quand nous parlerons de la bobine de Ruhmkorff, au moyen de laquelle il a été découvert, et se produit dans les meilleures conditions.

**1695. Lucurs dans le vide barométrique.** —

L'expérience montre que la lumière électrique s'affaiblit à mesure que la matière pondérable devient plus rare. On a donc naturellement été conduit à chercher si elle se montrerait encore dans le vide le plus complet que l'on peut faire.

Cavendish a expérimenté dans le vide barométrique, au moyen d'un *double tube* (fig. 1193), dont les deux branches contiennent des colonnes de mercure soutenues par la pression atmosphérique, et plongent dans des cuvettes séparées, dont une communique avec une machine électrique, et l'autre, avec le sol. L'électricité passe d'une cuvette à l'autre à travers les colonnes de mercure et la chambre supérieure, qui paraît alors remplie d'une lueur agitée à peine visible. Cette lueur est produite dans la vapeur de mercure (II, 1132), et est d'autant plus faible que la température est plus basse.

H. Davy a fait des expériences qui montrent bien l'influence de la température<sup>1</sup>. Ayant rempli de mercure sec un tube recourbé *cr* (fig. 1194), traversé par une tige de platine *t* scellée dans le verre, il forma le vide barométrique en *c* en pompant l'air par le robinet de fer *r*, et fit communiquer le bouton *t* avec une machine électrique, et le robinet *r* avec le sol. Il vit alors, dans l'espace *c*, quand la température était au-dessous de 0°, une lueur excessivement faible qui devenait de plus en plus visible quand la température s'élevait, et devenait vive et de couleur verte quand le tube était très-chaud. Si l'appareil contenait un peu d'air, la lumière passait au bleu, puis au pourpre. De l'étain pur en fusion ayant été substitué au mercure, et le vide ayant été fait pendant que le tube était plongé dans un bain de métal fondu, la lueur se montra encore à — 17°, mais tellement faible qu'on ne pouvait l'apercevoir que dans l'obscurité la plus complète; sa couleur était jaunâtre, et l'intensité n'était pas sensiblement augmentée par la chaleur. Davy a fait d'autres expériences en remplaçant le mercure par l'huile d'olive ou le chlorure d'antimoine, qui donnent peu de vapeur. La lueur était blanche et faible dans la vapeur d'huile, purpurine et plus vive, dans celle du chlorure d'antimoine.



Fig. 1193.



Fig. 1194.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XX, p. 168.

Nous avons déjà vu (1582) que le mouvement du mercure dans le tube du baromètre est accompagné d'une lueur électrique. Dans ce cas, l'électricité est produite par le frottement, et est aussitôt neutralisée avec lumière. Pour répéter cette expérience, on sépare d'un baromètre à long tube, en fondant le verre, la chambre dans laquelle on a laissé quelques gouttes de mercure que l'on agite dans l'obscurité (fig. 1195). — On emploie encore un tube à renflements, courbé en cercle et contenant du mercure *m* (fig. 1196). Ce tube faisait d'abord partie de la chambre d'un baromètre, dont on l'a séparé en *t*, en fondant le verre. Quand on le fait tourner, le frottement du mercure produit des lueurs. — Jean Bernouilli s'occupa beaucoup de la construction de ces tubes, que l'on nommait *phosphores mercuriels*; et M. Geissler, en soudant dans leur intérieur un tube plus étroit présentant de nombreux renflements, a rendu le frottement plus prononcé, de manière que la lumière est assez vive pour qu'on puisse se conduire dans l'obscurité. Il est à remarquer que le tube est électrisé négativement, et que la qualité du verre a une grande influence sur les résultats.

C'est en cherchant les meilleures conditions pour obtenir de vives lueurs dans le baromètre, qu'un ouvrier allemand,



Fig. 1195.

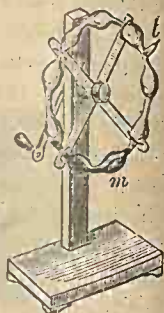


Fig. 1196.

vers 1723, eut l'idée de faire bouillir le mercure dans le tube, ce qui a toujours été pratiqué depuis dans la construction des baromètres.

**1695. Pouvoir isolant du vide.** — L'affaiblissement extrême des lueurs électriques dans les milieux très-rares, a conduit à supposer qu'il ne devrait se montrer aucune lumière dans le vide complet. En effet, Morgan, en 1785, puis Walsh, ont constaté l'absence de lueurs dans la chambre barométrique, quand l'instrument était construit avec beaucoup de soin. Il y a plus, c'est que l'électricité refuse de passer à travers le vide absolu, c'est-à-dire que le vide est isolant. Ce résultat, admis de Faraday, a été prouvé par Masson en 1851, en montrant que l'électricité lancée dans un circuit par une bobine de Ruhmkorff, était interceptée quand il interposait dans ce circuit un tube de verre à électrodes de platine, dans lequel il avait fait un vide barométrique aussi parfait que possible<sup>1</sup>. Ayant placé la langue dans ce circuit, il n'éprouva aucune sensation, tandis que l'appareil donnait des commotions insupportables en l'absence du tube vide. Il conclut de là que la matière pondérable est indispensable à la propagation de l'électricité; mais ces expériences furent peu remarquées. La question a été reprise depuis, notamment par MM. Hittorff, Geissler, Grove, Gassiot.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXI, p. 314.



M. Hittorff, en 1865, obtint un vide presque complet dans des tubes de 5 à 6<sup>cm</sup> de longueur, munis d'électrodes de platine ou d'aluminium, *t* (fig. 1197), par le moyen suivant : l'air, d'abord desséché par l'acide phosphorique, était extrait du tube au moyen d'une machine pneumatique à mercure (1, 405), pendant que la température était portée à 500° afin de chasser les dernières traces d'humidité. — La décharge d'une bobine de Ruhmkorff donnant des étincelles de 16<sup>cm</sup>, passait en dehors des tubes, au lieu de franchir dans le vide la distance de moins de 1<sup>mm</sup> qui séparait les électrodes. Quand on enveloppait le tube d'un manchon de verre rempli d'essence de térébenthine, les décharges n'avaient plus lieu.

La figure 1197 représente un appareil construit par M. Alvergniat, au moyen duquel on répète ces expériences. En *t*, est le tube, en verre peu fusible, dans lequel le vide a été fait par la méthode de M. Hittorff, et en le portant, à la fin, à une température voisine de celle du ramollissement du verre. Quand les électrodes sont mises en communication avec les conducteurs d'une machine de Holtz, par les bornes *b*, *b'*, on voit des étincelles jaillir entre les tiges *n*, *n'*, dont la distance peut être de 10 à 15<sup>cm</sup>, tandis qu'on ne voit rien dans le tube *t*, où les électrodes ne sont écartées que de  $\frac{1}{10}$  de millimètre. Si l'on interpose entre les tiges *n*, *n'* un tube de Geissler, ou le long tube à air raréfié (fig. 1192), on voit, dans l'obscurité, l'effluve lumineuse traverser ces tubes dans toute leur longueur, et l'on n'aperçoit aucune lumière entre les électrodes.

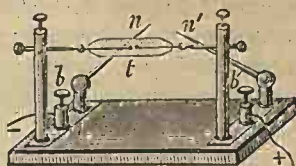


Fig. 1197.

M. Gassiot a imaginé, pour faire le vide dans le tube, de le remplir d'abord d'acide carbonique sec et pur, qu'on aspire ensuite au moyen de la machine pneumatique, et dont on enlève les dernières traces au moyen de potasse caustique. Dans un tube vide, de 1<sup>m</sup> environ de longueur, contenant une couche de potasse qui avait été étalée par fusion sur le verre, M. Gassiot a pu suivre les changements des lueurs électriques à mesure que les dernières traces d'acide carbonique étaient absorbées par la potasse. Bientôt ces lueurs disparurent, et un rhéomètre intercalé dans le circuit indiqua que l'électricité ne passait plus entre les électrodes. — Quand le vide a été fait au moyen de l'acide carbonique, il suffit souvent de chauffer le tube pour que l'électricité passe. La résistance du vide peut aussi être vaincue quand la tension est très-forte, mais alors le platine est attaqué, et une poudre noire se dépose sur les parois du verre. Si l'on employait des mastics, la chaleur produite par l'électricité en ferait dégager des vapeurs, c'est pourquoi il faut sceller au chalumeau les électrodes dans le verre. Quelquefois, enfin, la décharge glisse en dedans, à la surface du verre, en produisant une lueur jaune, qui indique la présence de sodium emprunté à la soude du verre, et l'intervalle des électrodes reste obscur.

**1696. Pression du minimum de résistance.** — Puisque l'électricité

traverse d'autant plus facilement un gaz qu'il est plus raréfié, et que, d'un autre côté, elle ne peut franchir de très-petits espaces dans le vide presque absolu, il faut qu'il y ait une pression de moindre résistance, au-dessous de laquelle la résistance augmente graduellement. Morren a déterminé cette pression pour divers gaz<sup>1</sup>. Après avoir opéré dans la chambre barométrique, et constaté l'influence gênante de la vapeur de mercure, il opéra dans un petit tube, mis en communication avec un aspirateur à mercure (I, 406), au moyen duquel il pouvait raréfier peu à peu le gaz. La pression était donnée par un manomètre à acide sulfurique, et l'intensité du flux d'électricité, qui était fournie par une bobine de Ruhmkorff, était mesurée par un rhéomètre semblable à celui de l'appareil de Melloni (II, 841). Voici quelques-uns des résultats : Le minimum de résistance s'est montré pour l'*hydrogène*, à la pression de 2<sup>mm</sup>; pour l'*air*, l'*acide carbonique* et l'*oxyde de carbone*, à 0<sup>mm</sup>, 8; pour l'*oxygène*, à 0<sup>mm</sup>, 7; et pour l'*azote*, à 1<sup>mm</sup>. Ces nombres n'ont rien d'absolu, car M. Schultz a montré que les dimensions du tube modifient cette pression limite, qui est aussi influencée par la température.

Nous aurons à revenir plus tard sur les phénomènes de propagation de l'électricité à travers les milieux très-raréfiés, après que nous aurons décrit les appareils d'induction électrodynamique, comme la bobine de Ruhmkorff, au moyen desquels on les produit; et nous décrirons alors ces dispositions, appelées *souppes électriques*, qui laissent passer la décharge avec une facilité différente, suivant l'électrode par laquelle arrive l'électricité positive.

### III. Effets physiologiques de la décharge.

**1697.** Quand la décharge s'effectue à travers des corps qui résistent au déplacement de l'électricité, soit parce qu'ils sont peu conducteurs, soit parce qu'ils ne présentent pas une section suffisante, il se produit divers effets que nous allons passer en revue. Ces effets dépendent : 1° du potentiel du corps que l'on décharge, qui doit être assez grand pour que les résistances soient vaincues; 2° de la quantité d'électricité mise en mouvement, qui dépend de la forme et de l'étendue de la surface de ce corps.

Pour obtenir ces divers effets, on se sert souvent de batteries électriques; mais il faut remarquer qu'on peut, en général, les obtenir également au moyen de la décharge des machines électriques suffisamment puissantes et munies de conducteurs de grande étendue.

**1698. Commotion électrique.** — On nomme effets physiologiques ceux qui sont produits sur les êtres vivants. Ces effets sont d'autant plus intenses que la décharge est plus rapide, et que les quantités d'électricité mises en jeu sont plus considérables.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 325.

Le premier phénomène à citer est la commotion électrique. L'expérience se fait ordinairement au moyen de la *bouteille de Leyde*, et nous avons vu comment on peut faire subir la décharge en même temps à plusieurs personnes *formant la chaîne* (1660). Toutes éprouvent la même secousse quand elles sont isolées; mais si elles ne le sont pas, celles du milieu de la *chaîne* peuvent être un peu moins frappées que les autres, une partie des électricités passant dans le sol, par les pieds de celles qui sont le plus rapprochées de la bouteille. — D'après Arago, il y a des personnes qui interceptent la communication, comme le ferait un corps isolant; ce qui tient probablement à l'épaisseur et à l'état de sécheresse exceptionnelle de l'épiderme de leurs mains.

**Carreau fulminant.** — On fait quelquefois l'expérience au moyen du *carreau de Franklin* ou *carreau fulminant*, vitre encadrée, sur les deux faces de laquelle sont collées des feuilles d'étain qui ne vont pas jusqu'au cadre. Ce condensateur étant chargé, si l'on cherche à saisir un petit objet métallique placé sur le carreau, on en est empêché par la contraction du bras, due à la commotion que l'on reçoit; la communication avec l'armature opposée étant établie par le sol. — Quand la surface d'un condensateur dépasse 5 ou 6 décimètres carrés, la commotion peut se faire sentir jusque dans la poitrine et devenir dangereuse.

Au moyen de batteries à grande surface, on peut tuer des animaux. Pour faire l'expérience, on place l'animal sur un plateau conducteur communiquant avec l'armature extérieure de la batterie, et l'on fait communiquer, au moyen de l'excitateur, quelques points de son corps avec l'armature intérieure. Au moment de l'explosion, l'animal fait un mouvement convulsif et tombe mort. La batterie doit présenter une surface armée d'autant plus grande que l'animal est de plus forte taille. Il faut aussi reconnaître l'influence de l'espèce; ainsi les reptiles résistent beaucoup mieux que les animaux à sang chaud. Priestsley a vu des grenouilles, même très-petites, supporter impunément les plus fortes décharges d'une batterie de 2<sup>m</sup> carrés, qui était plus que suffisante pour tuer un chat. La grande batterie du Musée Teyler, à Harlem, depuis les additions qui y ont été faites, présente 58<sup>m</sup> carrés de surface garnie. La décharge en est effrayante et est capable de tuer un bœuf.

Quand on tire avec la main une étincelle d'une forte machine, on éprouve aussi une commotion aux articulations du poignet et du bras, et même dans la poitrine; l'électricité dégagée par influence, et attirée dans la main et le bras, se combinant en partie, dans l'intérieur des membres, avec le fluide qui l'attire. De plus, l'électricité refoulée dans le sol rentrant brusquement par les jambes, on ressent en même temps une commotion dans les articulations des pieds et des genoux. — L'observateur placé sur un tabouret isolant éprouve aussi la commotion près du point de son corps d'où l'on tire une étincelle. Une étincelle de 35 à 40<sup>cm</sup> de longueur peut être dangereuse, si elle est grosse étant tirée de conducteurs à très-grande surface. La décharge des grandes machines peut tuer des animaux. Dès 1744, le P. Gordon obtenait, au moyen de cylindres de résine qu'il

faisait tourner avec un archet, des étincelles capables de tuer de petits oiseaux.

**1699. Choc latéral ou choc en retour.** — Quand on approche la main d'un conducteur fortement chargé, on peut ressentir une secousse dans le bras, au moment où un autre observateur décharge ce conducteur. C'est qu'il s'est fait une décomposition par influence dans le fluide neutre du bras, et les électricités séparées s'y recombinaient au moment où le conducteur est déchargé. Il se produit un effet analogue quand on décharge une batterie à travers un long fil servant d'excitateur; un électromètre placé près de ce fil s'agit au moment de la décharge. Ces effets, connus sous le nom de *choc latéral*, *choc en retour*, peuvent s'observer sur les membres d'une grenouille fraîchement tuée, que l'on suspend par des conducteurs près d'une machine, dont on tire des étincelles. Une des pattes communiquant avec le sol par un fil métallique, les membres éprouvent un mouvement convulsif à chaque étincelle.

On a cherché à tirer parti de la commotion électrique, dans l'art de guérir. Deux ou trois ans après l'expérience de Leyde, on essayait déjà de combattre les paralysies par la commotion produite par l'étincelle ou par la décharge de la bouteille. Nous reviendrons sur ce sujet quand nous aurons fait connaître les principes sur lesquels sont basées les méthodes employées aujourd'hui.

#### IV. Effets calorifiques de la décharge.

**1700. Inflammation des corps.** — Les effets calorifiques de la décharge consistent en inflammations, fusions et volatilisations de divers corps.

Quand on tire une étincelle avec le doigt, on ne ressent pas de chaleur; la plus forte étincelle n'a même aucune influence à distance sur les thermoscopes les plus sensibles. Ces résultats négatifs doivent être attribués au peu de durée du phénomène; en effet, quand l'étincelle passe à travers des corps combustibles, elle peut y mettre le feu. Gordon paraît en avoir, le premier, fait l'expérience. Ludolf enflamma l'éther en 1744; Winkler, l'eau-de-vie et le lycopode; Gralath ralluma une bougie qu'il venait de souffler, en faisant passer une étincelle à travers la mèche, et Boze mit le feu à de la poudre.



Fig. 1198.

La plus petite étincelle suffit pour enflammer l'éther: on met ce liquide dans un vase métallique, et l'on fait tomber une étincelle en un point mouillé. On rend l'expérience plus piquante en faisant jaillir l'étincelle, du doigt d'une personne montée sur un tabouret isolant (fig. 1198), ou bien en plaçant le vase sur la machine électrique et lui présentant le doigt. Watson causa une grande surprise en enflammant de l'éther par une étincelle tirée au moyen d'un morceau de glace.

Les corps solides peuvent être enflammés par de fortes étincelles fournies

par une machine électrique ou par une batterie. Du linge à demi-carbonisé, de l'amadou, de l'étope saupoudrée de résine ou de soufre, s'allument assez facilement. Pour enflammer la poudre, on en remplit un tube de papier *ae* (fig. 1198), dans lequel on enfonce deux tiges métalliques qui ne se joignent pas, et qu'on fait communiquer avec les deux armatures d'une batterie. On fait en sorte que la décharge ne soit pas trop brusque, par exemple en



Fig. 1198.

terminant l'excitateur par une pointe, ou en interposant une corde mouillée. Si l'on mêle de la limaille de fer à la poudre, l'explosion se fait plus sûrement.

En Autriche, on a appliqué l'étincelle à l'inflammation des fourneaux de mine. Des machines électriques à



Fig. 1199.

deux plateaux et sans conducteurs, servent à charger des jarres, dont la décharge passe à travers un mélange de *sulfure d'antimoine* et d'*oxychlorate de potasse*, qu'enveloppe la poudre. Le mélange communique avec l'armature intérieure, au moyen d'un fil isolé par une enveloppe de gutta-percha, et avec l'armature extérieure, par le sol. On produit ainsi l'explosion à des distances de 11 kilomètres, sur 50 fourneaux à la fois. Les expériences réussissent par le brouillard, la pluie, la neige, et même sous l'eau <sup>1</sup>.

**1701. Pistolet de Volta.** — Les mélanges gazeux explosifs s'enflamment sous l'influence de la plus petite étincelle. On en fait l'expérience au moyen du *pistolet de Volta* (fig. 1199), qui consiste en un vase de métal dans lequel entre une tige métallique *bc*, mastiquée et isolée dans un tube de verre, et dont l'extrémité intérieure arrondie, est très-rapprochée de la paroi du vase. Si, le vase communiquant avec le sol, on touche un corps électrisé avec le bouton *b*, l'étincelle jaillit dans l'intérieur entre l'extrémité de la tige et la paroi du vase, et si ce vase est rempli d'un mélange gazeux explosif, la détonation a lieu, et le bouchon qui ferme l'ouverture par laquelle on introduit les gaz est lancé au loin. Ordinairement, on remplit ce vase de gaz hydrogène, et l'on souffle dans l'intérieur pour y mêler de l'air. On donne à ce petit instrument une foule de formes différentes, mais qui n'offrent aucun intérêt scientifique.



Fig. 1200.

**1702. Eudiomètre de Volta.** — Cet instrument, en usage dans les laboratoires de chimie, pour étudier la composition des gaz, consiste en un cylindre de verre *t* (fig. 1200), fermé par des viroles à robinet *r*, *r'*, surmonté d'une petite cuvette, et reposant sur un pied en forme

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (1850), archives des sciences, t. XXXII, p. 59.

d'entonnoir. La virole supérieure communique avec le sol, et en *o* se trouve un petit appareil à étincelle semblable à celui du pistolet de Volta. — Supposons, par exemple, qu'on veuille connaître dans quelles proportions l'oxygène et l'hydrogène entrent dans la composition de l'eau. On commence par remplir entièrement l'eudiomètre d'eau; puis, le robinet supérieur étant fermé, on y introduit sous l'eau des volumes égaux d'hydrogène et d'oxygène, mesurés dans un tube gradué. On fait jaillir l'étincelle, en approchant du bouton *o*, le plateau d'un électrophore, et les gaz se combinent en partie, en produisant une vive lumière. Pour connaître la nature du gaz restant, on visse sur la cuvette supérieure un tube plein d'eau *T*, et ouvrant le robinet *r*, on y fait passer ce gaz. On ferme ensuite le robinet *r*, on dévisse le tube *T*, et, le fermant avec le pouce, on le transporte sur la cuve à eau, et l'on reconnaît que le gaz, qui n'a plus que le quart du volume du mélange introduit, est de l'oxygène pur; d'où l'on conclut que l'eau a été formée par 1 volume d'hydrogène et  $\frac{1}{2}$  volume d'oxygène.

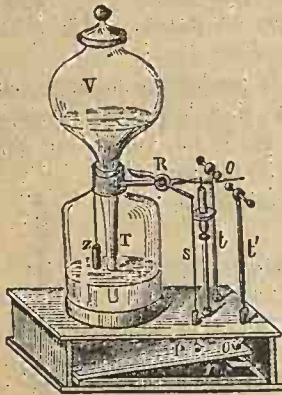


Fig. 1201.

**1703. Briquet électrique.** — Dans cet appareil, imaginé par Volta, un jet de gaz hydrogène est enflammé par une étincelle électrique. Dans un vase fermé, de l'eau mêlée d'acide sulfurique, dégage du gaz hydrogène, au contact d'un cylindre de zinc *z*. La force élastique du gaz fait monter le liquide dans le vase *TV*, le zinc n'est plus baigné par le liquide, et l'hydrogène cesse de se dégager. Dans une boîte, qui porte l'appareil, est renfermé un électrophore électrisé *Pr*, dont le plateau *P* est toujours chargé; une petite bande d'étain collée au bord de la résine *r*, le faisant communiquer avec le sol, pour le débarrasser du fluide négatif. Quand on ouvre le robinet *R*, l'hydrogène s'échappe, et le plateau *P*, soulevé par un cordon de soie *s*, vient toucher en *o* une tige isolée *t'*, et une étincelle jaillit entre le bouton qui la termine et un autre bouton fixé à l'extrémité d'une tige *t*, non isolée; cette étincelle met le feu au jet de gaz hydrogène et celui-ci allume une petite bougie placée sur son passage. — L'électrophore peut rester chargé pendant plusieurs mois, quand on a soin de tenir bien fermée la boîte qui le contient, et d'y mettre quelques fragments de chaux vive.

**1704. Fusion de fils et feuilles métalliques.** — Quand on fait passer la décharge d'une batterie à travers un fil métallique assez fin pour que le fluide éprouve une grande résistance, ce fil s'échauffe, fond ou se volatilise, suivant les dimensions et la charge de la batterie. Franklin a fondu ainsi des feuilles minces d'or; plus tard, Beccaria et surtout Priestley, fondirent des fils.

**Excitateur universel.** — Pour fondre des fils métalliques, on se sert de

*l'excitateur universel*, imaginé par Henley. Deux tiges  $ac$ ,  $a'e'$  (fig. 1202), pouvant glisser dans des tubes  $a$ ,  $a'$  isolés sur des colonnes de verre, sont terminées par des pointes sur lesquelles on peut visser des boules creuses  $c$ ,  $c'$ , ou diverses autres pièces. Une tablette  $t$  sert à supporter les objets soumis à la décharge. La tige  $ca$ , étant en communication avec l'armature extérieure d'une batterie, on fait communiquer l'autre tige,  $c'a'$ , avec l'armature intérieure, au moyen de l'excitateur.

On peut encore attacher à la tige  $c'a'$ , une chaîne dont l'autre bout est fixé à une boule portée par un manche isolant, et avec laquelle on touche l'armature intérieure. La décharge passe alors entre les boules  $c$ ,  $c'$ .

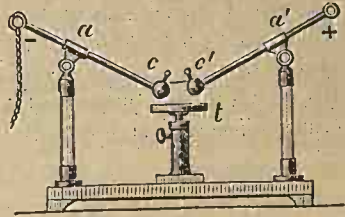


Fig. 1202.

Pour faire fondre un fil métallique, on le fixe entre les boules  $c$ ,  $c'$ ; au moment de l'explosion, on le voit sauter en globules, ce qui s'explique par la tendance des cylindres liquides à se diviser en sphérules (I, 262). Quand la décharge est très-forte, le fil est réduit en vapeur et disparaît. Plus ce fil est fin, plus il est facilement fondu : ce qui se conçoit bien, chaque point de la section recevant d'autant plus d'électricité qu'elle est plus petite. Il faut aussi que le fil soit suffisamment court; autrement il ralentit la décharge, et l'action est moins brusque et moins efficace.

Avec les grandes batteries du Musée Teyler et du Conservatoire des Arts-et-Métiers de Paris, on fond un fil de fer de 15 à 20 mètres. La fusion peut s'opérer dans l'eau, au moyen de l'appareil (fig. 1203); le fil,  $f$ , est tendu par le poids d'une boule, qui en touche une autre fixée au bas de l'instrument, et l'on met les deux



Fig. 1203.

extrémités de ce dernier en communication avec les armatures d'une batterie. Le fil doit être plus fin et moins long que lorsqu'on opère dans l'air, à cause de la perte de chaleur due au contact de l'eau, et du passage d'une partie de l'électricité à travers ce liquide.

Des feuilles d'or, d'argent, d'étain sont aussi fondues ou volatilisées. On découpe dans une feuille d'or une ellipse  $o$  (fig. 1204), et on la fait tenir entre deux conducteurs A, B, en la faisant traverser par l'électricité venant en  $m$  d'une machine électrique; on la voit aussitôt tourner rapidement sur elle-même, et si l'on fait alors passer la décharge d'une batterie entre les deux conducteurs, la feuille d'or est volatilisée sur place.



Fig. 1204.

**1705. Matières déposées.** — Les métaux oxydables aux plus hautes températures, le zinc, l'étain..., se transforment en oxydes, que l'on peut recueillir en parcelles microscopiques sur une feuille de papier, ou qui se dispersent dans l'air en légers flocons. Avec le *fer*, l'*acier*, le phénomène est très-brillant, les parcelles projetées en tous sens brûlant vivement au contact de l'air.

Cuthberston a fait beaucoup d'expériences sur la fusion des métaux par la décharge. Il opérait dans un tube analogue à celui de la figure 1203, et muni d'un robinet par lequel on pouvait introduire divers gaz. Dans l'azote et l'hydrogène, le métal ne donne qu'une poussière métallique; dans l'air, il peut s'oxyder. Des fils des métaux suivants ont donné, dans l'air, des poussières présentant les couleurs indiquées au dessous :

plomb,	étain,	fer,	platine,	or,
	zinc,	cuivre,	argent,	
gris,	presque blanc,	brun,	noir,	pourpre.

Un fil d'acier, traversé par des décharges de plus en plus fortes, devient successivement bleu, jaune, rouge à sa surface, puis entre en fusion.

**Presse électrique.** — Si l'on applique un ruban de satin blanc ou de papier

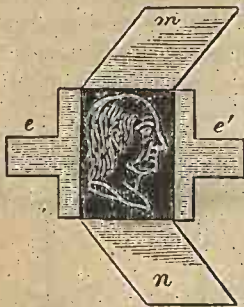


Fig. 1205.

sur un fil d'or fixé entre les tiges de l'excitateur universel, l'or est volatilisé par la décharge, et dépose sur le ruban une bande brune formée d'or très-divisé. Singer a déduit de là un moyen d'imprimer des dessins sur la soie. On découpe des jours dans une carte, de manière à former un dessin qu'on applique

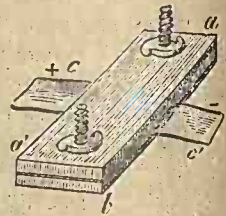


Fig. 1206.

sur un ruban de satin blanc (fig. 1205), par dessus, on étend une feuille d'or qui touche deux lames d'étain *e*, *e'*, et qui est assujettie au moyen de bandes de carton *m*, *n*, que l'on rabat par dessus. Le tout est comprimé entre les tablettes *aa'*, *b* de la presse électrique (fig. 1206), et l'on fait passer la décharge à travers la feuille d'or. Le métal est volatilisé, et se dépose sur la soie à travers les découpures de la carte, qui souvent figurent le profil de Franklin avec cette légende : « Portrait de Franklin gravé par la foudre. » M. Barat, en appliquant la feuille d'or, sur une lame de verre, rend l'expérience très-sûre et très-prompte.

**1706. Anneaux de Priestley.** — La décharge électrique peut produire une fusion superficielle sur des corps en masse. Quand on décharge la batterie du Musée Teyler, sur le bord d'une de ses jarres, le verre est fondu à la surface.



sur une étendue de plus de 1<sup>m</sup>. Priestley a remarqué des traces de fusion sur des boules métalliques frappées par plusieurs décharges d'une batterie de 40 pieds carrés <sup>1</sup>. Au milieu était une tache circulaire, et autour un ou plusieurs anneaux concentriques saillants séparés par des intervalles de 3<sup>mm</sup>. Sur des plaques de métal, ces anneaux étaient formés de points brillants et de petites cavités présentant des indices de fusion, et les intervalles qui les séparaient étaient recouverts d'une poussière noire non adhérente. Les métaux les plus fusibles donnent généralement le plus grand nombre d'anneaux avec la même décharge. Souvent aussi les anneaux présentent de vives couleurs.

**1707. Résistance différente des divers métaux.** — Priestley avait remarqué que, souvent, de deux fils métalliques égaux en diamètre, réunis l'un à la suite de l'autre par une pince à vis et traversés par la même décharge, un seul est fondu, et c'est le moins bon conducteur. Ainsi, le platine et le fer fondent plus facilement que l'or et l'argent. Van Marum a placé les métaux, d'après leur résistance au passage de l'électricité, dans l'ordre suivant : *plomb, étain, fer, or, argent, cuivre*, ce dernier résistant le moins.

Harris a trouvé que la fusion se fait plus difficilement dans le vide, une partie des électricités passant autour du fil : par exemple, un fil qui ne pouvait être fondu dans le vide par la décharge d'une batterie de 25 pieds carrés, le fut facilement dans l'air par une batterie de 5 pieds. Il résulte de ces faits que l'électricité agit d'autant mieux qu'elle éprouve plus de résistance dans son passage. L'existence d'une semblable résistance est d'ailleurs facile à prouver : si l'on décharge une jarre, en se servant d'un fil fin en guise d'excitateur, et en ayant soin de ne toucher l'armature que pendant un temps aussi court que possible, on trouve qu'il faut y revenir à 4 ou 5 fois pour obtenir la décharge complète. Enfin, si l'on fait passer la décharge à travers un fil sinueux, l'étincelle saute souvent d'une sinuosité à l'autre à travers l'air.

Si la résistance à la décharge conductive en augmente les effets calorifiques, il faut néanmoins qu'elle ne soit pas assez grande pour supprimer le passage de l'électricité ; alors il n'y aurait pas, évidemment, d'effet. C'est pour cela que les mauvais conducteurs placés tout près des fils que l'on fond par la décharge, ne sont pas altérés. Par exemple, la dorure d'une bande de bois, d'un cordon de soie, peut être volatilisée, sans que ces objets soient altérés.

**1708. LOIS DE L'ÉCHAUFFEMENT DES FILS.** — L'échauffement d'un fil métallique par la décharge, dépend de sa nature, de sa longueur, de son diamètre et de la charge de la batterie. Cuthberston a trouvé, ce qui a été confirmé depuis par des moyens plus précis, que l'échauffement était proportionnel au carré de la charge ; il déduisait l'effet calorifique, de la longueur maximum de fil qui pouvait être fondue. Harris, à la suite d'expériences faites avec un appareil thermométrique établi sur le même principe que celui de la figure 1207 qui en est un perfectionnement, avait cru que l'effet calorifique ne dépendait que de la

<sup>1</sup> *Hist. de l'électricité*, t. III, p. 328, et *Ann. de ch. et de ph.* (2<sup>e</sup> série), XXXIV, p. 292.

quantité absolue d'électricité de la batterie. Mais M. Riess a reconnu qu'il dépend aussi de l'état de condensation<sup>1</sup>. Voici d'abord l'instrument thermométrique dont il s'est servi.

**Thermomètre électrique.** — Un ballon à trois tubulures (fig. 1207), est suivi d'un tube capillaire de 45<sup>cm</sup> de longueur, se relevant verticalement à son extrémité où son diamètre est plus grand. La décharge est amenée, par les tiges *e*, *e'* et par les deux tubulures *a* et *b*, dans un fil de platine enroulé en hélice. La troisième tubulure, *o*, sert à introduire une colonne liquide dans le tube; on la ferme ensuite hermétiquement par un bouchon à vis. Le tube peut s'incliner plus ou moins, et la sensibilité de l'instrument est d'autant plus grande qu'il est moins incliné. Quand la décharge traverse le fil de platine, ce fil s'échauffe et fait dilater l'air. On néglige la perte de chaleur due au contact des parois, et l'on déduit l'échauffement du fil, du déplacement de niveau du liquide dans le tube capillaire.

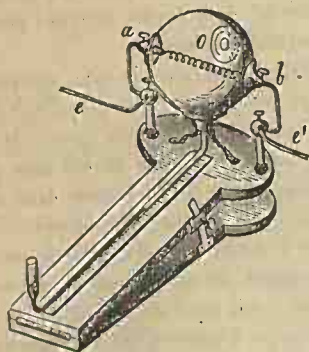


Fig. 1207.

qui s'accroît quand le nombre de jarres diminue; résultat dû à l'augmentation de rapidité de la décharge, qui n'est pas instantanée quand elle a lieu à travers un fil très-fin.

Au moyen d'une batterie dont les jarres avaient 16 décimètres carrés de surface garnie, et dont le nombre variait de 2 à 25, M. Riess a trouvé que : la quantité de chaleur dégagée par un fil est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité, et en raison inverse de la surface armée de la batterie.

Si l'on appelle *t* cet échauffement, *E* la quantité d'électricité, et *S* la surface garnie, on aura donc  $t = nE^2 : S$ ; *n* est une constante qui représente l'échauffement correspondant à  $E = 1$  et  $S = 1$ . Cette formule peut s'écrire  $t = nE (E : S)$ . On peut donc dire aussi que l'échauffement est proportionnel au produit de la quantité d'électricité par sa densité,  $E : S$  étant la densité électrique (1681), ou par la perte du potentiel de l'armature inté-

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. LXIX, p. 129.

ricure, ce potentiel intérieur étant proportionnel à la densité. — Si l'on admet, ce qui est la supposition la plus simple, que le temps  $\theta$  de la décharge est en raison inverse de la densité électrique  $\varepsilon$ , on aura  $\theta \propto n'E : \varepsilon$ . Or,  $\varepsilon \propto E : S$ , donc,  $\theta \propto n'S$ . Si l'on remplace  $S$  par  $\theta : n'$  dans la valeur de  $t$ , elle devient  $t \propto NE^2 : \theta$ ;  $N$  étant le résultat de la combinaison des constantes  $n$  et  $n'$ . *L'échauffement est donc en raison inverse de la durée de la décharge.*

**1710. Longueur et diamètre du fil.** — Si l'on fait varier la longueur du fil, en ayant soin d'introduire dans le circuit un excitateur universel portant un fil identique à celui du thermomètre et tel que la somme des longueurs des deux fils soit toujours la même, on trouve que la longueur particulière du fil du thermomètre n'a pas d'influence sur l'échauffement de ce fil. Ce qui pouvait se prévoir, chaque section étant traversée par la même quantité d'électricité pendant le même temps; et d'où il résulte que la quantité de chaleur développée est proportionnelle à la longueur. Mais si l'on augmentait la longueur du fil du thermomètre, sans rien changer au reste du circuit, l'échauffement diminuerait, la décharge étant ralentie par l'accroissement de la résistance; ce qui explique pourquoi un fil fond d'autant plus facilement qu'il est plus court.

Si l'on veut comparer deux fils de diamètre différent, on place un de ces fils dans le thermomètre, et l'autre dans l'excitateur, afin d'opérer avec un circuit toujours composé de la même manière. Après avoir observé l'échauffement du premier des fils, on les change de place, et l'on observe l'échauffement du second. M. Riess a trouvé ainsi que l'échauffement est en raison inverse de la 4<sup>e</sup> puissance du diamètre du fil. Ce qui revient à dire qu'il est proportionnel à la quantité d'électricité qui passe par une molécule, en supposant que toutes les molécules d'une section en reçoivent également. En effet, les quantités d'électricité  $E$ ,  $E'$  qui passent par une molécule de deux fils de diamètre  $d$ ,  $d'$ , sont en raison inverse des sections ou des carrés des diamètres; on a donc  $E : E' \propto d'^2 : d^2$ . Mais on a aussi, en appelant  $t$  et  $t'$  les échauffements,  $t : t' \propto E^2 : E'^2$ , d'après la loi relative aux charges. En combinant ces deux proportions, il vient  $t : t' \propto d'^4 : d^4$ .

En réunissant les lois qui précèdent, on peut représenter l'échauffement  $t$  d'un fil, par la formule  $t \propto kE^2 : d^4S$ , dans laquelle la constante  $k$  dépend de la substance du fil. — Dans toutes ces expériences, on ne tient pas compte des conducteurs du circuit autres que les fils que l'on compare, leur section étant assez grande pour qu'ils ne produisent pas de résistance sensible.

**1711. Effet du ralentissement de la décharge.** — L'échauffement du fil invariable du thermomètre est d'autant plus faible que le fil de l'excitateur qui fait partie du circuit est plus fin et plus long. L'échauffement paraît être en raison inverse de la longueur et proportionnel au carré du diamètre de ce fil. Ce résultat est dû à la résistance qu'il oppose au passage de l'électricité. En effet, des obstacles divers, comme des tubes pleins de liquide, des morceaux de bois mouillés, des interruptions dans le fil, susceptibles d'être franchies par l'électricité, diminuent l'échauffement, en ralentissant la décharge, à laquelle ils

peuvent donner une durée appréciable. M. Riess a trouvé que le retard est proportionnel à la résistance du conducteur intercalé, et que l'échauffement est réciproquement proportionnel à la durée de la décharge. En désignant par  $\lambda$  et  $\rho$  la longueur et le diamètre du fil de l'excitateur, par  $b$  une constante, et supposant qu'il n'y a pas d'autre résistance sensible dans le circuit, l'échauffement est représenté par la formule générale  $t = K \frac{E^2}{d^2 S} : \left( 1 + \frac{b\lambda}{\rho^2} \right)$ .

**1712. Comparaison des pouvoirs conducteurs des métaux. —**

M. Riess a comparé les résistances, et par conséquent les conductibilités de divers métaux, en les substituant les uns aux autres dans l'excitateur, et tenant compte de leur longueur et de leur diamètre, d'après les lois précédentes. Il a trouvé ainsi que, en représentant par 100 la longueur d'un fil de cuivre, des fils des autres métaux devraient avoir les longueurs qui suivent, pour produire la même résistance sous le même diamètre :

Argent,	cuivre,	or,	cadmium,	laiton,	palladium,	fer,	platine,	étain,	nickel,	plomb.
148,7	100	88,9	38,35	27,7	18,18	17,6	15,52	14,7	13,15	10,31

De plus, avec ces longueurs relatives, ces fils dégageraient la même quantité de chaleur, si on les supposait placés les uns au bout des autres, et traversés par la même décharge. Leur élévation de température serait donc en raison inverse de leur chaleur spécifique et de leur densité.

Nous expliquerons plus tard comment, au moyen des décharges continues de la pile galvanique, on peut comparer par d'autres méthodes, les conductibilités des divers métaux, et nous verrons qu'on arrive à des lois analogues à celles qui précèdent. M. Clausius est parvenu à expliquer les lois trouvées par M. Riess, au moyen de la théorie mécanique de la chaleur. Il remarque qu'une décharge est un mouvement de fluides dont les particules agissent les unes sur les autres, et, appliquant les principes de la mécanique analytique, il trouve que la variation des forces vives n'est pas nulle. Cependant l'état initial et l'état final sont des états d'équilibre des fluides ; il faut donc que la force vive développée se retrouve quelque part ; elle est représentée par la chaleur dégagée, et, en cherchant la valeur, on retrouve les lois de M. Riess <sup>1</sup>.

**1713. Effets d'induction. —** M. Riess a encore reconnu qu'un fil voisin de celui qui laisse passer la décharge, peut la ralentir quand il est moins bon conducteur que lui. Pour que l'effet soit sensible, il faut que le fil de décharge soit roulé en spirale, ainsi que l'autre, de manière que les longueurs en présence soient très-grandes. Il faut, de plus, que les deux bouts du fil indépendant de la batterie, se joignent de manière à former un circuit fermé. Il y a évidemment un effet d'induction dans le circuit, dont l'électricité réagit sur celle qui passe dans le fil de décharge ; aussi, le ralentissement est-il d'autant plus prononcé que le fil induit est moins bon conducteur <sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Pogg. ann., t. LXXXVI, p. 337, et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. XXXVIII, p. 200.

<sup>2</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. X, p. 417.

M. Knochenhauer a fait aussi un long travail sur les effets d'induction dans des fils voisins, et sur les quantités de chaleur développées dans plusieurs fils servant simultanément à décharger une même batterie<sup>1</sup>.

**1714. Thermomètre électrique inscripteur.** — Les lois qui précèdent peuvent être vérifiées au moyen de l'appareil (*fig. 1208*), imaginé par M. Mascart<sup>2</sup>. On fait passer la décharge par les boutons *b*, *b'* ou par les crochets *c*, *c'*, dans un fil de platine tourné en hélice et isolé dans un gros tube de verre. Les changements de pression intérieure, produits par la chaleur, sont communiqués par le tube flexible *t*, à l'air contenu dans un petit tambour en caoutchouc, ayant une base mobile qui soulève un long levier, dont la disposition a été imaginée par M. Marey pour ses recherches de physiologie. L'extrémité de ce levier inscrit, sur un cylindre tournant garni de noir de fumée, les variations rapides de pression produites pendant le passage de la décharge.

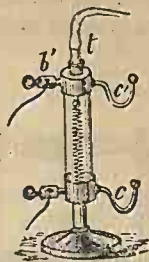


Fig. 1208.

#### V. Effets mécaniques de la décharge.

**1715.** Rappelons d'abord l'ébranlement subit produit dans les fluides que traverse l'étincelle, et qui nous a servi à expliquer le bruit qui l'accompagne (1601). Cet ébranlement peut être assez énergique, dans les liquides, pour briser les vases, et même dans les gaz, quand ces vases sont étroits.

Si l'on place une lame isolante ou peu conductrice, entre les pointes de l'excitateur universel, elle est brisée ou percée par la décharge d'une batterie. Nous avons vu que ce résultat peut se produire spontanément dans la lame isolante d'un condensateur, quand on le charge trop.

L'épaisseur de la plaque dont on peut vaincre la résistance dépend principalement de la différence de potentiel des électrodes, car c'est cette différence qui fait que la résistance de la plaque est vaincue. La quantité d'électricité n'a d'influence que sur la grosseur du tron formé. C'est ainsi qu'une seule bouteille de Leyde bien chargée perce une lame que ne peut traverser la décharge d'une batterie à grande surface contenant beaucoup plus d'électricité, mais ne présentant qu'une faible tension de fluides libres. La simple étincelle d'une forte machine électrique peut remplacer avec avantage la décharge d'une grande batterie. L'étincelle de la machine du musée Teyler perce un livre de 192 feuillets. Les machines de Holtz, de Bertch donnent aussi des résultats intenses. Celle de Holtz perce une plaque de verre de plus de 15<sup>mm</sup>, quand elle est munie de ses deux bouteilles B, B (*fig. 1130*), assemblées en cascade, c'est-à-dire de

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 77.

<sup>2</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. II, p. 313.

manière que les armatures extérieures communiquent, pendant que les deux crochets sont électrisés, l'un *positivement* l'autre *négativement*. La différence algébrique des potentiels est alors, évidemment, double de ce qu'elle serait si, avec la même condensation, les deux armatures intérieures communiquaient avec le même peigne, et les deux armatures extérieures avec l'autre peigne.

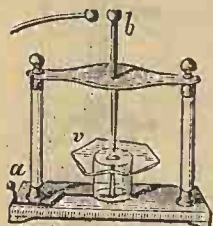


Fig. 1209.

**Perce-verre.** — Pour percer une lame de verre, on emploie souvent le *perce-verre* (fig. 1209) : la lame *v* est placée sur un cylindre de verre, entre deux points isolés, et l'on fait passer la décharge entre les points, par les boutons *a* et *b*. Le trou est rond, à peine étoilé, à contours mats, et quelquefois rempli de verre en poudre.

Pour diriger l'électricité sur un même point de la lame, on a soin de mettre une petite goutte d'huile au-dessous de la pointe supérieure. Malgré cette précaution, une grande partie de l'électricité se dissémine et contourne la lame, de manière qu'il faut une puissante batterie pour percer une lame de  $\frac{1}{2}$ mm seulement d'épaisseur. Pour réussir plus facilement, on enveloppe les électrodes de manchons de verre dans lesquels on verse de la gomme laque en fusion qui adhère à la lame. MM. Terquem et Trannin ont imaginé un appareil qui peut servir aussi souvent qu'on veut. L'électrode supérieure, terminée en pointe aiguë, s'enfonce dans une glace *v'* (fig. 1210), et est entourée de deux tubes de verre *c, c'* remplis d'arcanson (mélange de cire et de résine) qui les fait adhérer à la glace. L'électrode inférieure, dont la tige, *n*, est coudée, est isolée de la même manière, et terminée par une pointe qui s'enfonce dans la glace *v*. On presse la lame à percer entre les deux glaces *v, v'* de manière que les deux pointes soient en face l'une de l'autre, et en ayant soin d'interposer un peu d'huile d'olive pour empêcher l'électricité de glisser entre les surfaces. — L'étincelle d'une machine de Holtz, peut ainsi percer une plaque de verre de 15mm d'épaisseur, et une bobine de Ruhmkorff, une plaque de 30mm et plus. Le trou est net, transparent et souvent sinueux.

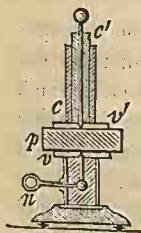


Fig. 1210.



Fig. 1211.

**1716. Perce-carte.** — Cet instrument (fig. 1211) est disposé de manière à mettre en évidence deux résultats curieux. La carte est placée très-obliquement entre les points isolés *a* et *c* qui servent d'électrodes. Quand elle a été percée par la décharge, on remarque deux choses : 1° Le bord du trou est également relevé en bourrelet sur les deux faces. Ce résultat s'explique ordinairement par la décomposition par influence qui se fait dans la carte, de manière qu'il y aurait

en réalité deux étincelles partant de l'une et de l'autre face pour aboutir à la pointe qui est du même côté. Mais on peut aussi s'en rendre compte dans la théorie d'un seul fluide, où il n'y a à s'arrêter qu'à ce qui se passe du côté de la pointe positive. Or le fluide en plus qui s'en échappe pour se précipiter sur la carte et la traverser, communique aux molécules directement atteintes une force répulsive qui tend à les écarter et à les faire ressortir au dehors, d'où résulte le bourrelet observé. — 2° Le trou est beaucoup plus rapproché de la pointe négative. Si même on fait d'avance un trou à égale distance des pointes, la décharge ne le traverse pas. La présence de l'air intervient dans ce phénomène, car Tremery, qui l'a remarqué le premier, a vu, dans l'air raréfié, le trou se rapprocher du milieu à mesure que la pression était plus faible. — Si l'on met la carte entre deux pointes horizontales plus élevées l'une que l'autre, on voit, dans l'obscurité, un trait lumineux qui rase la carte et va de la pointe positive à la pointe négative, en face de laquelle se forme le trou. Pour expliquer ces faits, on a coutume de dire que le fluide positif se transportant plus facilement à travers l'air que le fluide négatif (1685), le point de la carte où se joignent les fluides doit être plus rapproché de la pointe négative.

**1717. Corps brisés, altérés.** — Quand on fait passer la décharge à travers un prisme de bois, dans le sens des fibres, en enfonçant dans ses bases les pointes de l'excitateur universel, ce prisme éclate en morceaux, et peut être même divisé en minces lanières quand la batterie dont on se sert présente une grande surface armée et est fortement chargée. Van Marum, au moyen d'une batterie de 15 mètres carrés, a fendu en deux un cylindre de bois de 81<sup>mm</sup> de diamètre et de hauteur, ce qui exigeait un développement de force équivalent à plus de 3000 kilogrammes.

Si l'on fait passer la décharge à travers une feuille d'or placée entre deux lames de verre chargées de poids, l'or est volatilisé, et les plaques souvent brisées. Un fil de fer très-fin, tendu dans un tube de verre étroit, le brise aussi au moment de la décharge, si ce n'est quand ce fil est enveloppé de papier. Quand il est entouré d'eau ou d'huile remplissant le tube, le choc est extrêmement violent, et l'on peut briser ainsi des canons de pistolet. — M. M. Guillemin a reconnu que la rupture peut avoir lieu dans un vase ouvert, à cause de l'inertie du liquide. Par exemple, un verre rempli d'eau est brisé par la fusion d'un fil fin plongé dans le liquide, qui est projeté à quelques centimètres de hauteur.

**Figures roriques.** — Si l'on pose les deux boules *c*, *c'* de l'excitateur (*fig.* 1202) sur une bande bien desséchée de papier ou de verre mince, et étendue sur la tablette *t*, cette bande est déchirée ou brisée par une très-forte décharge. Quand le verre n'est pas brisé, il présente une altération superficielle qui se voit en le portant au jour, ou au moins en troublant sa surface par insufflation, et forme ce qu'on nomme des *figures roriques*. Ce phénomène, étudié par M. Riess et par Peyré, se produit facilement au moyen d'étincelles rasant la surface du verre (*fig.* 1182). M. Riess a reconnu que, si la décharge est violente, le verre est comme dépoli avec du sable; de plus, il est devenu conducteur sur

les traces visibles et sur les parties voisines qui se distinguent par le souffle. M. Wartmann a vu la décharge produire sur le mica des effets encore plus prononcés, d'une grande régularité, et accompagnés de couleurs. Enfin, M. Riess a pu distinguer des figures roriques sur une lame de mica présentée simplement à l'aigrette sortant d'une pointe.

**1718. Raccourcissement des fils.** — Nairne ayant déchargé une batterie de 3 mètres carrés, à travers un fil de fer non tendu, de 270<sup>mm</sup> de longueur et de 3<sup>mm</sup> de diamètre, le trouva raccourci de  $\frac{1}{10}$ , après 15 décharges; son diamètre avait un peu augmenté. Une 16<sup>e</sup> décharge le fit fondre. Un fil de cuivre donna des résultats semblables. M. E. Becquerel, qui a fait de nombreuses expériences sur ce sujet<sup>1</sup>, a reconnu, sur les fils de platine, que le raccourcissement était en raison inverse du cube du diamètre. A la 3<sup>e</sup> ou 4<sup>e</sup> décharge, le fil, faiblement tendu, prenait une forme ondulée, et les ondulations allaient en augmentant sans changer de place, quand on multipliait les décharges.

**1719. Phénomènes de transport.** — Peyré a reconnu qu'une colonne liquide contenue dans un tube capillaire traversé par la décharge, se porte à l'extrémité négative, et revient ensuite lentement en arrière.

M. Quincke ayant mis une colonne d'eau, d'alcool, ou d'éther dans un tube capillaire recourbé en U, a vu les niveaux se déplacer de manière à indiquer un mouvement dans le sens de l'électricité *positive*, quand il faisait passer la décharge d'une batterie à travers la colonne liquide au moyen de fils de platine<sup>2</sup>. Le déplacement, rendu plus apparent en inclinant le tube, est sensiblement en raison inverse de sa section et proportionnel à la longueur de la colonne et à la charge de la batterie, quel que soit le nombre de jarres entre lesquelles cette charge est distribuée. Le déplacement est plus marqué quand on se sert de l'électricité continue d'une machine électrique, et il est d'autant plus faible que le liquide est rendu plus conducteur, par le mélange de sels ou d'acides.

Avec les liquides très-peu conducteurs, les résultats sont moins nets. Ainsi, l'essence de térébenthine, qui est entraînée dans le sens du fluide positif, dans un tube verni en dedans avec du soufre, ou dans un vase divisé en deux compartiments par une cloison formée de fleur de soufre comprimée, chemine en sens contraire dans un tube non verni, ou verni avec de la gomme laque, ou dans un vase divisé par une cloison d'argile. Le *sulfure de carbone* marche, dans un tube, du *plus* au *moins*, si ce n'est pour certaines variétés de verre. L'huile de naphte ne paraît pas éprouver de déplacement.

Ces effets opposés paraissent dus aux actions des électrodes sur les molécules électrisées du liquide, pendant que le flux électrique les sollicite dans le sens du fluide positif. M. Jürgensen a observé dans des tubes droits et entièrement remplis d'eau, des mouvements inverses près de la surface intérieure et près de l'axe, rendus visibles au moyen de parcelles en suspension. Ces mouvements

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. VIII, p. 496.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXII, p. 381, et t. LXIII, 479.



montrent combien les effets peuvent devenir incertains. Des expériences de M. Poggendorff, qui a vu du mercure étendu dans un tube de Geissler marcher du négatif au positif, mettent bien en évidence l'influence de l'électrisation du liquide. En effet, nous savons avec quelle facilité le mercure s'électrise négativement dans le vide, et la colonne est alors attirée vers l'électrode positive. Dans un liquide, le mercure chemine dans le sens de l'électricité positive, comme l'a montré M. L. Daniel, sur une colonne de mercure, qu'il a pu même faire monter dans un tube incliné sous l'influence d'un flux électrique intense<sup>1</sup>.

Citons encore les expériences suivantes de M. Armstrong. Ayant rempli presque entièrement d'eau distillée deux verres A et B (fig. 1212), dont les bords étaient à 12<sup>m</sup> environ l'un de l'autre, il les réunit au moyen d'un fil de soie humide *c*, qui plongeait dans l'eau. Ayant mis ensuite le vase A en communication avec la chaudière négative d'une puissante machine hydro-électrique (1610), et l'autre, B, avec le sol, une légère colonne d'eau, à laquelle le fil servait d'axe, se forma en *c*, et quand le fil était fixé au fond du vase A, l'eau montait dans ce vase et baissait dans l'autre. On reconnaissait aussi, en projetant un peu de poussière sur la colonne *c*, qu'il y avait un courant d'eau superficiel allant de B en A, dans le sens du fluide positif, et un autre intérieur de sens contraire. Si le fil n'était pas fixé, il était entraîné par ce dernier courant et passait tout entier dans le vase B. La colonne *c* pouvait être alors maintenue pendant plusieurs minutes sans être soutenue par

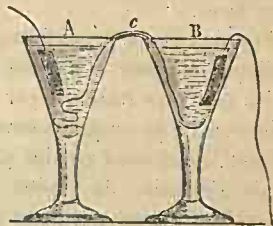


Fig. 1212.

le fil, et il n'y avait plus aucun changement de niveau dans les vases, ce qui montre que les courants d'eau intérieur et extérieur étaient dès lors égaux. Une fois la colonne *c* rompue, l'électricité passait par étincelles d'un vase à l'autre.

En résumé, on peut dire qu'il résulte de l'ensemble des faits qui précèdent et de beaucoup d'autres que nous aurons à citer plus tard, que le transport de la matière pondérable par l'électricité tend à se faire dans le sens du positif au négatif; seulement, cette tendance peut être combattue par diverses causes. Ce principe général vient à l'appui de l'hypothèse d'une seule électricité qui tend à s'élaner des corps électrisés *en plus*, en entraînant les molécules peu conductrices qu'elle rencontre et qui ne peuvent s'en séparer assez promptement.

**1720. Arrachement de particules aux électrodes.** — Quand une forte décharge passe entre deux boules métalliques, il y a des parcelles arrachées et transportées d'une boule à l'autre. Ce phénomène, observé d'abord par Muschenbroeck et Brugnatelli, a été étudié en détail par Fusinieri<sup>2</sup>, qui vérifia d'abord que la décharge d'une bouteille de Leyde, reçue sur une plaque d'argent, y dépose

<sup>1</sup> Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, t. LXIV, p. 599.

<sup>2</sup> Archives de l'électricité, par de La Rive, t. III, p. 597.

une tache jaune provenant de son bouton de cuivre. Il fit ensuite passer la décharge d'une batterie munie d'un bouton d'argent, à travers un disque de cuivre de 9<sup>cm</sup> de diamètre et de  $\frac{2}{3}$ <sup>mm</sup> d'épaisseur, tenu par un manche de verre et appliqué contre la boule de cuivre de l'excitateur. Les deux faces du disque présentèrent des cavités dans lesquelles on distinguait des parcelles d'argent, et il y en avait aussi sur la boule de l'excitateur. De plus, la boule d'argent présentait des traces de fusion et était tachée par de l'oxyde de cuivre. — Dans une autre expérience, une boule d'or fut placée sur la batterie, et un disque d'argent isolé fut appliqué sur cette boule. La décharge, partant du disque d'argent, fut reçue par la boule, aussi d'argent, de l'excitateur, et la face du disque opposée à la boule d'or présenta une belle tache jaune de plusieurs centimètres de diamètre. La boule d'argent présenta aussi des traces d'or, et la boule d'or, des traces d'argent. Ces traces d'or disparurent peu à peu, comme si l'or se volatilisait. — Le disque d'argent ayant été placé à égale distance des deux boules, présenta, après la décharge, des taches d'or égales sur ses deux faces.

Fusinieri explique ces faits par le transport de l'argent ou de l'or à travers le disque interposé; il attribue même à l'entraînement des particules, la perforation des corps traversés par la décharge. Mais ne pourrait-on pas penser que l'électricité a pu en partie envelopper le disque et franchir ses bords, en transportant, à travers l'air, les parcelles d'or ou d'argent là où on les trouve? Il serait nécessaire de répéter ces expériences avec des disques de grandes dimensions et entourés d'une substance isolante.

Les parcelles emportées par l'étincelle expliquent, suivant Hales, les différentes couleurs qu'elle présente d'après la nature des corps d'où on la tire (1688).

La force qui détache les parcelles métalliques n'est autre, probablement, que la répulsion qui s'exerce entre elles, jointe à l'état de vapeur dans lequel les met la quantité énorme d'électricité qui les saisit. Priestley a fait une expérience qui vient à l'appui de cette explication. Ayant fait passer une forte décharge à travers une chaîne de fer étendue sur une lame de verre, il vit chaque chaînon se dessiner sur le verre, au moyen d'une poudre noire qui s'en était détachée, et la chaîne avait un peu diminué de poids. Une partie de cette poudre faisait corps avec le verre. Si l'on frotte une médaille avec de la plombagine qui s'introduit dans les creux, et qu'on la fasse traverser par une forte étincelle après l'avoir posée sur une feuille de papier, la plombagine se détache des creux, et les traits de la médaille sont imprimés sur le papier. — Karstén obtient l'empreinte d'une médaille non préparée en la posant sur une lame de verre, et faisant passer des étincelles entre elle et une plaque de métal placée du côté opposé. L'image, que l'on rend apparente en soufflant sur le verre, provient de traces d'oxydes, ou d'impuretés qui sont sur la médaille. On peut obtenir aussi une empreinte sur une lame de métal, en la séparant de la médaille par une mince couche d'air.

**1721. Déplacements par choc latéral.** — Priestley, en cherchant à imiter certains effets de la foudre, a reconnu que des corps situés près du lieu

où éclate une forte décharge peuvent être vivement déplacés. Ainsi, des morceaux de liège, de bois, sont chassés à plusieurs centimètres de distance. Le résultat a lieu, mais avec moins de force, quand la décharge traverse un fil fin, même quand il n'est qu'échauffé. Priestley explique ces phénomènes par la commotion de l'air; de sorte que la cause serait la même que celle qui chasse la balle du mortier électrique (1601). Mais, comme il l'a constaté lui-même, de la poudre renfermée dans une fiole s'agite au moment de l'explosion; et dans le vide, l'effet latéral est peu affaibli, et ne paraît pas augmenté dans l'air comprimé. Pouillet attribue ces déplacements à l'induction qui se fait avec une telle instantanéité et avec une telle énergie, que les corps, dont la conductibilité est imparfaite, sont entraînés par les fluides qui ne peuvent se déplacer dans leur intérieur avec une rapidité suffisante.

Nous remarquerons, en terminant, que tous ces effets mécaniques sont affaiblis quand le circuit présente des résistances. Par exemple, s'il contient un fil fin, qui s'échauffe, une partie du travail de la décharge est transformée en chaleur.

#### VI. Effets chimiques et magnétiques de la décharge.

**1722.** Si l'on fait passer une série d'étincelles dans une éprouvette placée sur le mercure et remplie des gaz suivants : gaz oléfiant, acide sulfhydrique, acide chlorhydrique, protoxyde d'azote, gaz ammoniac, hydrogène phosphoré, ils sont décomposés. L'acide carbonique se sépare en oxyde de carbone et oxygène; le gaz nitreux se transforme en acide azotique et azote. Ces décompositions, connues des anciens physiciens, ont été particulièrement étudiées par Van Marum. La décharge peut aussi décomposer les corps isolants qu'elle traverse; par exemple, l'éther, les huiles grasses, les huiles essentielles, comme l'a constaté Morgan, un des premiers. Les huiles donnent du gaz oléfiant, de l'hydrogène et de l'oxygène.

Dans la fusion d'un fil de laiton, le zinc et le cuivre sont séparés, et on peut les trouver à l'état d'oxyde sur une lame de verre. Une série d'étincelles à travers de l'oxyde d'étain renfermé dans un tube de verre, fait apparaître l'étain sur la surface du tube. Le vermillon dépose, dans les mêmes circonstances, le soufre et le mercure qui le composent.

A. Pinaud ayant appliqué sur un carreau étincelant une feuille de papier enduite de bromure ou d'iodure d'argent, sur laquelle il posa une lame de verre, et, ayant fait passer à travers le carreau la décharge d'une bouteille de Leyde, vit des taches brunes sur le papier, aux points correspondants aux étincelles, et obtint ainsi des dessins, qu'il nomma *électrographies*.

L'étincelle peut aussi produire des combinaisons : Priestley a vu une série d'étincelles lancées à travers l'air, lui communiquer la propriété de rongir la teinture de tournesol. Cavendish a reconnu qu'il se forme de l'acide azotique, par la combinaison d'un peu d'oxygène et d'azote. L'inflammation des mélanges

gazeux explosifs n'est pas à citer ici, parce que l'étincelle agit, dans ce cas, comme le ferait une flamme.

**1723. Décomposition avec transport des éléments.** — Dans les décompositions que nous venons de citer, les éléments disjoints restent mêlés. Dans plusieurs essais, Wollaston et Bonijol avaient obtenu leur séparation, mais pas assez nettement. Depuis, Faraday a réussi complètement. 1° ayant posé sur une lame de verre une goutte d'une dissolution de sulfate de cuivre dans laquelle il engagea les extrémités de fils de platine communiquant avec les conducteurs d'une machine de Nairne, il trouva, après 20 tours de la machine, un dépôt de cuivre sur le fil négatif. De l'iodeure de potassium mêlé d'amidon donna en même temps, autour du fil positif, la couleur bleue qui atteste la présence de l'iode<sup>1</sup>.

2° On fait jaillir une série d'étincelles d'une machine *positive*, sur l'extrémité d'une bande de papier humide imbibée de sulfate neutre de soude et colorée avec du sirop de violettes; la bande rougit à cette extrémité, et devient *verte* à l'autre qui communique avec le sol; l'acide et la base du sel se sont donc transportés séparément aux extrémités du papier.

Si l'on applique, sur une lame de verre V (fig. 1213), une série de losanges



Fig. 1213.

du même papier, et qu'on fasse arriver de l'électricité *positive* par une pointe isolée *p*, pendant que la pointe *n* communique avec le sol, on voit les losanges rougir du côté de la pointe *p*, et verdir à l'extrémité opposée. L'électricité a dû traverser l'espace qui sépare les losanges;

mais il faut que le passage ait lieu sans étincelles. — Si le papier n'est imbibé que de sirop de violettes, les couleurs peuvent encore apparaître, à cause des sels que contient le papier.

**1724. Décomposition de l'eau.** — De fortes décharges à travers l'eau en décomposent quelques parcelles. Wollaston a obtenu des résultats au moyen de faibles décharges, en faisant arriver l'électricité en un seul point : il engagea dans un tube de verre, un fil d'or très-effilé, fonda le verre autour de la pointe, puis usa l'extrémité du tube jusqu'à ce qu'il vit apparaître le bout du fil. Des étincelles furent lancées sur l'extrémité extérieure du fil plongeant dans de l'eau communiquant avec le sol. Aussitôt un petit courant de bulles gazeuses s'échappa de la pointe d'or. — Wollaston a encore procédé en dorant l'intérieur du tube au moyen d'une dissolution de chlorure d'or chauffée, et effilant ensuite le tube à la lampe, de manière à obtenir une pointe fine dorée en dedans.

<sup>1</sup> Un des fils peut être mis en communication avec le sol; mais il faut que cette communication soit bien intime. Faraday faisait communiquer ce fil avec le système des tuyaux de conduite du gaz ou de l'eau, qu'il appelle, à ce point de vue, *appareil de décharge*.

Wollaston a décomposé, par le même moyen, du sulfate de cuivre en dissolution dans l'eau.

Dans ces expériences, les éléments de l'eau sont mélangés. M. Armstrong les a obtenus séparés, au moyen de l'appareil (fig. 1214). L'eau remplit le vase V, et les tubes *t*, *t'*, dont la partie supérieure est traversée par un fil de platine scellé dans le verre. Un des fils communique avec la chaudière de la machine hydro-électrique de l'Institut polytechnique de Londres, et l'autre avec le sol. On voit l'oxygène se dégager seul autour du fil positif *t*, et l'hydrogène également seul autour du fil *t'*. Nous verrons plus tard comment on peut expliquer la séparation des deux gaz.

Quand on se sert d'une machine électrique ordinaire, les gaz séparés sont en si faible quantité qu'ils sont entièrement dissous par l'eau. M. Andrews a pu cependant les recueillir, en employant des tubes capillaires ne contenant que très-peu d'eau qui était bientôt saturée de gaz. Une machine à plateau lui a donné  $\frac{1}{15}$  de millimètre cube d'oxygène, après 40 tours faits en 1 minute. Il a pu aussi opérer avec l'électricité de l'atmosphère, recueillie au moyen d'un *cerf-volant électrique*, par un procédé que nous décrirons plus loin (1730), et obtenir en une heure  $\frac{1}{18}$  de mil limètre cube d'oxygène<sup>1</sup>.

**1725. Ozonc.** — Quand on fait passer une série d'étincelles à travers de l'oxygène pur, ce gaz exhale une odeur particulière; et prend des propriétés chimiques nouvelles. Cet oxygène, ainsi modifié par l'électricité, a reçu de M. Schœbein le nom d'*ozonc*. Nous reviendrons plus tard sur les propriétés de ce singulier produit.

**1726. Actions chimiques des effluves électriques.** — Morren a reconnu, lors de ses recherches sur la lumière électrique (1696), que les gaz composés introduits dans la chambre barométrique sont décomposés par le passage de l'effluve électrique, en présence de traces de vapeurs de mercure, et que l'oxygène est rapidement absorbé par ces mêmes vapeurs.

M. Berthelot a obtenu depuis, des actions chimiques au moyen de l'effluve électrique agissant à travers une lame de verre<sup>2</sup>; un gaz est introduit avec d'autres substances dans une mince éprouvette évasée à son ouverture, *ac* (fig. 1215), et posée sur le mercure. L'électricité positive d'une puissante bobine de Ruhmkorff est amenée, par



Fig. 1214.

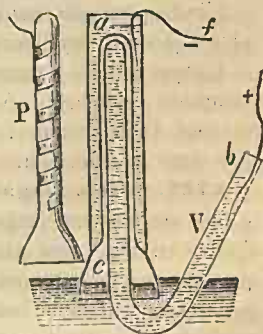


Fig. 1215.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 405, et t. L, p. 424.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 5<sup>e</sup> série, t. X, p. de 51 à 82.

une colonne d'acide sulfurique étendu d'eau, *b*, contenue dans un tube en V, introduit par son extrémité fermée, dans l'éprouvette qu'il remplit presque entièrement. L'électricité négative arrive par le fil de platine *f*, dans une couche du même acide enveloppant l'éprouvette, et renfermée dans un manchon de verre soudé au-dessus de la partie évasée; ou bien elle arrive par un mince ruban de platine qui entoure l'éprouvette, comme on le voit en P. Dans l'obscurité, on aperçoit une lueur phosphorescente dans l'espace annulaire qu'occupe le gaz. La matière organique est placée sur le mercure, et le gaz absorbé peut être renouvelé par un tube abducteur. — Parmi les résultats obtenus par M. Berthelot, nous citerons les suivants :

L'ammoniaque est décomposée en partie par l'effluve, et réciproquement quelques centièmes d'un mélange d'azote et d'hydrogène peuvent être combinés, tandis que l'étincelle n'en peut combiner que quelques cent-millièmes reconnaissables au moyen d'une bulle d'acide chlorhydrique. Le protoxyde d'azote se sépare en azote et oxygène dont une portion est absorbée par le mercure. Le bioxyde d'azote, l'hydrogène sulfuré, l'hydrogène phosphoré se décomposent en donnant lieu à divers composés nouveaux. L'oxyde de carbone donne le sous-oxyde brun découvert par M. Brodie, etc.

L'azote est absorbé par les composés organiques : la benzine, l'essence de térébenthine, le gaz des marais donnent des composés résineux, qui dégagent de l'ammoniaque par la chaleur. Le papier blanc à filtre (cellulose) légèrement humecté, absorbe, en 8 à 10 heures, une quantité notable d'azote, et dégage beaucoup d'ammoniaque quand ensuite on le chauffe au rouge sombre avec de la chaux sodée.

L'hydrogène est aussi absorbé par les composés organiques, et généralement plus rapidement que l'azote.

L'oxygène mêlé à l'azote n'empêche pas l'absorption de ce dernier gaz par les composés organiques. Aussi, M. Berthelot a-t-il reconnu, comme nous le verrons, l'influence de l'électricité atmosphérique sur l'absorption de l'azote de l'air dans la végétation.

**1727. Effets magnétiques.** — L'électricité agit d'une manière remarquable sur les corps magnétiques; mais ce n'est que plus tard que nous pourrons étudier en détail cette action. Nous citerons seulement quelques-uns des faits les plus anciennement connus. Franklin a pu aimanter de petites aiguilles d'acier, par la décharge d'une bouteille de Leyde, et intervertir les pôles d'une aiguille aimantée. Beccaria, Cavallo, Wilson, obtinrent des résultats semblables, soit en faisant passer la décharge à travers l'aiguille, soit en la plaçant très-près de l'étincelle. Enfin, Kinnersley ayant placé une aiguille aimantée suspendue sur un pivot, très-près d'un fil de fer, la vit pirouetter rapidement au moment où il fit passer la décharge à travers ce fil.

## CHAPITRE III

## MÉTÉORES ÉLECTRIQUES

Avançons, contemplons comment un art mortel  
Ravit aux dieux la foudre, et ses flèches au ciel.

(DEUILLE, *les Trois Règnes*, chant 1.)

## § 1. — DU TONNERRE

## I. Origine du tonnerre.

**1728.** Depuis que l'on connaît les propriétés de l'électricité on peut se rendre compte de divers phénomènes atmosphériques dont la cause était restée longtemps ignorée. Un des plus remarquables est le phénomène du *tonnerre*, qui accompagne et caractérise les orages. Un orage consiste en une pluie, ordinairement à grosses gouttes, tombant de nuages épais, au milieu desquels s'élancent de longs sillons de lumière, ou *éclairs*, suivis d'un bruit retentissant nommé *roulement du tonnerre*. Quand l'éclair aboutit à un point du sol, on dit que ce point est frappé par la *foudre*, qui n'est autre chose que l'éclair aboutissant à des objets terrestres. On dit alors vulgairement que *le tonnerre tombe*.

**1729. Cause du tonnerre.** — Les anciens philosophes regardaient le tonnerre comme un attribut de la divinité; quelques-uns en faisaient un *esprit*, et n'en cherchaient pas davantage. Suivant d'autres, le tonnerre était le résultat de la rencontre de certaines *influences* que se renvoyaient mutuellement les astres; ou bien le produit d'émanations s'élevant de la terre; idée ridiculisée par Aristophane dans sa comédie des *Nuées*. Sénèque explique ce météore par le choc des nuages poussés les uns contre les autres; opinion développée par Lucrèce, dans le dernier chant de son poëme de *rerum naturâ*.

Les physiiciens ont d'abord attribué le tonnerre à l'inflammation de certaines exhalaisons venues de la terre; les chimistes, à la réaction d'un mélange de nitre, soufre, fer, esprits acides, huiles essentielles, qu'ils supposaient exister dans les régions supérieures de l'atmosphère. L'identité de composition de l'air à toutes les hauteurs, démontre l'inanité de ces systèmes.

Ce n'est qu'après la découverte de l'étincelle électrique, que l'on commença à soupçonner la véritable cause du tonnerre. Wall, qui, le premier, obtint d'un

gros morceau d'ambre des étincelles assez fortes, compara leur éclat à celui de l'éclair, et le bruit qui les accompagne, à celui du tonnerre, sans qu'il paraisse cependant avoir eu d'autre intention que de faire un simple rapprochement. Gray, en 1735, semble avoir le premier saisi l'analogie entre la foudre et « le feu électrique,..... qui, d'après quelques-unes de ces expériences, semble être de même nature que celle du tonnerre et de l'éclair. » La même idée est formulée d'une manière encore plus nette par Nollet. Après avoir combattu l'hypothèse, adoptée par Newton, que le tonnerre est dû à un « mélange d'exhalaisons capables de s'enflammer en fermentant, ou par le choc et la pression des nuées... » il fait connaître les motifs spécieux qui lui font supposer que le tonnerre a pour cause l'électricité, et que les effets merveilleux qu'elle engendre entre nos mains « sont de petites imitations de ces grands effets qui nous effrayent, et que tout dépend du même mécanisme <sup>1</sup>. »

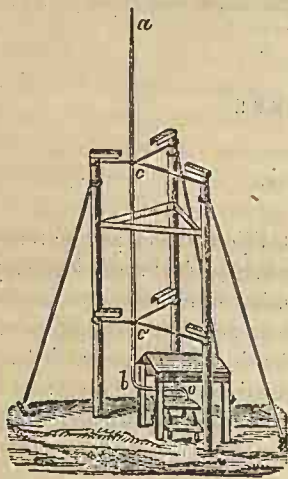


Fig. 1216.

On n'avait encore fait que des conjectures et quelques rapprochements plus ou moins heureux, lorsque Franklin, en étudiant la bouteille de Leyde, parvint par sa décharge à fondre des fils métalliques, et à volatiliser la dorure d'objets de bois, sans les brûler (1707). Il compara ces derniers effets à ceux de la foudre, qui fond l'argent dans une bourse sans l'endommager, la pointe d'une épée dans son fourreau qui reste intact, et le fer d'un javelot sans brûler le bois. Dès lors, Franklin fut convaincu de l'origine électrique du tonnerre, et il ne lui manquait qu'une preuve directe de la présence de l'électricité dans les nuages orageux. Il venait alors de découvrir le pouvoir des pointes, et il pensa d'abord à s'en servir pour *soutirer*, suivant son expression, le fluide des nuages. Il songea même, dès ce moment, en 1749, à l'application au paratonnerre. Il se proposait de planter une pointe de fer isolée, au sommet d'un clocher que l'on construisait à Philadelphie, et, en attendant, il publia ses idées, et indiqua les moyens de les mettre à exécution. Dalibart, pour répondre à cet appel, dressa dans une plaine élevée, à Marly-La-Ville, une barre de fer, *abo* (fig. 1216) de 14 mètres de hauteur, terminée en pointe, s'appuyant en *o* sur des tabourets isolants, et soutenue en *c*, *c'*, par des cordons de soie attachés à trois mâts. Le 10 mai 1752, il put tirer des étincelles du pied de la barre, pendant le passage d'un nuage orageux. Cette expérience, célèbre sous le nom d'*expérience de Marly-La-Ville*, fut répétée par Delor, Mazéas et Lemonnier, en France; Canton, en Angleterre; Beccaria, en Italie; Richmann, en Russie...

<sup>1</sup> *Leçons de physique expérimentale* (1771), t. IV, p. 314.



Dalibart et Canton adaptaient à la barre, un carillon électrique qui avertissait de la présence de l'électricité, et, de plus, permettait au fluide de passer dans le sol par étincelles d'un timbre à l'autre, quand la charge était trop forte. Cette précaution est loin d'être inutile : des observateurs furent renversés par des décharges parties de barres isolées, et Richmann, à Saint-Petersbourg, paya de sa vie l'absence d'un semblable moyen de sûreté<sup>1</sup>.

**1730. Cerf-volant électrique.** — Cependant Franklin, las d'attendre l'achèvement de son clocher, conçut l'idée de lancer vers les nuages un cerf-volant en soie armé d'une pointe. Il procéda à cette expérience accompagné de son fils seul, craignant, comme il le dit ingénument, le ridicule qui s'attache souvent aux expériences originales, quand elles ne sont pas couronnées de succès. La corde était retenue à son extrémité inférieure par un cordon de soie. D'abord il n'obtint aucun résultat; mais la pluie ayant mouillé la corde, il vit ses filaments se dresser, et ayant aussitôt approché le doigt, d'une clef qu'il y avait suspendue, il vit, avec une vive émotion, jaillir une première étincelle, qui fut suivie d'un grand nombre d'autres.

L'expérience de Franklin est de 1752. Un an après, de Romas ignorant ces premiers essais, obtenait, en France, des résultats semblables, pour répondre à une question proposée en 1749 par l'Académie de Bordeaux, sur les analogies entre la foudre et l'électricité<sup>2</sup>. Il eut l'idée heureuse de rendre la corde du cerf-volant conductrice, en l'entrelaçant avec un fil métallique; aussi obtint-il des résultats d'une intensité remarquable. La corde était attachée à un cylindre de fer blanc retenu lui-même par un cordon de soie abrité de la pluie par un auvent. Il vit d'abord des brins de paille s'élançant vers le cylindre, au grand plaisir des spectateurs; il tira ensuite des étincelles au moyen d'un exciteur, imaginé à cette occasion, et qui consistait en une boule de métal communiquant par une chaîne avec le sol, et tenue par un manche de verre. Il put obtenir, pendant un orage assez faible, des centaines d'étincelles ayant jusqu'à 4<sup>m</sup> de longueur et 3<sup>cm</sup> d'épaisseur, et produisant plus de bruit qu'un pistolet.

**Chariot électrique.** — Ces expériences furent répétées par Charles, Beccaria, Cavallo... Le premier se servait du *chariot électrique*, imaginé par de Romas. Ce chariot porte un treuil soutenu par des colonnes de verre, sur lequel s'enroule la corde du cerf-volant. On fait tourner le treuil au moyen d'une manivelle en verre; et pendant tout le temps qu'on file la corde, on la fait communiquer avec le sol, par une chaîne attachée à l'axe du treuil et à un piquet de fer enfoncé en terre. Quand on veut expérimenter, on enlève la chaîne au moyen de tiges de

<sup>1</sup> Richmann avait planté sur un toit, une barre de fer isolée par une bouteille percée qu'elle traversait, et communiquant par une chaîne avec une tige, aussi isolée, fixée au plafond de son cabinet. Cette tige était terminée par une boule, dont il tirait des étincelles en en approchant un conducteur communiquant avec le sol. S'étant trop approché de la boule, il fut frappé à la tête par une étincelle, à une distance de 30 centimètres, et tomba raide mort.

<sup>2</sup> *Mémoires des savants étrangers*, t. II, et IV.

verre. Il faut procéder avec une extrême prudence; Charles avait coutume d'entourer son appareil d'un cercle de pieux en fer, en dehors duquel il avait toujours soin de se tenir.

Ces expériences prouvèrent que les nuages orageux contiennent des quantités prodigieuses d'électricité. Cette électricité est tantôt *positive* et tantôt *negative*. Par exemple, Canton a vu l'électricité que lui donnait une barre isolée terminée en pointe, changer de nature plusieurs fois pendant une heure. Nous ne rechercherons pas, pour le moment, d'où vient cette électricité; nous remarquerons seulement que les nuages orageux sont animés de mouvements rapides de translation combinés avec des mouvements relatifs de leurs différentes parties, mouvements sur lesquels nous reviendrons (1754), et qu'ils présentent de grandes différences d'un endroit à l'autre, dans leur état électrique et leur densité. Nous allons dès à présent expliquer l'éclair et le roulement du tonnerre.

**1731. DE L'ÉCLAIR.** — L'éclair n'est autre chose qu'une immense étincelle électrique traversant l'espace occupé par les nuages; il affecte en effet la forme sinuée de l'étincelle et en a l'éclat et l'instantanéité. — On a regardé longtemps l'éclair comme toujours produit par la décharge entre deux nuages électrisés à des potentiels différents; on supposait même, d'après Franklin, de Saussure, Beccaria, ... qu'il y avait presque toujours deux étages de nimbus entre lesquels éclataient les décharges; mais un semblable arrangement n'existe qu'accidentellement. Peltier a proposé l'explication suivante applicable au plus grand nombre des cas, et que l'observation vient chaque jour confirmer.

Les nuages orageux, formés de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air, constituent un conducteur imparfait présentant de grandes inégalités de densité, des interruptions remplies d'air humide, et des états électriques très-différents en leurs divers points. Dès lors l'électricité tend à s'y mettre en équilibre, soit par conduction, voie la plus lente, soit par décharges explosives franchissant de grandes distances et constituant l'éclair. Ces décharges partielles peuvent se reproduire plusieurs fois et en différents points, et peuvent être provoquées les unes par les autres, comme les étincelles entre plusieurs conducteurs placés en série et s'induisant mutuellement (1690). La grande longueur de l'éclair, qui peut atteindre 10 et même 15 kilomètres, s'explique par la faible résistance du milieu traversé, qui est composé d'air très-raréfié, et rempli de gouttelettes d'eau très-serrées. Ces décharges peuvent être comparées à celles qui se produisent sur les carreaux magiques (1690), ou sur l'armature à aventurine d'une jarre, pendant qu'on la charge; on voit sur cette armature des serpenteaux éblouissants qui éclatent successivement et sont produits par les mouvements brusques de l'électricité repoussée, se rendant aux points qui communiquent avec le sol. — Les décharges intestines des nuages présentent souvent des éclairs à plusieurs branches, et peuvent former de nombreuses ramifications, comme des bombes d'artifice.

**Éclairs de seconde classe.** — Indépendamment des éclairs dont nous venons de parler, qu'il nomme *éclairs de première classe*, Arago a distingué des

*éclair* de seconde classe, consistant en lueurs instantanées qui illuminent les nuages, tantôt sur leur contour seulement, tantôt sur toute leur surface. La couleur de ces lueurs est rouge intense, quelquefois bleuâtre ou violette. Ce sont des décharges silencieuses et *par conduction*, analogues aux effluves qui s'échappent en certains points de nos machines électriques. Il est évident que des éclairs de première classe voilés par des nuages, doivent souvent présenter l'apparence d'éclairs de seconde classe.

Les mêmes nuages donnent un grand nombre de décharges; ce qui se conçoit facilement à cause de l'irrégularité de leur structure et de l'immense espace qu'ils occupent. En outre, ces nuages se déplacent en se régénérant continuellement (1754), et les parties qui se forment apportent avec elles de nouvelles quantités d'électricité. Quand les nuages cessent de se renouveler, les éclairs deviennent de plus en plus faibles; et l'orage s'éteint peu à peu. Une partie de l'électricité des nuages est aussi enlevée par la pluie abondante qui accompagne les orages, et qui éprouve souvent une recrudescence marquée après chaque coup de tonnerre; la nuit, les gouttes de pluie sont parfois lumineuses en arrivant à terre.

**Durée de l'éclair.** — Les éclairs isolés n'ont qu'une durée inappréciable, moindre qu'un *millionième de seconde*, comme l'a constaté Wheatstone, en recevant la lumière d'éclairs nocturnes sur un disque portant des rayons très-serrés, et auquel il imprimait une très-grande vitesse de rotation. Quelle que fût cette vitesse, le disque paraissait fixe pendant qu'il était illuminé par l'éclair; il n'avait donc pas le temps de se déplacer pendant sa durée. Si  $n$  est le nombre de tours du disque par seconde, et  $r$ , le nombre de ses rayons, la durée de l'éclair est moindre que le temps que met un rayon pour venir prendre la place de celui qui le précède. Or ce temps est égal à une fraction de la durée d'un tour, égale à  $1 : r$ , ou à une fraction de seconde égale à  $1 : nr$ .

Quand les éclairs, produits par plusieurs décharges très-rapprochées provoquées les unes par les autres, sont discontinus, les raies du disque tournant, comme l'a vu Dove, semblent animées de mouvements oscillatoires; parce qu'ils apparaissent dans des positions différentes pendant les illuminations successives très-rapprochées.

**Eclairs dits de chaleur.** — Le soir des journées chaudes, on aperçoit souvent à l'horizon des lueurs connues sous le nom d'*éclair* de chaleur. Elles sont dues à des orages lointains dont le bruit ne parvient pas jusqu'à l'observateur, tandis que les éclairs, réfléchés par l'atmosphère, se distinguent à une distance beaucoup plus grande<sup>1</sup>. Cette explication, donnée par Sénèque, a été

<sup>1</sup> L'expérience a prouvé que, si le bruit du tonnerre ne parvient qu'à 5 ou 6 lieues, la lumière des éclairs se distingue la nuit à plus de 25 lieues. On peut voir la nuit, à 60 lieues de distance, par réflexion dans l'atmosphère, la lueur de quelques grammes de poudre brûlés à l'air libre, tandis que la courbure de la terre empêche de voir la flamme elle-même. — Pendant le jour, on entend souvent le tonnerre lointain, sans voir d'éclairs, surtout quand il y a interposition d'un rideau de nuages.

souvent vérifiée; on a constaté que des orages avaient éclaté du côté où l'on avait aperçu des éclairs *de chaleur*, et souvent l'apparition de ces lucurs a été suivie d'orages venus, pendant la nuit, des points de l'horizon où on les avait aperçus. La construction des cartes d'orages (1755) permet aujourd'hui de faire facilement ces sortes de vérifications.

**1732. ROULEMENT DU TONNERRE.** — La décharge de nos appareils est accompagnée d'une explosion instantanée, tandis que le bruit du tonnerre se prolonge avec des alternatives d'intensité suivies d'un grondement sourd qui va en s'affaiblissant graduellement. On a d'abord attribué le roulement à des échos renvoyés par des montagnes ou par les nuages; mais alors le bruit devrait toujours aller en diminuant, les sons réfléchis qui arrivent les derniers ayant parcouru le plus d'espace. Il faut donc chercher une autre cause, tout en reconnaissant que des réflexions sur les nuages (I, 606) peuvent contribuer à l'effet général; c'est, par exemple, à de semblables échos qu'est dû le grondement sourd qui termine les coups de tonnerre.

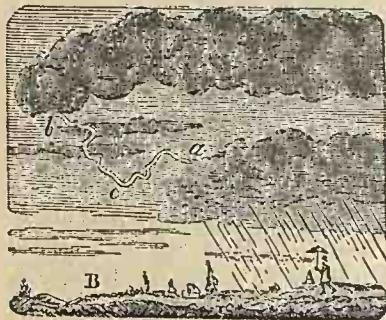


Fig. 1217.

R. Hooke a donné l'explication suivante, déduite de la transmission progressive du son : L'éclair n'ayant pas de durée appréciable, l'ébranlement qu'il produit dans l'air existe au même instant dans tous les points de son long parcours. Or un ébranlement se transmet avec une vitesse d'environ  $340^m$  par seconde. Les ébranlements produits en *a*, *c*, *b* (fig. 1217), arriveront donc à l'oreille d'un observateur placé en *A*,

les uns après les autres. Par exemple, si la différence entre les distances *bA* et *aA* est de  $340^m$ , le son engendré en *b* arrivera en *A* une seconde après celui qui a pris naissance en *a*. Comme les distances au point *A*, des points situés entre *a* et *b* passent des unes aux autres d'une manière continue, le bruit sera lui-même continu.

Les changements d'intensité proviennent de plusieurs causes : 1<sup>o</sup> l'éclair, dans ses vastes sinuosités, passe à travers des couches d'air ayant des densités très-différentes, soit à cause des inégalités de hauteur, soit à cause des quantités variables d'humidité; et l'intensité du son produit dépend de cette densité (I, 615). 2<sup>o</sup> A cause des nombreuses sinuosités de l'éclair, plusieurs de ses points peuvent être à la même distance de l'observateur, et les ébranlements produits en ces points arrivant en même temps à l'oreille, produisent un renforcement subit.

Il y a des coups de tonnerre *déchirants*, que Lucrèce compare au cri du parchemin que l'on déchire, et qui ne sont que des bruits violents séparés par des interruptions très-courtes. Ils s'expliquent, par des bifurcations de l'éclair,

par plusieurs décharges presque simultanées, par des décharges ayant lieu en même temps dans plusieurs nuages s'influçant les uns des autres, de manière à former un éclair interrompu, donnant par conséquent un bruit discontinu.

**1733. Distance et longueur de l'éclair.** — La vitesse du son étant à peu près de 340<sup>m</sup>, le nombre de secondes écoulées entre le moment où l'on voit l'éclair et le commencement du roulement du tonnerre, multiplié par 340, mesure la distance du point le plus rapproché de l'éclair. Quand on ne tient pas à une grande précision, on compte le temps au moyen du pouls, qui bat à peu près la seconde.

La durée du roulement qui suit l'éclair peut donner une idée de sa longueur ; car cette durée, multipliée par 340, fait connaître la différence entre les distances de ses deux extrémités à l'oreille de l'observateur. Cette différence est plus petite que la ligne droite qui joindrait les deux extrémités de l'éclair ; car, dans le triangle qui aurait pour sommets les points *a*, *b*, *A* (fig. 1217), le côté *ab* est plus grand que la différence des deux autres *aA*, *bA*. Delisle a observé, à Paris, des roulements ayant duré 39<sup>s</sup>, 41<sup>s</sup> et 45<sup>s</sup>, ce qui correspond à 3,3 ; 3,4 ; 3,8 lieues ! Mais le grondement sourd qui termine le roulement aurait dû en être séparé, étant produit par des échos sur les nuages.

## II. De la foudre et de ses effets.

**1734. De la foudre.** — Quand un nuage fortement électrisé est peu élevé, il décompose par influence l'électricité neutre du sol, principalement dans les objets saillants, refoule dans les profondeurs de la terre le fluide de même nom, et attire vers le haut le fluide de nom contraire. Celui-ci réagit sur le nuage, dont il appelle l'électricité dans les parties inférieures, et tend à le faire descendre ; puis, les gouttes de pluie facilitant la décharge, les deux fluides en présence se joignent à travers l'air ; et le point du sol où aboutit l'étincelle est foudroyé. Dans ce cas, on entend ordinairement un coup assez bref, parce que les divers points de l'éclair, court et à peu près vertical, sont sensiblement à la même distance de l'observateur.

On voit que la foudre ne diffère du tonnerre, qu'en ce que l'éclair, au lieu de sillonner l'espace occupé par les nuages, éclate entre ces nuages et des objets terrestres. Sénèque faisait déjà cette distinction : « *Fulguratio est fulmen, non in terras usque perlatum. Et rursus licet dicas, fulmen esse fulgurationem, usque in terras perductam* »<sup>1</sup>.

**Foudres bifurquées, etc.** — On a vu l'éclair, comme l'étincelle de nos machines, se bifurquer, et même se trifurquer en approchant du sol. Il paraît que la subdivision peut aller au delà de ce qui a été vu directement ; car, en examinant les effets produits par un seul coup de foudre, on a reconnu plus d'une

<sup>1</sup> L. Ann. Senecæ naturalium quest. lib. II, cap. XXI.

fois que l'éclair avait dû aboutir en même temps à cinq ou six points assez éloignés les uns des autres. Le bruit est alors déchirant, parce qu'il y a plusieurs lignes d'ébranlement inégalement distantes de l'observateur.

**1735. Des objets exposés à la foudre.** — Les objets les plus élevés sont naturellement les plus exposés à être foudroyés : les arbres isolés, les clochers, les navires en mer, les sommets des montagnes, sont fréquemment frappés de la foudre. Cependant la nature des corps a une grande influence, qui peut l'emporter même sur celle de la hauteur. Ainsi, les corps bons conducteurs, dans lesquels l'induction se fait facilement, sont atteints de préférence à d'autres plus élevés. On a vu, par exemple, la foudre frapper des buissons, des terres humides ou de nature conductrice, aux pieds de hautes tours construites en matériaux secs peu conducteurs. Le tonnerre frappe souvent les cheminées, à cause de leur position élevée, mais aussi à cause de la suie qui en garnit l'intérieur, et que le fluide ne manque pas de suivre. Les arbres, principalement les peupliers d'après M. Colladon, sont dans le même cas; ils sont conducteurs, excepté les arbres résineux, que la foudre frappe rarement. On ne saurait donc trop recommander de *ne jamais se réfugier sous les arbres isolés, en temps d'orage*. Il faut éviter aussi le voisinage des meules de blé, de fourrage, élevées au milieu des champs, dont la pluie rend la surface conductrice.

La foudre frappe fréquemment la surface des eaux. On voit parfois le liquide se soulever en obéissant à l'attraction du nuage, le monticule ainsi formé se déplacer en même temps que ce dernier, et la foudre éclater en faisant bouillonner l'eau, et en tuant souvent un grand nombre de poissons.

**1736. Du trajet de la foudre dans les édifices.** — Le chemin que suit le fluide dans les édifices foudroyés est très-irrégulier. Mais quand on examine avec attention l'état des lieux, on reconnaît que partout où il y a eu un changement de direction, ce changement a été provoqué par quelque cause, comme par la présence de quelques pièces de métal, qui reçoivent l'induction et agissent pour diriger le fluide. — L'existence de causes déterminantes est bien évidente dans les deux cas qui suivent : Le 25 avril 1676, la foudre frappe le clocher de l'abbaye de Saint-Médard, à Soissons, et parcourt l'édifice, en se divisant et en suivant plusieurs routes très-irrégulières, indiquées par divers dégâts. Onze ans auparavant, le même édifice avait été foudroyé, et le fluide avait suivi exactement les mêmes routes en produisant les mêmes effets. L'autre cas est cité par Arago, dans sa Notice sur le tonnerre<sup>1</sup> : la foudre frappe le clocher d'Antrasme, près de Laval, pénètre dans l'église, y fond des dorures, perce des trous, et produit différents dégâts qui furent réparés avec soin. Un an après, la foudre produit les mêmes effets, en passant exactement par les mêmes points.

L'influence des masses métalliques est attestée par une foule de faits. La foudre suit les tiges de métal, les tuyaux de descente des gouttières, les dorures des cadres et des lambris. En 1773, le tonnerre tombe, à Naples, sur l'hôtel de

<sup>1</sup> *Annuaire du bureau des longitudes, pour 1838.*

lord Tilney, traverse sept pièces dans lesquelles plus de 300 personnes étaient réunies, et deux antichambres où attendaient 250 domestiques, et cela sans blesser personne sérieusement, grâce aux dorures des corniches, des plafonds, et des baguettes des tapisseries et des fauteuils, que le fluide parcourut en volatilissant l'or. — On a vu la foudre suivre un fil de fer en le fondant en partie; puis, arrivée en un certain point, le quitter brusquement pour traverser un mur, à la hauteur du bout d'un canon de fusil appuyé du côté opposé. En 1759, à la Martinique, des soldats se réfugièrent près du mur d'une petite chapelle; deux sont tués par la foudre, qui perce le mur derrière eux précisément à la hauteur de barres de fer soutenant un tombeau du côté opposé, etc.

Quand la foudre trouve des corps bons conducteurs de dimensions suffisantes, elle les suit sans produire de dégâts : ce n'est que là où elle quitte ces corps, là où elle trouve de la résistance, que ses effets désastreux se manifestent. Ainsi, quand le fluide parcourt une barre de fer, on est sûr de trouver des dégâts notables à l'extrémité de cette barre. Ce résultat, facile à concevoir, a été fréquemment constaté.

**1737. EFFETS DE LA Foudre.** — Les effets de la foudre sont semblables, sauf l'intensité, à ceux que produit la décharge des batteries. Il y a des effets calorifiques, mécaniques, chimiques, magnétiques et physiologiques.

**I. Effets calorifiques.** — La foudre met le feu aux édifices, aux amas de fourrage, et souvent l'incendie se déclare en plusieurs points à la fois.

Les tiges minces métalliques, les fils de fer des sonnettes, ou des sonneries des horloges, sont souvent fondus par la foudre : quand la décharge est faible, ces fils sont simplement raccourcis. Sigaud-Lafond cite un coup de foudre qui tortilla un gros fil de fer, comme un crin mis très-près du feu; effet produit aussi par la décharge des batteries (1718). On a vu les anneaux de grosses chaînes être soudés les uns aux autres, de manière à former une barre rigide; les marteaux des horloges se souder à la cloche. Les masses métalliques trop considérables n'éprouvent de fusion qu'à leur superficie, surtout aux endroits saillants. Les corps peu conducteurs en contact avec les métaux restent le plus souvent intacts : c'est ainsi que le fourreau d'une épée, une bourse contenant des pièces de monnaie, ne sont pas brûlés, par le métal fondu sur les angles par la décharge. Ces résultats singuliers, cités par Sénèque, avaient conduit Franklin à supposer que la foudre produisait des *fusions froides*. Mais les corps non conducteurs ne manquent pas d'être brûlés lorsque les métaux en contact sont entièrement fondus. Dans le cas où ces corps ne présentent que des traces de fusion, les portions fondues sont instantanément refroidies par le contact de celles qu'elles recouvrent, et qui présentent assez de masse. Les choses se passent comme dans l'expérience du charbon ardent posé sur un morceau de toile appliquée sur une masse métallique (II, 954).

La foudre fond aussi les corps peu conducteurs. On a vu des ustensiles de verre être fondus en quelques parties, ou ramollis au point de se déformer; des briques être vitrifiées à la surface. De Saussure au mont Blanc, Ramond au pic

du Midi et au mont Perdu, de Humboldt au Mexique,..... ont observé des portions de roches vitrifiées par la foudre. Ces vitrifications n'ont d'épaisseur que quelques dixièmes de millimètres, mais elles recouvrent parfois des surfaces de près d'un mètre carré, qui sont vernissées d'une espèce d'émail gris ou jaunâtre, dans lequel on distingue des bulles ou boursoufflures, de plusieurs millimètres de diamètre.

**Fulgurites.** — Quand la foudre frappe certains terrains sablonneux recouvrant des couches humides, elle fond le sable en formant un tube vitrifié, lisse en dedans, et recouvert en dehors de grains de sable agglutinés. Le diamètre intérieur varie de 1 à 50<sup>mm</sup>, et la longueur peut atteindre jusqu'à 10 mètres. Ces *fulgurites* ou *tubes fulminaires*, souvent ramifiés à leur extrémité inférieure, sont plus ou moins inclinés sur l'horizon. Hermann en a le premier remarqué, dans la Silésie, en 1711. On les a considérés successivement comme des incrustations faites autour de racines ayant ensuite disparu; comme des cellules construites par des vers antédiluviens; comme des espèces de stalactites. Hentzen paraît les avoir, le premier, attribués à la foudre; opinion que Blumenbach et Fiedler ont confirmée. Depuis, la nature a été prise sur le fait, par Hagen, Wicke, Fiedler, qui ont trouvé des tubes encore chauds à l'endroit où ils avaient vu frapper la foudre.

Beudant, Hachette et Savart ont obtenu des tubes analogues aux fulgurites, en déchargeant la grande batterie du Conservatoire des Arts-et-Métiers de Paris, à travers des couches de verre pilé, ou de sable mêlé de sel pour le rendre plus fusible. Ils ont obtenu ainsi des tubes de 25 à 30<sup>cm</sup> de long sur 1 à 2<sup>mm</sup> de diamètre intérieur. M. W. Rollmann en obtient avec une seule jarre, ou au moyen de l'étincelle de la machine de Holtz, en opérant sur des poudres très-fusibles, principalement sur la fleur de soufre. La décharge part entre deux tiges métalliques soutenues par deux plaques de verre percées qui s'appuient sur la poudre. Quand la décharge est ralentie par une résistance intercalée dans le circuit, on obtient une tige pleine fondue, semblable à certaines fulgurites massives.

On trouve des tubes fulminaires dans la Silésie, la Prusse orientale, le Cumberland, au Brésil près de Bahia; en général, suivant la remarque de Fiedler, dans les localités où le sable recouvre une couche aquifère.

**1738. II. Effets mécaniques.** — La foudre brise les corps peu conducteurs: les pierres volent en éclats, les poutres se divisent en fragments et sont quelquefois réduites en poussière. Les arbres sont fendus ou divisés en minces lanières, souvent desséchées; on dit qu'ils sont *clivés*. Le fluide passe ordinairement entre le bois et l'écorce, où le pouvoir conducteur est le plus prononcé, à cause de la sève; l'écorce est détachée, probablement par l'expansion de la vapeur produite. Les cloisons, les murs sont perforés. Souvent la foudre soulève les dalles, au-dessous desquelles elle trouve une couche humide. Elle renverse des pans de murs, des parties d'édifices, en projetant les débris à de grandes distances. En 1762, en Cornouailles, le tonnerre démolit la tourelle d'une église et lance à 55<sup>m</sup> un bloc de pierre pesant plus de 100 kilos. En 1852, à Cher-



bourg, la foudre brise le bas-mât d'un navire désarmé; un fragment, de 2<sup>m</sup> de long et de 20<sup>cm</sup> d'équarrissage au gros bout, est lancé avec une telle force, qu'il s'engage par le gros bout, comme un boulet de canon, dans une cloison de chêne de 3<sup>cm</sup> d'épaisseur placée à 80<sup>m</sup> de distance.

La foudre produit aussi des phénomènes de transport : des objets assez lourds sont déplacés; des personnes foudroyées ont été quelquefois lancées à des distances de 20 à 30<sup>m</sup>. En 1809, à Swinton, près de Manchester, un mur pesant plus de 26000 kilos fut arraché de ses fondations et déplacé de 3<sup>m</sup> à l'une de ses extrémités, et de plus de 1<sup>m</sup> à l'autre. Ces effets prodigieux s'expliquent par les principes de Pouillet (1721), quand on considère l'énorme tension de l'électricité mise en jeu.

**1739. III. Effets chimiques.** — On conçoit facilement que la foudre doit produire une foule de décompositions dans les corps qu'elle traverse; elle transporte ensuite les éléments qu'elle a séparés, et les dépose en poussières impalpables sur d'autres corps qu'elle rencontre. C'est ainsi qu'on trouve des taches ferrugineuses, des dépôts d'épaisseur imperceptible de soufre, d'oxyde de cuivre, etc., sur les objets traversés par la foudre, et particulièrement dans les trous qu'elle produit. Fusinieri a appelé l'attention sur ces transports, qu'il rapproche de ceux qu'il a étudiés au moyen des batteries (1720).

L'éclair, en traversant l'air, détermine la combinaison d'un peu d'azote et d'oxygène (1722), et l'acide azotique formé se combine ensuite avec un peu d'ammoniaque, qu'il trouve dans l'air. C'est pourquoi les gouttes de pluie sont quelquefois acides pendant les orages. Liebig ayant analysé la pluie recueillie dans des vases de porcelaine à 77 époques différentes, trouva, dans 17 échantillons provenant de pluies d'orages, de l'acide azotique combiné à de l'ammoniaque ou de la chaux. C'est à l'acide nitrique, répandu dans l'atmosphère après les orages, qu'on attribue l'origine du salpêtre naturel. M. Boussingault a en effet remarqué, en Amérique, aux environs de Rio-Bamba, que le salpêtre se forme plus abondamment dans les localités où il tonne souvent. Ainsi, pour reproduire un rapprochement qui a été fait plus d'une fois, la foudre serait l'origine du salpêtre, qui forme la base de la poudre à canon, cette autre foudre, dont l'homme fait un si cruel usage.

**Odeurs développées par la foudre.** — La foudre laisse souvent après son passage une fumée épaisse, provenant de matières calcinées ou décomposées, et accompagnée d'une odeur forte qu'on désigne ordinairement sous le nom d'*odeur de soufre* et qui se reproduit surtout dans les édifices. Là la foudre peut rencontrer quelquefois des substances renfermant du soufre, et produire un peu d'acide sulfureux, qui se mêle à la fumée suffocante qui reste après l'accident. Mais, malgré l'opinion presque unanime, il ne paraît pas que l'odeur soit ordinairement celle de l'acide sulfureux; car, dans le dépouillement d'une quantité considérable de cas de foudre, nous n'en avons pas trouvé un seul où il fût dit que la fumée dégagée *excitait la toux*, comme le fait l'acide sulfureux. M. Boussingault a été souvent à même de faire des observations à ce sujet : sept fois la foudre a frappé

des arbres tout près de lui ; il a vu un nègre tué sous ses yeux ; à Zupia, sa maison a été incendiée ; en Europe, le tonnerre est tombé dans sa chambre, et jamais il n'a senti l'acide sulfureux. Il compare l'odeur qu'il a remarquée à celle que dégage le bois brûlé, et il pense que, si les observateurs parlent souvent d'odeur de soufre, c'est à cause de l'habitude que l'on a de désigner ainsi toutes les odeurs fortes et nauséabondes dont on ne connaît pas la véritable nature. — Il peut se faire aussi que les coups de foudre soient accompagnés de l'odeur de l'ozone. (1725), quand cette odeur n'est pas déguisée par celle de la fumée dégagee des corps atteints par le météore.

**1740. IV. Effets magnétiques.** — Quand la foudre frappe un navire, il arrive souvent que les pôles de l'aiguille des boussoles sont renversés. D'autres fois, les aiguilles perdent simplement leur magnétisme. Quelquefois enfin, l'axe magnétique est déplacé et fait avec l'axe de figure, un angle qui peut atteindre 90°, auquel cas l'aiguille se dirige de l'est à l'ouest. Il est donc important de vérifier les boussoles sur les navires qui viennent d'être foudroyés. Arago cite un vaisseau génois qui, croyant marcher vers le nord, vint se briser sur la côte, près d'Alger, les pôles de sa boussole ayant été renversés par un coup de foudre.

Le fer, les instruments d'acier, sont souvent aimantés quand le tonnerre tombe à côté. Le 19 mai 1819, la foudre entra dans la boutique d'un cordonnier, à Obergunzburg, en Souabe, et tous ses outils se trouvèrent si fortement aimantés, qu'il lui fallait perdre beaucoup de temps pour les séparer les uns des autres. L'aimantation des pièces de fer et d'acier des navires peut fausser les indications des boussoles. Duperrey, naviguant près de l'Australie, a vu la marche de ses chronomètres tellement accélérée par l'aimantation de leurs pièces d'acier, que la longitude calculée d'après leurs indications correspondait à un point situé à 40 lieues dans les terres.

**1741. V. Effets physiologiques.** — La foudre renverse, blesse, tue les hommes et les animaux. On constate généralement que les cadavres entrent rapidement en putréfaction. Quelquefois, on n'y voit aucune lésion extérieure ; d'autres fois, on remarque de longs sillons où la peau est enlevée, des plaies saignantes, des perforations, des brûlures. Quand il n'y a pas de marques extérieures, l'autopsie indique souvent une congestion au cerveau et un épanchement du sang hors des vaisseaux atteints. On a pu constater aussi que ce liquide, extrait des veines, avait perdu la propriété de se coaguler. Le fluide passe fréquemment entre les vêtements et la surface du corps, où se trouve une couche d'air rendue humide par la transpiration, c'est pourquoi la surface intérieure des vêtements présente quelquefois seule des traces de brûlures. Souvent, les habits sont enflammés, les ornements métalliques fondus ou arrachés. Quelquefois, on remarque sur la peau des empreintes de médailles ou autres objets très-conducteurs, analogues à celles que nous savons produire dans nos expériences (1720) ; mais souvent aussi produites autrement que par dépôt de matières entraînées. En outre, les objets sont quelquefois éloignés de plusieurs mètres de l'empreinte qui les représente. La grande masse d'électricité mise en

jeu peut aider à se rendre compte de cette circonstance. Mais il y a bien des points obscurs dans la plupart des cas qu'on a cherché à expliquer, d'autant plus que les récits manquent ordinairement de précision et sont empreints d'exagération. M. A. Poey a recueilli et discuté un grand nombre de faits de ce genre, et en a cherché l'explication probable avec beaucoup de sagacité<sup>1</sup>.

Les personnes foudroyées sont renversées sans entendre le coup ni voir l'éclair, comme l'ont toujours attesté celles qui sont revenues à la vie; elles conservent généralement pendant longtemps une grande faiblesse, qui indique que le système nerveux a été violemment ébranlé.

Les troupeaux de moutons sont souvent foudroyés; ce que l'on attribue à la colonne de vapeur qui s'élève de leur corps, pendant qu'ils se pressent les uns contre les autres, poussés par la frayeur. De plus, ils forment une masse conductrice considérable.

Nous avons parlé (1699) des essais que l'on a tentés pour guérir les paralysies au moyen de la commotion électrique; il est facile de saisir la liaison des deux faits suivants avec les résultats qu'on a obtenus: En 1762, à Kent, la foudre tombe dans la chambre du pasteur Winter paralysé depuis un an; il reçoit une violente commotion, après laquelle il se trouve guéri. En août 1819, à Niort, un malade atteint depuis plusieurs années d'un rhumatisme au bras gauche, est renversé par la foudre, et voit son mal disparaître.



Fig. 1218.

**1742. Choc en retour.** — On a vu des hommes et des animaux renversés ou tués au moment où la foudre éclatait à une grande distance. Ce résultat, connu sous le nom de *choc en retour*, a été expliqué par milord Mahon, en 1779: Considérons un point B (fig. 1218) placé au-dessous d'un nuage dense et fortement chargé d'électricité positive; il y aura induction dans le sol, en B; le fluide négatif sera attiré vers la surface, et le fluide positif refoulé dans les profondeurs de la terre. Si la foudre frappe en P, le nuage sera déchargé, et les fluides décomposés en B se rejoindront subitement à travers les objets terrestres, de manière à faire subir une violente commotion au voyageur qui se trouverait en B, pendant que celui qui serait entre P et B n'éprouverait rien, les électricités étant accumulées aux extrémités du nuage. Le choc en retour ayant lieu lorsque le tonnerre tombe, on voit que les nuages sont assez peu éloignés du sol pour agir fortement sur lui.

<sup>1</sup> Relation historique et théorie des images photo-électriques de la foudre, Paris, 1861.

On a des exemples bien constatés d'hommes et d'animaux renversés ou tués par le *choc en retour*. On n'aperçoit ordinairement aucune lésion sur les cadavres, si ce n'est quelquefois, chez l'homme, à la plante des pieds, surtout quand la chaussure est garnie de clous. Quoiqu'on n'en cite pas d'exemple, le choc en retour semble capable de produire des incendies, d'après un fait cité par Brydone (1746), et aussi d'après l'expérience suivante : On fait communiquer avec le sol, le bouton d'un pistolet de Volta isolé et placé très-près d'une machine électrique chargée. Au moment où on la décharge, le gaz fait explosion; l'électricité refoulée dans le sol rentrant par le bouton, en produisant l'étincelle intérieure.

**1743. Des victimes de la foudre.** — Dans les villes, où il y a un très-grand nombre d'édifices élevés, la chance d'être foudroyé est peu à redouter; mais il n'en est pas de même dans les villages et dans les campagnes. Il résulte d'un relevé fait par M. Boudin<sup>1</sup>, qu'il y a eu, en France, 2238 personnes tuées raide par la foudre, en 29 ans, de 1833 à 1862, ou, en moyenne, 77 par an. Le maximum a été de 111, en 1835, et le minimum de 18 en 1847. Si l'on y joint celles qui ont survécu quelque temps à l'accident, et celles qui n'ont été que blessées, on arrive à plus de 6700, ou 251 par an, en moyenne. Les femmes paraissent moins exposées que les hommes; car, sur 880 personnes frappées de 1854 à 1863, il n'y a que 233 femmes, moins du tiers. On serait tenté d'attribuer cette sorte d'immunité à ce que les femmes s'exposent peu au dehors, en temps d'orage; mais dans les groupes, on les a vues plusieurs fois être épargnées de préférence aux hommes. Faut-il voir là une influence de la nature des vêtements?

Les départements les plus élevés au-dessus de la mer, ceux dont le sol est montagneux, sont le plus exposés. Ainsi, de 1835 à 1852, le département du Cantal a eu 20 morts par la foudre; l'Aveyron, 24; la Corse, 27; la Saône-et-Loire, 38; la Haute-Loire, 44; le Puy-de-Dôme, 48; tandis que l'Eure, l'Eure-et-Loir et le Calvados, n'en ont eu que 2 ou 3. On a vu jusqu'à 11 victimes faites par le même coup : en août 1871, la foudre frappe le clocher d'une petite église isolée de la commune de Podenzana, dans la principauté de Massa et Carrara en Italie, et parmi les personnes qui avaient cherché un abri dans l'église, elle en tue 11, dont trois qui sonnaient les cloches, et en blesse 28 autres. Lors du coup de foudre qui frappa l'église de Chateaufort-les-Moustiers, dans les Basses-Alpes, en juillet 1819, 9 personnes furent tuées et 82 blessées. A la fin de juin 1861, on releva, en France, 33 coups de foudre, en 8 jours, dont chacun tua ou blessa grièvement au moins une personne.

Dans les autres pays de l'Europe, M. Boudin trouve, pour la moyenne annuelle des individus tués raide par la foudre : en Belgique, 3; en Suisse, 9,64; en Angleterre, 22. Ce sont là évidemment des minimum : que d'accidents qui n'ont pas été constatés, que de morts dont la cause n'a pas été enregistrée!

**1744. Des précautions à prendre en temps d'orage.** — On voit que la chance d'être foudroyé n'est pas aussi méprisable qu'on l'a dit quelquefois. Cette

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXIX, LX, LXI.

chance augmente énormément au moment d'un orage; il n'est donc pas inutile de faire connaître les précautions à prendre en pareil cas.

Dans les maisons, il faut s'éloigner des masses conductrices, déposer les objets en métal qu'on a sur soi, se tenir à distance des cheminées (1735). On est moins exposé au milieu d'une chambre que près des murs et des angles, où se réfugient souvent les personnes timorées. Il y a plus de danger à se grouper qu'à se tenir séparés les uns des autres. Les obstacles les plus faibles détournant quelquefois le fluide, il est bon de tenir les fenêtres et les portes fermées. On a vu la foudre glisser sur des vêtements de soie, des manteaux de toile cirée, sans faire de mal à ceux qui les portaient.

Au-dehors, il faut éviter de se mettre à l'abri près des édifices élevés, des clochers, des meules de paille ou de foin, qui sont souvent foudroyés; surtout de se placer sous les arbres isolés. Sur 107 personnes tuées par la foudre de 1843 à 1854, M. Boudin en trouve 21 tuées sous des arbres, et ce n'est là qu'un minimum, car souvent le lieu de l'accident n'est pas précisé. En temps d'orage, les personnes réunies dans les églises de campagne dépourvues de paratonnerre, sont très-exposées. En 1718, dans un seul orage, la foudre frappa 24 églises, comprises entre Landerneau et Saint-Pol de Léon, et le 19 février 1860, en Belgique, elle incendia, en moins de deux heures, 40 clochers, sur une étendue de 160 kilomètres environ.

En rase campagne, on doit éviter les terrains élevés. Si l'orage est violent et les nuages bas, il faut tâcher de trouver un grand arbre et se placer à une distance de son pied égale à peu près à sa hauteur; si les branches s'étendent beaucoup en largeur, la distance devra être plus grande. On se trouvera ainsi préservé par l'arbre, qui sera frappé de préférence. Il ne paraît pas, qu'il y ait danger à courir pendant l'orage; ce ne serait qu'autant que la foudre viendrait à tomber dans l'espace d'air raréfié qu'on laisse derrière soi, que, *peut-être*, le fluide pourrait se détourner pour s'élancer dans cet espace.

**17-15. Foudre globulaire.** — On voit quelquefois près du sol, en temps d'orage, des globes lumineux qui se meuvent avec lenteur, semblent éviter les objets terrestres, en allant çà et là, puis tout à coup éclatent avec fracas, en lançant autour d'eux des traits sinueux éblouissants, et en brisant avec violence tout ce qui se trouve à proximité, comme pourrait le faire l'explosion d'une mine. Ces globes laissent quelquefois derrière eux une trainée d'étincelles; leur éclat est comparé à celui du fer rouge, à celui de la lune; leur diamètre paraît varier, de quelques centimètres à 1 mètre; ils ne semblent pas avoir de préférence pour les bons conducteurs. Cette espèce de foudre, désignée sous les noms de *foudre globulaire*, *tonnerre en boule*, *globe fulminant*, a été citée par Sénèque; mais l'on n'y croyait pas lorsque Arago, qui en fait une troisième classe d'éclairs, en a prouvé la réalité en rassemblant un certain nombre d'observations bien avérées<sup>1</sup>. Depuis, un grand nombre de cas ont été remarqués et décrits

<sup>1</sup> *Notices sur le tonnerre, Annuaire du Bureau des longitudes, pour 1838.*

scientifiquement et avec détail. On a vu de ces globes osciller entre des nuages; les marins en observent quelquefois qui montent le long des mâts des navires. Hamilton en a vu sortir des nuages de cendres lancés par le Vésuve, pendant les éruptions de 1779 et de 1794, et éclater en projetant de vives étincelles électriques. Ces nuages volcaniques, qui sont fortement électrisés produisaient en même temps de nombreux éclairs ordinaires.

Les détails suivants, publiés par Babinet, donneront une idée des circonstances qui précèdent et accompagnent le plus souvent l'apparition des globes fulminants<sup>1</sup>. Un tailleur, près du Val-de-Grâce, à Paris, étant assis devant sa table, vit le châssis garni de papier qui fermait la cheminée, s'abattre doucement, et un globe de feu gros comme la tête d'un enfant, en sortir lentement et se promener dans la chambre à quelque distance du sol carrelé. Ce globe s'approcha des pieds de l'ouvrier qui les retira pour n'en être pas atteint, mais sans précipitation. Après quelques évolutions vers le milieu de la chambre, le globe s'éleva verticalement à la hauteur de la tête de l'homme, qui dut se pencher en arrière, pour l'éviter et qui n'éprouva, du reste, aucune impression de chaleur au visage. Puis le globe s'allongeant un peu, se dirigea obliquement vers un trou placé à 1<sup>m</sup> au-dessus de la tablette de la cheminée, détacha sans l'endommager une feuille de papier qui le fermait, entra dans le conduit de la cheminée, et, arrivé tout en haut, éclata avec fracas en projetant au loin les débris de la partie supérieure.

Il est à remarquer que de semblables globes ont presque toujours été signalés dans les coups de foudre les plus désastreux. Lors de l'accident qui détruisit entièrement, en 1718, l'église de Gouesnon, près de Brest. Deslandes vit trois globes de feu de plus d'un mètre de diamètre, qui se réunirent en un seul; celui-ci traversa le mur de l'église, et éclata dans l'intérieur en faisant sauter le toit et les murs.

Les globes fulminants ne finissent pas toujours en éclatant. En 1841, à Milan, on vit, pendant un violent orage, un globe de feu ayant la grandeur et l'éclat de la lune, parcourir une rue avec assez de lenteur pour que des curieux aient pu le suivre en marchant. Ce globe, s'élevant peu à peu, vint heurter la croix d'une église, et là disparut subitement, en produisant un bruit sourd. Le 17 mai 1852, le tonnerre tomba à 1 kilomètre de la station de Beuzeville, sur le chemin de fer du Havre. Des arbres masquaient le point foudroyé; mais aussitôt on en vit sortir un globe de feu s'avancant avec lenteur et suivi d'une traînée d'étincelles. Ce globe vint se poser « comme un oiseau » sur les fils du télégraphe électrique, et disparut subitement. Au même moment, les appareils télégraphiques de la station se mirent vivement, et on en vit jaillir une foule d'étincelles, ce qui montra que l'électricité du globe s'écoulait par le fil.

Les globes fulminants n'ont pu jusqu'à présent être expliqués; cependant on est parvenu à les imiter jusqu'à un certain point. M. G. Planté, entre autres, a

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XXXV, p. 5.

obtenu des résultats curieux au moyen de ses *piles secondaires*, qui donnent à la fois de grandes quantités d'électricité et une très-forte tension.

Ayant plongé, de 1<sup>mm</sup>, dans de l'eau salée remplissant un vase de verre, l'électrode négative en platine de sa pile, il amena au contact du liquide le fil positif, et vit se former autour de ce fil, avec un bruissement assez fort, un globule brillant, qui acquit un diamètre de 1<sup>cm</sup> quand il souleva le fil. Quand au contraire il enfonçait ce fil, le globule prenait un rapide mouvement giratoire, puis se portant vers le fil négatif, éclatait avec production d'une flamme autour de ce fil. Ce globule était formé de liquide électrisé positivement et dans un état sphéroïdal particulier, qui l'isolait du liquide environnant.

Quand le fil positif était amené très-près des parois, des sillons de lumière s'élançaient le long du verre, jusqu'à 3 ou 4<sup>cm</sup> de distance de ce fil et produisaient des explosions en approchant de l'électrode négative.

Sur l'eau pure, M. Planté a obtenu des globules de feu formés d'air, de vapeur et des produits de la décomposition de l'eau. Le fil positif étant plongé dans le liquide, il en approchait le fil négatif, l'en éloignait aussitôt, et il se formait entre l'eau et l'électrode un globule lumineux présentant en dessous des points brillants bleus, dont les mouvements indiquaient que le globule tournait sur lui-même; on empêchait l'électrode de fondre, en interposant dans le circuit la résistance d'une colonne d'eau.

En s'appuyant sur ces expériences, M. Planté considère les globes fulminants comme produits par un flux abondant d'électricité se portant vers le sol mouillé, à travers une colonne d'air saturée d'humidité par la pluie. C'est, en effet, à la fin des orages que ces phénomènes se montrent. Ajoutons que les trombes (1772), qui constituent des colonnes conductrices partant des nuages, laissent parfois échapper des globes fulminants par leur extrémité. On en a vu dont la partie inférieure était transparente, et qui constituaient une sorte d'électrode gigantesque terminée par un globe de feu seul visible, oscillant avec la colonne d'air humide à laquelle il était suspendu, et pouvant s'en détacher, pour éclater à une certaine distance. On peut donc dire qu'on est dès à présent sur la voie de l'explication des globes fulminants, et il semble bien prouvé qu'ils sont formés de matière pondérable dans un état électrique particulier.

**17-16. INDUCTION DES NUAGES ORAGEUX SUR LA TERRE.** — Les nuages électrisés peuvent produire par induction, sur les objets terrestres, divers effets remarquables. Arago cite certaines sources qui jaillissent avec plus d'abondance quand le temps est orageux. La fontaine dite *Cuve de César*, au mont d'Or, en Auvergne, lance deux colonnes d'eau verticales, qui bouillonnent avec un bruit particulier; et, d'après le Dr Bertrand, ce bruit est beaucoup plus fort en temps d'orage. Brugnatelli a vu, à la suite d'un orage, les eaux d'un lac du territoire de Lueques devenir blanches et troubles, et rejeter les jours suivants une multitude de poissons morts. Certaines inondations observées après des orages;

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXX, 4133 et LXXXV, 649.

ont été attribuées, en partie, à des masses d'eau considérables, tirées des entrailles de la terre par l'attraction électrique des nuages.

M. Liais a observé, en 1852, à Cherbourg, un ras de marée, pendant lequel la mer avait baissé, en 10 minutes, autant qu'elle le fait ordinairement en 2 heures, pendant qu'un orage intense s'éloignait du rivage; ce que l'on a attribué à l'action des nuages, attirant les eaux vers la pleine mer. — On a vu, pendant certains orages, l'eau de la mer s'élançer en forme de cône, puis retomber en écumant, pour être soulevée de nouveau.

Dans le fait suivant, cité par Arago, d'après Brydone, on saisit bien l'existence d'une action électrique produite dans le sol par les nuages orageux. Le 19 juillet 1785, au haut d'une montée, près de Coldstream, on vit tomber raides morts le conducteur et les deux chevaux d'un tombereau chargé de houille, et l'on entendit un bruit semblable à plusieurs coups de fusil. Le sol se trouva percé de deux trous, de 5<sup>cm</sup> de diamètre, à l'endroit où reposaient les roues, dont le bas du cercle de fer présentait des traces de fusion. Le bois était aussi endommagé en plusieurs endroits, et une partie du charbon dispersée au loin en présentant des traces de calcination. Cet événement eut lieu après l'éloignement d'un violent orage, et l'on n'aperçut aucun éclair au moment de la catastrophe. Il est à remarquer qu'une grande sécheresse régnait depuis longtemps dans le pays.

**Feu Saint-Elme.** — L'induction exercée sur la terre par les nuages orageux, fait souvent apparaître, aux parties saillantes des corps, des *aigrettes lumineuses* accompagnées quelquefois d'un léger pétilllement (1691). Ces aigrettes ont été souvent observées par les anciens, qui en tiraient divers présages. César vit le fer des lances d'une légion devenir lumineux par une nuit orageuse. Des voyageurs ont vu des aigrettes s'échapper, en temps d'orage, de leurs cheveux, des bords de leur chapeau, des extrémités de leurs doigts quand ils levaient la main. Quelquefois, au lieu d'aigrettes divergentes, on ne voit aux pointes qu'une petite leur globuleuse, ce qui semble indiquer qu'elles sont électrisées négativement (1692). On voit assez souvent de ces *lueurs sifflantes* sur les navires, aux extrémités des mâts et des vergues, aux filaments des cordages. Les anciens les désignaient sous le nom de *Castor et Pollux*; les marins modernes les appellent *feux Saint-Elme*, *Saint-Nicolas*, *Sainte-Claire*, *Sainte-Hélène*; les Portugais les nomment *corpo-santo*, et les Anglais, *comozants*. Les matelots attachent une foule d'idées superstitieuses à leur apparition, et les regardent généralement comme un présage de beau temps.

Au lieu de simples aigrettes, on a vu quelquefois des lueurs assez étendues et assez brillantes pour qu'on ait pu les comparer à des flammes. Maffei au château de Fordinovo, en 1713, vit, pendant un orage, apparaître sur les dalles d'une salle du rez-de-chaussée, une flamme vive très-agitée qui disparut subitement comme elle était venue; au même instant il entendit un bruit assez fort, des platras se détachèrent de la voûte, et il ressentit à l'épaule une sorte de châtouillement électrique. Lors d'un coup de tonnerre qui frappa une tour à Casalaone, en 1731, on vit un « grand feu » qui précéda l'explosion. L'abbé Jérôme Lioni



de Ceneda observa, près de Venise, pendant un orage des plus furieux, une flamme très-vive qui s'éleva rapidement de terre à une hauteur de deux coudées, et disparut subitement avec une violente explosion. Ces divers phénomènes font le passage à ceux que nous allons examiner.

**1747. Des foudres progressives et ascendantes.** — Le plus souvent, l'explosion de la foudre est instantanée, et l'éclair existe au même moment dans tous les points de son parcours. Dans ce cas, on ne peut dire si le tonnerre *descend* ou s'il *monte*. Il résulte d'observations assez nombreuses, que le trait électrique peut s'élancer d'un mouvement progressif assez lent pour qu'on ait pu le comparer à une fusée d'artifice, et souvent de bas en haut, auquel cas on lui donne le nom de *foudre ascendante*. La question des foudres ascendantes a été très-controversée. Maffei et Bertholon ayant soutenu que la foudre s'élance *toujours* de bas en haut, ont porté à contester le phénomène. Cependant de nombreux cas ont été attestés par des observateurs éclairés et dignes de foi. Voici quelques faits, cités par Bertholon <sup>1</sup>, où l'on a vu directement le phénomène. En 1725, Séguier vit, près de Nîmes, une large flamme s'élever de terre et disparaître bientôt avec explosion; il observa souvent, dans la plaine entre Vérone et Mantoue, des traits éblouissants qui s'élevaient de terre très-rapidement en ligne droite, et disparaissaient aussitôt, la plupart suivis du bruit du tonnerre. Chappe et Cassini, en août 1767, à l'Observatoire de Paris, Bertholon en 1772 aux environs de Toulouse virent des traits de feu s'élevant comme des fusées, en diminuant de grosseur et d'éclat à mesure qu'ils montaient. Bouguer, Lalande, Beccaria, Peltier citent des faits analogues, et il est bien probable que le sol était alors électrisé positivement. En 1776, Cotte vit distinctement, à différentes reprises, deux courants de feu partir, l'un de la terre et l'autre des nuages, pour se réunir avec explosion. Kaemtz a vu plusieurs fois deux éclairs partir de deux nuages et se réunir au milieu de l'espace qui les séparait, etc.

Ces phénomènes, bien constatés, qui s'expliquent par la polarité moléculaire du milieu traversé, peuvent être imités au moyen de nos appareils électriques. Par exemple, si l'on présente la main au conducteur d'une machine, de manière à obtenir une large aigrette, il n'est pas rare de voir jaillir au milieu de cette aigrette une étincelle violette qui s'allonge rapidement en serpentant, s'amincit en pointe fine et s'évanouit avant d'arriver à la main. En même temps on entend un craquement sourd, tout différent du bruit clair que produit l'étincelle ordinaire. Si l'on fait tomber de fortes étincelles sur l'extrémité d'une longue bande de verre couverte d'aventurine, dont l'autre extrémité communique avec le sol, on voit des serpenteaux partant des deux extrémités, s'élancer les uns vers les autres sans se joindre. L'espace que ne franchissent pas ces petits éclairs est rempli d'une multitude de points brillants <sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Journal de physique de Lametherie, t. X (1777), p. 479.

<sup>2</sup> Mémoires de l'Académie des Sciences de Toulouse, 5<sup>e</sup> série (1858), t. II, p. 479.

## III. Des moyens de se garantir de la foudre. — Paratonnerre.

**1748. Historique.** — Dès l'antiquité la plus reculée, on cherchait les moyens de se préserver de la foudre. Les premières pratiques étaient fondées sur des idées superstitieuses. D'après Pline, les anciens pensaient que la foudre ne pénétrait pas à plus de 2 mètres dans la terre; aussi, voyons-nous Auguste se réfugier sous des voûtes épaisses, en temps d'orage. Kœmpfer rapporte que les empereurs du Japon se plaçaient sous des réservoirs pleins d'eau. Franklin conseille de se coucher dans un hamac suspendu par des cordons de soie. Romas garnissait le plafond et les murs d'une chambre, d'un treillage en fil de fer, dont toutes les parties inférieures étaient réunies par un gros fil de fer communiquant avec le sol; moyen excellent, mais peu pratique.

Volta pensait que de grands feux pourraient décharger les nuages. Nous savons, en effet, que les gaz qui s'échappent d'une flamme déchargent les conducteurs de nos machines. Mais il faudrait un air calme et des nuages très-bas pour que la colonne de gaz chauds pût monter jusqu'à eux. On a proposé aussi de tirer le canon pour diviser les nuages; mais l'expérience a montré l'inutilité de cette pratique.

Dans beaucoup de villages, on a coutume de sonner les cloches. Cet usage est d'abord venu d'idées religieuses, et ce n'est que plus tard qu'on a cherché à le justifier scientifiquement. Mais de nombreux accidents s'étant produits, on voit, dès le commencement du dernier siècle, des arrêts qui défendent de sonner les cloches en temps d'orage. Un revirement d'idées s'est même fait à cet égard, et l'on a prétendu que de sonner les cloches attirait le tonnerre. Aujourd'hui, l'opinion générale est que cette pratique n'a aucune influence sur le météore. Deslandes cite bien l'orage qui ravagea la Bretagne, en 1718, entre Landerneau et Saint-Pol-de-Léon, pendant lequel la foudre frappa 24 clochers où l'on sonnait, tandis que les autres ne furent pas atteints; mais ce dernier point n'est pas bien prouvé; souvent, le météore ne laisse pas de traces de son passage, surtout quand il se présente un conducteur continu, comme celui que forment la cloche et sa corde qui est ordinairement accrochée au mur par son extrémité inférieure. Les clochers où l'on ne sonnait pas peuvent donc avoir été foudroyés sans qu'on s'en soit aperçu, tandis que, pour les autres, les sonneurs ne pouvaient manquer de remarquer le phénomène. Cependant *l'usage de sonner les cloches doit être fortement combattu*, parce que les sonneurs sont exposés à un danger imminent. Déjà, en 1785, on avait constaté, en Allemagne, que, dans l'espace de 33 ans, la foudre avait frappé 386 clochers, et avait tué 120 sonneurs.

**1749. PARATONNERRE.** — Dès que Franklin eut découvert le pouvoir des pointes, il songea à s'en servir pour décharger les nuages électrisés. Nous avons cité les expériences qui furent faites à cette époque, une des plus brillantes de l'histoire de la physique, soit avec une barre terminée en pointe, soit avec un

cerf-volant. Les premiers *paratonnerres* parurent peu de temps après, à Philadelphie. Un paratonnerre consiste en une barre de fer verticale *ab* (fig. 1219) nommée *la tige*, terminée en pointe, et communiquant intimement avec le sol par un *conducteur* non interrompu *bede*. Cet appareil se place sur le point le plus élevé de l'édifice que l'on veut préserver.

**Double rôle.** — I. Le premier rôle d'un paratonnerre consiste à préserver l'édifice des effets de la foudre. Il est évident que la décharge partant d'un point situé au-dessus de l'édifice, ira frapper de préférence l'extrémité de la tige, cette tige formant l'objet le plus élevé et constituant un bon conducteur dans lequel la décomposition par influence se fait plus facilement que dans le bois ou la pierre; le fluide, trouvant ensuite un conducteur continu, ira se perdre dans le sol sans occasionner de dégâts.

**Espace préservé.** — Charles admettait, d'après un grand nombre d'observations, qu'un paratonnerre préserve les objets placés dans un rayon égal au double de sa hauteur au-dessus du plan horizontal considéré. Il faut donc, d'après cette opinion généralement adoptée, armer les grands édifices de plusieurs tiges et les placer à une distance les unes des autres moindre que quatre fois leur hauteur. Du reste, il vaut mieux employer plusieurs paratonnerres de 3 à 5<sup>m</sup> de hauteur qu'un moindre nombre ayant de 7 à 8<sup>m</sup>. Comme on a vu la foudre frapper latéralement certains édifices, on dispose parfois, sur les bords du toit, des tiges inclinées destinées à recevoir ces coups obliques.

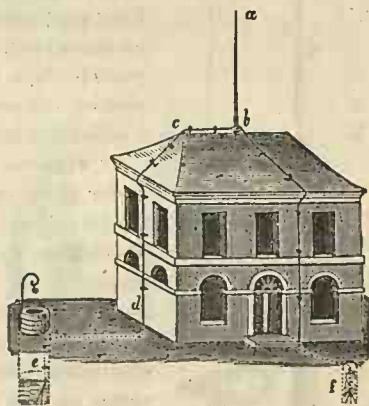


Fig. 1219.

Quand l'édifice contient de grandes masses métalliques, comme des gouttières, des garnitures en plomb ou zinc, l'induction dans ces masses étant considérable, il peut arriver que la foudre les frappe, quoique placées dans le rayon ordinairement préservé. Pour éviter cet accident, on fait communiquer ces masses avec le conducteur du paratonnerre. Lorsqu'il ne s'agit que de préserver l'édifice, une toiture de zinc, des plaques de plomb garnissant les angles du toit et communiquant avec le sol par des tuyaux de descentes en fonçant dans des puits, constituent de véritables paratonnerres.

**II. Action préventive.** — Le paratonnerre agit aussi en neutralisant peu à peu l'électricité des nuages, de manière à prévenir l'explosion de la foudre, et c'est alors que la pointe joue un rôle essentiel. L'électricité du nuage agit par induction sur le paratonnerre et les corps voisins, refoule dans le sol le fluide de même nom, et attire le fluide de nom contraire. Ce dernier s'échappant par

la pointe, se porte sur le nuage vers lequel il est attiré, neutralise une partie du fluide qui s'y trouve et en même temps empêche l'accumulation de l'électricité dans l'édifice. — La sortie de cette électricité par la pointe peut la faire fondre quand elle est trop effilée, et produit quelquefois une aigrette de 15 à 20<sup>cm</sup> visible dans l'obscurité. Le flux d'électricité qui descend dans le sol pouvant être considérable, il faut éviter de s'en approcher, une partie du fluide pouvant se détourner sur l'imprudent placé trop près, s'il se présentait quelque résistance dans la communication avec le sol.

**1750. Construction des paratonnerres.** — En 1823, une commission de l'Académie des sciences de Paris publia les règles à suivre dans la construction des paratonnerres. Le fer entrant aujourd'hui en grande quantité dans les édifices, comme toiture, charpente, poutres, colonnes..., l'Académie des sciences est revenue à différentes fois sur cette question <sup>1</sup>.

**1<sup>o</sup> Tige.** — La tige du paratonnerre est une barre de fer allant en s'amincissant. Quand la hauteur est de 8 à 10 mètres, on donne à la base, supposée carrée, de 54 à 63<sup>mm</sup> de côté. On compose souvent la tige, de deux parties : l'une, ACB (*fig. 1220*), fixée à la charpente du toit, sans qu'il soit utile de l'en isoler, porte une embase mn, destinée à écarter la pluie; l'autre, DE, s'emboîte exactement dans la première, par un tenon conique a, retenu par une goupille.

Le fer étant sujet à se rouiller, on formait autrefois la pointe, d'une tige ov, en cuivre, de 33<sup>cm</sup> de hauteur, vissée à la tige de fer. La pointe est dorée à son extrémité, ou mieux, comme l'a imaginé Beyer, terminée par une petite aiguille de platine r, de 5<sup>cm</sup> de longueur. Cette aiguille est soudée, à l'argent, en o, à la tige de cuivre, et consolidée par un petit manchon de cuivre, R.

M. Perrot a constaté qu'une pointe décharge d'autant mieux un conducteur qu'elle est plus effilée; mais les pointes effilées sont sujettes à se fondre. La commission de 1855 a recommandé des pointes à angle de 30° (*fig. 1221*). Le cône, de platine, A, est vissé à l'extrémité de la tige de fer. MM. Deleuil ont remplacé le cône massif par une capsule de platine B, soudée, à la soudure forte, à un cône de fer qui la remplit exactement. La commission a aussi indiqué des pointes encore moins coûteuses en cuivre massif, vissées à l'extrémité de la tige

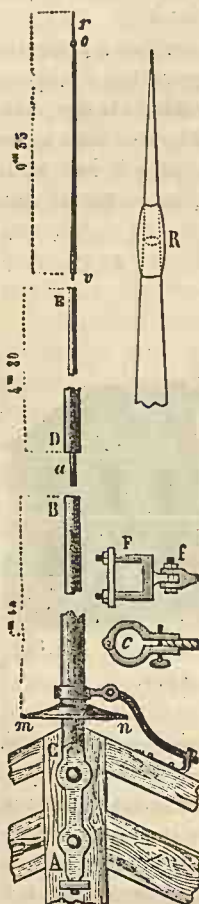


Fig. 1220.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de phys.*, 2<sup>e</sup> série, t. XXVI; 3<sup>e</sup> série, XLIII; 4<sup>e</sup> série, X et XIV.

de fer, C (fig. 1222). Le cuivre conduisant mieux que le platine, est moins exposé à être fondu par la décharge; et, quoique plus oxydable, il est maintenant généralement préféré.

M. Perrot a proposé d'armer la tige d'une couronne de pointes, ce qui lui donnerait une action neutralisante considérable, comme il l'a constaté directement en déchargeant des batteries au moyen de pointes. Il conseille aussi de disposer des pointes divergentes à la base de la tige, et annonce qu'un paratonnerre à pointes multiples préserve dans une zone beaucoup plus étendue que lorsqu'il n'y a qu'une pointe<sup>1</sup>.

**2° Conducteur.** — On fixe le conducteur au pied de la tige, soit en le serrant, au moyen d'un boulon, entre les oreilles du collier *c* (fig. 1220), soit en le boulonnant en *f* à la queue de l'étrier F. Il est soutenu sur le toit par des fourchettes fixées à la charpente, et le long des murs par des crampons. On le recourbe pour lui faire suivre les contours du bâtiment, mais en évitant les courbures trop brusques, car on a vu le fluide, arrivé à un angle trop prononcé, s'échapper du conducteur, comme par une sorte de vitesse acquise. On met souvent deux conducteurs, pour plus de sûreté (fig. 1219). Lorsqu'il y a plusieurs paratonnerres sur le même édifice, il faut au moins un conducteur pour deux tiges, et l'on fait communiquer tous les conducteurs entre eux.

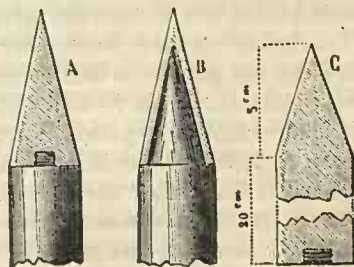


Fig. 1221.

Fig. 1222.

On donne au conducteur une épaisseur de 17<sup>mm</sup> s'il est cylindrique, et de 15<sup>mm</sup> s'il est carré. On n'a pas

d'exemple que des barres de cette grosseur aient été fondues par les plus violents coups de foudre. Si le conducteur était en cuivre, métal qui conduit 6 fois mieux que le fer, on pourrait se contenter d'une section 6 fois moindre. Le conducteur étant souvent formé de plusieurs barres-ajustées les unes à la suite des autres, il faut soigner les joints. La moindre séparation par de la poussière ou de la rouille, produisant une résistance, il pourrait y avoir fusion aux joints, et, par suite, interruption dans le conducteur. On devra donc souder à l'étain, et sur des surfaces ayant au moins 10<sup>cm</sup> carrés, les joints qui devront être ajustés sur place, et les consolider par des vis, des boulons ou des manchons.

Dans les paratonnerres des magasins à poudre, les plus petites solutions de continuité sont à redouter, parce qu'il s'y produit des étincelles qui peuvent enflammer le poussier de poudre qui voltige dans l'air. Aussi a-t-on coutume, comme l'a proposé Toaldo, dès 1776, de placer les paratonnerres sur des

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. LV.

colonnes ou des mâts placés près de l'édifice. Quand cela n'est pas possible, on dispose sur le bâtiment des paratonnerres sans tiges, sur lesquels les nuages n'agissent que faiblement, de manière que leur conducteur n'est parcouru, en temps d'orage, que par un faible courant d'électricité.

Beyer a imaginé d'employer pour conducteurs, des câbles en fil de fer, avec lesquels on ne peut craindre les solutions de continuité. On les compose ordinairement de 4 torons formés eux-mêmes de 15 fils de fer tordus. Les torons sont goudronnés séparément, puis le câble entier, pour éviter la rouille. Le câble doit avoir 16 à 18<sup>mm</sup> de diamètre. On le soude au pied de la tige et à la barre de fer qui entre en terre, de telle sorte que le fluide puisse passer également par tous les fils; sans cela quelques-uns pourraient être fondus, et le câble rompu. La commission de 1854 prescrit d'étamer les fils de fer à leur extrémité, et de les souder à l'étain sur une longueur de 10<sup>cm</sup>, au moins, de manière à former comme un cylindre massif. — Les tuyaux de descente des eaux pluviales pouvant suppléer à l'insuffisance des conducteurs, il est bon de les mettre en communication avec les tiges des paratonnerres.

Les chaînes ordinaires doivent être rejetées, les anneaux ne communiquant entre eux que par des surfaces de contact étroites, où il peut y avoir fusion. C'est ce qui est arrivé, le 19 avril 1827, à la chaîne du paquebot le *New-York*; elle fut dispersée en fragments, sur presque toute la longueur, et le pont fut couvert de globules de fer incandescents gros comme des balles de fusil, qui y mettaient le feu, malgré une couche épaisse de grêle et une pluie torrentielle.

**1751. 3<sup>o</sup> Communication avec le sol.** — La partie du paratonnerre qui demande le plus d'attention de la part du constructeur est la *racine*, c'est-à-dire la partie qui s'enfonce dans la terre. Si l'on a un puits à sa disposition, on y fait descendre le conducteur, de manière qu'il plonge dans l'eau, de  $\frac{1}{2}$  mètre au moins, quand le niveau est au plus bas (*e fig. 1219*), et on le termine par plusieurs branches qui facilitent la diffusion du fluide. La barre de fer se rend du pied de l'édifice au puits, à travers un canal revêtu de briques ne se joignant pas exactement, et rempli de *charbon calciné*, qui préserve la barre de l'oxydation et laisse passer facilement l'électricité dans le sol. On a vu des barres ainsi disposées, se conserver pendant plus de 30 ans. — On ne saurait trop étendre la surface de contact avec le sol ou l'eau du puits, qui conduisent beaucoup moins que les métaux. Il faudrait, pour l'eau, que la surface de contact fût de plusieurs centaines de mètres carrés pour qu'il n'y eût pas de résistance sensible.

Quand il n'y a pas de puits à proximité, on fore un large trou vertical, assez profond pour atteindre une couche aquifère. Dans l'axe du trou, on fixe l'extrémité de la barre, ramifiée en plusieurs branches, et l'on remplit ce trou avec du *coke* en petits morceaux, ou du *charbon calciné*, par exemple de la *braise de boulanger*, *f (fig. 1219)*. L'emploi du charbon a été indiqué par Patterson, en 1790. *Le charbon ordinaire ne peut convenir*, car il est mauvais conducteur (1583); on ne saurait trop insister sur ce point. Par exemple, le tonnerre tomba, en 1829, sur le paratonnerre du magasin à poudre de Bayonne, causa

divers dégâts à la toiture, et aurait pu occasionner une explosion désastreuse : le conducteur était entouré de charbon ordinaire.

La commission de 1854 conseille aussi d'adapter au point où le conducteur pénètre dans le sol, une branche secondaire s'étendant dans la couche superficielle, qui devient conductrice par la pluie, et peut se trouver séparée des couches humides profondes par des couches devenues peu conductrices à la suite d'une longue sécheresse.

Dans les terrains secs, par exemple, lorsqu'on est sur le roc, on creuse une longue rigole avec nombreuses ramifications, dans lesquelles on place le conducteur entouré de coke, afin de compenser, par l'étendue de la surface de contact, ce qui manque à la conductibilité du sol.

On a vu le foudre causer de grands dégâts à des édifices armés d'un paratonnerre dont le conducteur se terminait dans une *citerne* étanche; le ciment et la maçonnerie empêchant la sortie de l'électricité.

Un paratonnerre qui communique intimement avec le sol ne peut être dangereux; mais cette condition est essentielle. M. Melsens, qui a armé l'hôtel de ville de Bruxelles de paratonnerres à pointes multiples, les a fait communiquer avec les tuyaux de conduite de l'eau et du gaz, excellente disposition qui devrait être toujours imitée dans les villes. — Si la communication avec le sol n'est pas suffisamment établie, l'édifice est plus exposé qu'en l'absence de l'appareil, à cause de la grande élévation et de la nature métallique de ce dernier; et même, si la foudre ne frappe pas l'édifice, il s'y accumule une grande quantité d'électricité repoussée par celle du nuage, électricité qui peut se porter sur les corps voisins avec explosion, comme il est arrivé à Richmann (1729).

**1752. Paratonnerres sur les navires.** — Sur les navires, qui sont très-exposés aux coups de foudre, le paratonnerre se compose d'une pointe de cuivre plantée au sommet d'un mât, et à laquelle est soudé un câble en fil de fer, qui passe dans un anneau fixé au porte-hauban, et se joint à une barre de fer qui communique avec le doublage de cuivre du navire. Les gros vaisseaux sont armés de deux paratonnerres au moins, l'un sur le grand mât, l'autre sur le mât de misaine.

M. Harris, qui s'est occupé tout particulièrement des paratonnerres des navires, forme le conducteur, d'une série de feuilles de cuivre appliquées sur le mât, et qu'il fait communiquer avec le doublage, par de larges plaques métalliques circulant sur les flancs du navire, de manière à offrir à l'électricité un passage plus facile que par toute autre voie. Ces plaques se prêtent à toutes les positions de la mâture et protègent le bâtiment, même quand ses mâts sont endommagés ou brisés; car elles sont tellement distribuées et unies entre elles que, quel que soit le point frappé par la foudre, l'électricité ne peut entrer dans un circuit dont ces conducteurs ne seraient pas partie. Ce système est employé depuis 1830, en Angleterre, dans la marine de l'État.

**1753. De l'utilité des paratonnerres.** — Dès l'invention des paratonnerres, en 1752, on en a contesté l'utilité; on les a même accusés d'être

dangereux et d'attirer la foudre. Cette opposition, bien concevable du reste, quand on compare la simplicité des moyens à la grandeur des effets que l'on veut conjurer, a cédé devant l'évidence des faits, et les paratonnerres ont été adoptés dans tous les pays civilisés. Ils ont d'abord été appliqués à Philadelphie, où les accidents par la foudre, autrefois si fréquents, sont depuis devenus très-rares. D'Amérique, les *gardes-tonnerre*, comme on disait alors, passèrent en Italie et en Allemagne. Les premiers qu'on ait vus en France ont été établis, à Dijon, par Guyton de Morveau.

Après avoir reconnu que les paratonnerres préservent les édifices de la foudre, on contesta l'utilité des pointes. Les Anglais, le roi Georges à leur tête, en haine de Franklin, recommandaient de terminer les tiges par des boules. Prétendre enlever aux nuages une quantité sensible d'électricité, c'était, disaient-ils, vouloir vider un lac au moyen d'un simple robinet. Remarquons qu'il ne s'agit pas de détruire toute l'électricité des nuages, mais d'en diminuer seulement assez la tension pour qu'une décharge sur la terre ne puisse avoir lieu. Or, les quantités enlevées sont considérables, comme le prouvent les expériences du cerf-volant (1730), et celles qui suivent citées par Arago : Beccaria, en 1753, dressa sur une église de Turin, une barre isolée portant une pointe mobile, qu'on pouvait diriger à volonté vers le haut ou vers le bas, en tirant un cordon de soie. Cette pointe communiquait avec le sol au moyen d'un conducteur présentant une large solution de continuité. Par un temps d'orage, quand la pointe était tournée vers le ciel, des étincelles, tellement rapprochées qu'elles semblaient n'en former qu'une, remplissaient l'interruption; et quand on laissait retomber la pointe vers la terre, les étincelles étaient très-rares. — Du reste, on a pu constater plus d'une fois que des orages poussés par le vent au-dessus d'édifices armés de paratonnerres à pointes, s'apaisaient presque aussitôt, ou du moins diminuaient notablement d'intensité.

Il résulte, de plus, d'une multitude d'observations, que, non-seulement les paratonnerres à pointes préservent l'édifice quand la foudre le frappe, mais encore qu'ils empêchent *le plus souvent* l'explosion d'avoir lieu sur cet édifice. Voici quelques faits empruntés à la Notice d'Arago. Dans la Carinthie, une église placée sur une hauteur était si souvent foudroyée, qu'on avait fini par la fermer pendant l'été. Après qu'on l'eût armée d'une pointe, elle ne reçut, en 25 années, qu'un seul coup de foudre, qui ne produisit pas de dégâts. Le palais Valentino à Turin, l'église Saint-Marc de Venise, la tour de Sienne, étaient souvent endommagés par la foudre, avant qu'on y eût établi des paratonnerres. Dans le port Royal, à la Jamaïque, deux vaisseaux sont foudroyés au milieu d'un grand nombre d'autres; ils étaient seuls dépourvus de paratonnerres. Le 21 mai 1831, le vaisseau la *Calédonia* était entouré de coups de foudre qui frappaient la mer et le rivage, dans la baie de Plymouth, et il ne fut pas atteint, grâce à son paratonnerre. On peut conclure de là que les paratonnerres à pointe sont rarement foudroyés. Mais ils peuvent l'être, car nous avons vu qu'une étincelle peut jaillir sur une pointe, dans certaines conditions (1634). Une



décharge dans les nuages peut donc de même provoquer une seconde décharge entre une autre partie de nuage et la pointe d'un paratonnerre. Du reste, M. F. Dupré a rassemblé et discuté 168 cas de foudre ayant frappé 144 paratonnerres différents, dont 51 au moins étaient armés de pointes, parmi lesquelles 30 ont été en partie fondues, probablement parce qu'elles étaient trop effilées.

Quand on considère les dégâts qu'occasionne la foudre, les dangers redoutables auxquels on est exposé dans les maisons foudroyées, on ne comprend pas que les constructions élevées, les maisons isolées, et particulièrement les églises des campagnes ne soient pas toujours armées de paratonnerres. La dépense qu'exige leur construction, très-minime à côté des frais qu'entraîne la réparation des dégâts qu'ils empêchent, a été encore réduite de moitié par M. Jarriau, en remplaçant la tige cylindrique par un assemblage beaucoup plus léger, de 4 bandes de fer en cornière. Dans les églises de campagne, il suffirait le plus souvent d'unir au sol par un conducteur, la croix qui surmonte le clocher.

Les plus modestes chaumières peuvent être préservées très-économiquement, par une corde de paille partant du point le plus élevé du toit et dont l'extrémité inférieure est enfouie dans la terre, que la pluie rend conductrice. — Des peupliers plantés auprès d'une maison dont leur cime domine le toit, peuvent la préserver, pourvu que le tronc communique métalliquement, à partir d'une hauteur de un ou deux mètres, avec un terrain humide, comme le recommande M. Colladon; autrement, la décharge pourrait se porter du tronc sur la maison.

En mer, les coups de foudre sont fréquents et d'autant plus à redouter qu'ils peuvent entraîner la perte du navire. M. Harris, qui a fait de grands efforts pour propager les paratonnerres sur les vaisseaux, cite, dans un Mémoire présenté au conseil de l'amirauté, plus de 200 cas de foudre ayant endommagé des navires de la marine anglaise. A une certaine époque, en temps de guerre, 40 vaisseaux de ligne, 20 frégates et 10 corvettes furent mis hors de service par 70 coups de foudre, dont 40 mirent le feu à diverses parties du navire. Il cite encore 54 vaisseaux marchands foudroyés, dont 18 ont été complètement perdus.

Disons, en terminant, que les paratonnerres n'ont pas d'action sur le *tonnerre en boule* (1745), phénomène heureusement assez rare.

## § 2. — FORMATION DES ORAGES — GRÈLE — TROMBES

### I. Formation et constitution des nuages orageux.

**1754.** La constitution électrique et le mode de formation des nuages orageux ont été longtemps entourés d'une obscurité profonde, et ce n'est que depuis une trentaine d'années qu'on a commencé à avoir des idées justes sur ce phénomène.

**1755. Translation des orages.** — Un premier fait bien établi aujourd'hui, c'est qu'un orage n'est pas, comme on l'a cru longtemps, un phénomène fixe,

sévissant et s'apaisant au lieu même où il a pris naissance, ou à une petite distance de ce lieu. Déjà Tessier, dans une enquête célèbre sur l'orage désastreux du 13 juillet 1788, avait pu suivre sa marche à travers la France, du S.-O. au N.-O., entre la Rochelle et le Brabant, dans un espace de 200 lieues environ, et sur une largeur moyenne de 6 lieues et demie. Des enquêtes semblables faites par Lecoq sur les orages du 28 juillet et du 12 août 1835, qui traversèrent le département du Puy-de-Dôme, et par Élie de Beaumont sur l'orage du 10 octobre 1839, avaient aussi mis en évidence le mouvement de translation rapide du météore. Mais on n'y avait fait que peu d'attention, ou bien l'on avait regardé ces faits comme des exceptions, lorsque M. Marié-Davy, en 1864, en rapprochant les renseignements réunis, à l'Observatoire de Paris, à la suite de l'organisation de l'étude des tempêtes (II, 1437), fut frappé de la coïncidence entre les orages de France et l'arrivée des bourrasques venant de l'Atlantique. Sur son initiative et celle de Leverrier, et avec le concours des conseils généraux,

un système spécial d'observation des orages fut organisé. Des commissions furent instituées dans chaque arrondissement pour signaler leur arrivée et toutes les circonstances qui précèdent et accompagnent leur passage dans les communes atteintes. En chaque chef-lieu, une commission centrale rassemble les documents et les porte sur la carte du département. Les cartes départementales sont ensuite envoyées, avec les documents, à l'Observatoire de Paris, où toutes les indications relatives aux orages d'une même journée sont reportés sur une carte de France. On voit (fig. 1223) la réduction d'une de ces cartes.



Fig. 1223.

Les courbes parallèles passent par les localités où l'orage a éclaté à la même heure, qui est inscrite à côté des flèches qui marquent la direction de la translation. Les points noirs indiquent la grêle avec dégâts, les croix, la grêle sans dégâts, les zig-zag, les coups de foudre, etc.

Cette centralisation des observations a permis de constater ce grand fait général, que les orages importants traversent la France du S.-O. au N.-O., et qu'ils nous viennent de l'Atlantique, comme les bourrasques qui leur servent de véhicule, en se transportant comme elles suivant des courbes ressemblant à des paraboles qui tournent leur convexité vers l'ouest (II, 1435). On a constaté de plus, que leur intensité éprouve des fluctuations continuelles; une région étant souvent plus éprouvée par la pluie, la grêle, les coups de foudre, qu'une autre qui a été parcourue avant elle par le météore.

Il nous faut maintenant examiner comment naissent les orages au lieu de leur formation, et rendre compte des principales conditions dans lesquelles ils exécutent leur long parcours. En même temps, nous aurons occasion de rectifier quelques

détails et quelques explications données plus haut (II, 1435) d'après les idées ayant eu antérieurement cours dans la science.

**1756. Formation des orages.** — Pendant la translation, qui peut se faire avec une vitesse par heure de 20 kilomètres et plus, un orage est toujours animé d'un mouvement giratoire autour d'un axe vertical; ce qui explique le changement continu de direction du vent dans chaque localité qu'il traverse. Cet orage éprouve, comme nous venons de le dire, des variations d'intensité qui indiquent que l'électricité, l'humidité, la force vive, s'y renouvellent plus ou moins activement. Avant que l'orage n'arrive dans une région, on y remarque un calme caractéristique, une température élevée, une pression barométrique faible, et après le passage du météore, la température se trouve notablement abaissée. Une bonne théorie devra rendre compte de toutes ces circonstances.

Nous avons vu comment M. Espy a expliqué la génération des cyclones, ordinairement accompagnés d'orage, en supposant une colonne d'air dilatée par la chaleur solaire et produisant une sorte d'aspiration, qui imprime un mouvement centripète aux couches inférieures de l'air (II, 1434). Cette explication, d'abord accueillie avec faveur, a dû être abandonnée à la suite d'un examen plus attentif. M. Faye, après en avoir démontré l'insuffisance et fait ressortir les contradictions, a proposé une nouvelle théorie des orages que nous allons exposer, et qui s'adapte avec une facilité remarquable à toutes les conditions du phénomène.

Dans cette nouvelle théorie, ce n'est plus d'en bas, par aspiration, mais d'en haut que vient tout le mécanisme. Dans les régions supérieures où se tiennent les *cirrus*, il règne un froid intense (II, 1380), l'air est animé de vitesses de 20 kilomètres et plus, et l'électricité, qui est positive, est d'autant plus abondante que l'altitude est plus grande. Tous ces faits ont été prouvés par divers moyens et principalement par les voyages aérostatiques. On trouve donc dans les régions supérieures, le froid, le mouvement et l'électricité nécessaires à la formation d'un tornado ou d'un cyclone accompagné d'orage.

Cela posé, M. Faye explique la formation d'un tornado, tout simplement par un mouvement giratoire autour d'un axe vertical, qui prend naissance dans les couches élevées de l'atmosphère animées de rapides mouvements de translation, constituant les contre-alizés supérieurs. Pour donner naissance au mouvement giratoire, il suffit qu'il existe une différence de vitesse dans deux veines d'air marchant l'une à côté de l'autre, et le tourbillon ainsi formé est transporté avec la masse d'air qui le contient<sup>1</sup>. Comme la mécanique analytique des mouvements giratoires dans les fluides non limités latéralement est encore peu avancée, M. Faye compare les mouvements giratoires de l'atmosphère aux tourbillons qui se forment sous nos yeux dans les cours d'eau, parmi lesquels ceux à axe vertical sont réguliers et persistants, leurs mouvements ne contrariant pas les couches de niveau. Il suffit qu'un obstacle détermine une différence de vitesse dans deux parties voisines du liquide pour qu'il se produise un mouvement giratoire

<sup>1</sup> *Annuaire du Bureau des longitudes*, pour 1875 et pour 1877.

superficiel plus ou moins étendu, au milieu duquel se montre une dépression du niveau due à la force centrifuge. Le mouvement giratoire se propage en descendant et dans un espace qui diminue graduellement de diamètre, sans doute à cause de la pression croissante du liquide enveloppant, de manière que la masse en mouvement forme une espèce de cône plein, à génératrice courbe dont la convexité est tournée vers l'axe, et dans lequel chaque molécule décrit une spirale descendante. En même temps que le diamètre diminue, la rapidité de la rotation augmente, et le calcul indique que la vitesse angulaire est en raison inverse du carré du diamètre, et par conséquent la vitesse linéaire, en raison inverse de ce diamètre; d'où il résulte que la vitesse, peu prononcée à la surface, peut être très-grande à une certaine profondeur. Arrivé au fond, le mouvement perd sa force vive par la résistance qu'il rencontre; le fond est affouillé et les débris, rejetés dans toutes les directions avec l'eau refoulée, remontent irrégulièrement tout autour du tourbillon. En même temps, l'eau de la surface coule de tous côtés dans la dépression superficielle, en suivant des directions que le mouvement tournant rend excentriques, ce qui entretient le mouvement giratoire descendant.

Tout cela peut se vérifier par l'expérience, en imprimant artificiellement un mouvement giratoire à une partie de l'eau renfermée dans un vaste bassin, et jetant de la poussière sur la dépression centrale. M. X. de Maistre ayant employé de l'huile, l'a vue tourner en spirales descendantes; puis, arrivée au fond, remonter en gouttelettes tout autour du tourbillon.

Dans les cours d'eau, les tourbillons suivent le fil du courant dans lequel ils ont pris naissance. Ils sont quelquefois assez étendus et assez énergiques pour englober des embarcations. Un nageur saisi par un tourbillon, au lieu d'user ses forces dans une lutte inutile, doit se laisser entraîner jusqu'au fond, où il est rejeté latéralement, puis soulevé vers la surface de l'eau.

**1757. Application aux phénomènes aériens.** — Les tourbillons de l'air se forment de la même manière que ceux des cours d'eau. Seulement, l'air qui afflue par le haut étant très-froid, très-chargé d'électricité et susceptible de s'échauffer par la compression, des phénomènes particuliers se manifestent qui impriment aux tornados et aux cyclones leur caractère spécial.

Supposons d'abord que l'air des régions supérieures soit pur et transparent, comme cela a lieu au-dessus des plaines arides et sablonneuses. Dans son mouvement giratoire descendant, cet air s'échauffe à mesure que sa pression augmente, et arrive sec à la surface du sol, qu'il affouille en perdant sa force vive et en dispersant le sable qu'il soulève tout autour du tourbillon. Nous avons ainsi l'explication de ces tempêtes de sable, comme le *simoun* (II, 1433), si redoutées dans les déserts, et dont une chaleur excessive et une sécheresse extrême sont les caractères principaux. Elles ne sont pas accompagnées de tonnerre, l'eau précipitée manquant pour servir de conducteur à l'électricité des hautes régions.

Si l'air supérieur est chargé de gouttelettes d'eau, une partie en s'évaporant pendant la descente, détruit l'échauffement produit par la compression. S'il y a des parcelles de glace très-froides formant des cirrus, non-seulement la chaleur

de compression est absorbée, mais encore la colonne descendante reste très-froide; de grandes quantités de vapeurs sont précipitées; d'où ces épais nimbus, ces pluies torrentielles qui accompagnent les cyclones, et le phénomène de la grêle, dont l'explication découle ainsi, comme nous le verrons (1769), de cette belle théorie. En même temps, l'électricité des hautes régions, amassée et apportée par les parcelles d'eau ou de glace qui leur servent de conducteur, s'accumule dans les nimbus formés, et y produit tous les phénomènes qui caractérisent les forts orages.

L'orage se régénère par le haut à mesure qu'il perd son eau et son électricité, et avec une rapidité naturellement variable, d'où résultent les changements qu'éprouve son intensité pendant sa marche.

La formation du cyclone est ordinairement annoncée de loin par divers symptômes. Le baromètre baisse rapidement, l'air est chaud et perd sa transparence, le ciel devient blanchâtre, puis on aperçoit à une grande hauteur une tache d'un gris sombre à contours arrondis, qui se déplace rapidement en s'étendant, et indique la formation du tourbillon qui établit la communication entre les couches supérieures et les couches moyennes de l'atmosphère, où l'air froid descendant condense les vapeurs qu'il rencontre.

**1758. Orages locaux.** — Les circonstances favorables à la formation des tourbillons orageux peuvent se trouver réalisées dans nos climats, et il s'y forme alors des orages locaux généralement peu intenses et ne parcourant que des espaces peu étendus, avant de s'apaiser. Ces orages se forment à la fin des journées chaudes et calmes, l'air est humide, étouffant, le baromètre bas; on éprouve un malaise général, qui fait dire que le temps est lourd. A la faveur du calme, l'humidité s'élève verticalement par diffusion dans l'air, et arrive à la hauteur de 1000 à 3000 mètres, où elle se condense et forme une couche de cumulus. Ces nuages frappés par le soleil donnent de nouvelles vapeurs qui, parvenues à une hauteur de 6 à 8 mille mètres, se condensent en cirrus, dans lesquels s'amasse l'électricité abondante répandue dans l'air de ces régions élevées. Cette condensation de vapeur amène des variations de vitesse dans le courant supérieur, et un tornado se forme. Le tourbillon descend jusqu'à la couche inférieure de cumulus, dans laquelle il apporte le froid et l'électricité; il se forme d'épais nimbus fortement électrisés, et l'orage est constitué.

Cette communication par tourbillon descendant entre les deux étages de nuages est cachée à l'observateur de la plaine par le rideau de nuages inférieurs; mais on a pu l'observer dans les pays de montagnes, en se plaçant à une hauteur convenable. Par exemple, M. Rozet, dans les Pyrénées, a vu plus d'une fois, une colonne très-évasée par le haut, s'étendre entre une couche de cirrus et des cumulus flottant plus bas; ceux-ci se changeaient en nimbus qui s'abaissaient et donnaient tous les effets des orages. Le même observateur a constaté que toutes les fois qu'on voit se former une couche étendue de cirrus au-dessus de cumulus inférieurs, on peut prédire l'arrivée du mauvais temps. M. Peytier a fait des observations semblables dans les mêmes régions.

On conçoit que cette formation des orages locaux doit dépendre de la configuration et de la nature du sol. Les montagnes, qui jouent un si grand rôle dans la formation des nuages, la présence de forêts, de nappes d'eau qui donnent beaucoup de vapeurs doivent avoir une grande influence. Tandis que à Paris, il ne tonne que 14 fois par an, en moyenne, à Denainvilliers, entre Pithiviers et Orléans, il tonne jusqu'à 21 fois, et cependant le pays autour d'Orléans et Paris est très-uniforme. D'après un relevé fait, en 1803, en Angleterre, par M. Dillwyn, il semblerait que les pays de mines métalliques seraient moins exposés aux orages que les autres.

**Périodicité de certains orages.** — Volta avait remarqué qu'un orage était souvent suivi d'autres orages se produisant dans la même région et vers la même heure. Ce résultat, qui ne peut s'appliquer aux orages de passage venant de très-loin, peut s'expliquer par l'évaporation abondante qui se fait sur le sol mouillé par le premier orage, et par le froid qu'il a apporté dans les couches supérieures de l'air, froid qui favorise la condensation des vapeurs en nuages.

**1759. Constitution des nuages orageux.** — D'après ce qui précède, on voit que les orages puisent leur électricité dans les couches supérieures de l'atmosphère, où elle s'accumule sur les cirrus, qui la transportent ensuite de haut en bas dans les nimbus dont ils provoquent la formation par le froid qu'ils contiennent. Cette électricité tend à se porter à la surface des nuages (1624), et leur donne une apparence ballonnée et comme tendue, en même temps qu'on y distingue des mouvements intestins très-confus.

De ces nuages partent de longues ramifications qui s'étendent, envahissent le ciel et contribuent, en se réunissant les unes aux autres, à l'extension du nuage principal. On remarque aussi, assez souvent, de petits nuages blancs isolés, qui se meuvent irrégulièrement en s'approchant du nuage principal, qui les attire évidemment, et finissent par s'y réunir. Remarqués par Virgile, ils ont été désignés par Beccaria sous le nom d'*ascitizi*, c'est-à-dire subordonnés ou additionnels. On en voit souvent apparaître au-dessous du nuage principal, formant des taches blanchâtres. Ils sont très-irréguliers, comme déchirés; ils présentent de longs bras, qui se replient vivement quand leurs extrémités viennent à se rapprocher, ce qui doit être expliqué par la répulsion électrique qu'ils exercent les uns sur les autres.

En même temps, l'électricité cherche à s'équilibrer entre les différentes parties du nuage, soit par conduction, soit par des décharges diffuses ou explosives, mais l'équilibre est continuellement empêché par la précipitation de nouvelles vapeurs, et par l'arrivée d'en haut, de nouvelle électricité; dès lors l'orage est constitué, et la pluie tombe à grosses gouttes.

Les nuages orageux se forment à des hauteurs très-variables. Kaemtzen a vu, dans les Alpes, dépasser le sommet du Faulhorn, du Schwarzhorn, du Pilate et du Niësen, ce qui leur assigne une hauteur de 3300<sup>m</sup> au moins. Les habitants de Chamouni assurent que les orages passent souvent par-dessus le mont Blanc (4810<sup>m</sup>). Du reste, les traces de vitrification que l'on rencontre sur

ces hautes cimes (1737) montrent que des orages les ont dépassées. D'un autre côté, on a vu des nuages orageux à moins de 1000<sup>m</sup> de hauteur.

**1760.** Des voyageurs ont pu séjourner impunément au milieu de nuages orageux. Le météorologiste Richard a traversé de semblables nuages sur la petite montagne de Boyer, entre Châlons-sur-Saône et Tournus. MM. Peytier et Hossard, dans les Pyrénées, ont été plusieurs fois enveloppés dans des foyers d'orages tellement formidables, vus de la plaine, qu'on les croyait perdus. Leur tente, formée d'un triple couil serré, paraissait comme embrasée. Letestu, en 1786, resta dans son aérostat, pendant trois heures de la nuit, au milieu d'un orage; il entendait un bruit assourdissant, sa nacelle s'emplissait de neige et de grêle, les dorures de son drapeau étaient scintillantes.

On conçoit que, dans une pareille situation, l'observateur, électrisé de la même manière que le milieu qui l'environne, puisse être à l'abri des décharges électriques. Mais le danger n'est pas nul, car l'électricité étant inégalement distribuée dans les nuages, des décharges peuvent se faire d'un point à un autre. C'est ainsi que Letestu trouva son drapeau percé; et que MM. Peytier et Hossard virent des traces de fusion au canon d'un fusil laissé hors de leur tente, et des traces de carbonisation sur un piquet de bois planté en terre. M. Buchwalder, se trouvant sur le mont Sentis, dans les Alpes, fut enveloppé par un violent orage, et son aide fut tué par un globe fulminant, dans la tente où ils s'étaient réfugiés. Quant à lui, il éprouva une violente commotion suivie de la paralysie d'une jambe.

**1761. Tonnerres engendrés par les volcans.** — Les cendres sèches ou mêlées de vapeur d'eau lancées par les volcans en éruption, forment, quand l'air est calme, une colonne qui s'épanouit à une grande hauteur en un nuage épais, produisant souvent des éclairs et des coups de foudre. L'électricité semble produite ici par la même cause que celle des machines hydro-électriques (1609), la bouche du volcan jouant le rôle d'un immense ajutage. M. Palmieri, qui a pu observer de près ce phénomène, dans son observatoire du Vésuve, a remarqué que les éclairs et tonnerres ne se produisent que lorsque la vapeur d'eau est mêlée de beaucoup de cendres. Quand le vent poussait le nuage vers l'observatoire, il put constater que ce nuage était électrisé positivement quand il était formé de vapeur d'eau sans poussières, et négativement, quand il était composé de cendres sèches.

**1762. RÉPARTITION DES ORAGES.** — Les recherches que l'on a faites sur la répartition des orages suivant les saisons et suivant les lieux, auraient besoin d'être reprises, parce qu'on n'a pas fait la distinction entre les orages locaux et ceux qui arrivent de loin et parcourent de grands espaces. Voici cependant quelques résultats généraux qui méritent d'être cités.

**Répartition suivant les saisons.** — Dans les latitudes où les saisons sont bien caractérisées, on peut dire, en général, que les orages sont le plus fréquents dans la saison des chaleurs; par conséquent, en juillet et juin, dans notre hémisphère. Il y a cependant des pays où le maximum se présente en mai,

août ou septembre. Dans l'hémisphère austral, le maximum tombe en janvier, février ou mars, qui sont les mois les plus chauds.

Kaemtz a formé, pour différentes régions de l'Europe, le tableau suivant des nombres d'orages, sur cent par an, dans les différentes saisons :

	Hiver.	Printemps.	Été.	Automne.
Europe occidentale.....	8,9	17,7	52,5	20,9
Suisse.....	0,4	20,6	69,0	10,0
Allemagne.....	1,4	24,4	66,0	8,2
Intérieur de l'Europe.....	0,0	15,7	79,3	5,0

Ces résultats sont représentés sur la figure 1224. Les verticales sont proportionnelles aux nombres d'orages, et les saisons sont indiquées par l'initiale de leur nom. La courbe *eo* correspond à l'Europe occidentale, *ss* à la Suisse, *aa* à l'Allemagne, et *Ei* à l'intérieur de l'Europe.

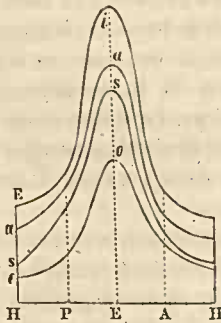


Fig. 1224.

Dans le tableau précédent, on reconnaît facilement l'influence des saisons. On voit qu'il y a très-peu d'orages en hiver. En Europe, on commence à en observer quelques-uns au mois de mars à Rome, à Padoue et à La Rochelle; en avril, ils pénètrent dans le centre de l'Allemagne; en mai, ils s'étendent vers Stockholm et Saint-Pétersbourg. Ils disparaissent en août dans cette dernière ville; vers septembre, au centre de l'Allemagne; en octobre, sur les côtes occidentales; en décembre, à Padoue et en Italie.

Si les orages sont rares en hiver, ils sont plus dangereux qu'en été, c'est-à-dire qu'ils donnent plus de coups de foudre; ce qui justifie le proverbe des campagnards, que le tonnerre n'est jamais plus dangereux que lorsqu'il fait froid. On se rend compte de ce résultat, en remarquant que les nuages sont ordinairement plus bas l'hiver que l'été.

**1763. Fréquence des orages en différents lieux.** — En général, le nombre des orages diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. A 70° de latitude nord, il tonne à peine une fois par an; il en est ainsi en Islande. Il ne paraît pas qu'on ait observé d'orages au-delà du 75° degré.

En Amérique, il y a, à égalité de latitude, plus d'orages qu'en Europe. A la Jamaïque, il tonne tous les jours pendant 5 mois consécutifs; et à Popayan, dans la Colombie, pendant toute une saison. M. Boussingault y a compté 20 jours orageux en un seul mois.

C'est surtout dans la zone torride que les orages sont fréquents; d'après M. Boussingault, chaque jour, et peut-être à tous les instants, il en existe en un ou plusieurs points de cette zone, et ils sont d'une violence extrême. Ils se



forment principalement au commencement et à la fin de la saison des pluies ; quand le soleil est au zénith du lieu ; quand les vents alizés changent, et particulièrement sur leur limite. Ainsi, à Madère, les orages sont fréquents en hiver, au moment où la limite de l'alizé du *nord-est* passe près de cette île. Mongo-Park a remarqué que les orages sont fréquents en Afrique, au moment où les vents du *sud-est* succèdent à ceux du *nord-est*, et réciproquement. Entre les tropiques, les orages ont surtout pour théâtre ces régions calmes où il ne règne pas de vents constants (II, 1429). Ce sont des cyclones d'une violence inouïe, d'abord peu étendus, commençant subitement, et restant rarement plus d'une demi-heure au même endroit.

Dans les régions où règnent les vents alizés, les orages sont aussi rares que les pluies elles-mêmes. Au Bas-Pérou, en particulier, où il ne pleut jamais (II, 1477), les habitants qui n'ont pas voyagé n'ont aucune idée du tonnerre.

**1761. Répartition en Europe.** — En Europe, il tonne plus souvent sur les versants occidentaux que dans la plaine. A Bergen, à l'ouest des Alpes scandinaves, les orages sont, comme les pluies, plus fréquents en hiver qu'en été ; c'est le contraire dans l'intérieur du pays. Les montagnes détournent aussi les orages de leur route, et les partagent souvent en deux autres qui sont emportés par le vent dans des directions différentes, avec d'énormes vitesses. M. Berghaus a dressé une carte du nombre moyen annuel des orages dans les diverses parties de l'Europe. Sur les côtes occidentales, ce nombre diminue assez régulièrement quand la latitude augmente. Au centre, le maximum se présente dans la vallée du Danube et à Sagan, dans la Silésie, à l'entrée de la vallée de l'Oder, régions les plus pluvieuses (à Bude, il y a 28 orages par an, et à Sagan, 29). Mais c'est surtout vers le sud-ouest de l'Europe, que les orages sont fréquents ; en Italie, entre Milan et Naples, sur l'Adriatique et ses côtes orientales jusqu'en Albanie, il y en a de 40 à 45 par an, à peu près le double de la plupart des autres points de l'Europe. D'après M. de Pouqueville, il y en a 42 à Padoue et à Rome, et 45 à Janina. La fréquence des tonnerres en Italie explique l'étude spéciale qu'en faisaient les Étrusques, et l'importance superstitieuse qu'y attachaient les Romains. En Grèce, les orages sont aussi très-nombreux (à peu près, 40 par an). D'après Lucrèce, ils sont plus fréquents au printemps et en automne, résultat confirmé par M. Peytier. En Sicile, où se font sentir les vents d'Afrique, et où il pleut rarement, on ne voit que peu d'orages : à Palerme, M. de Pouqueville n'en trouve que 13,5 par an, la plupart en automne.

**Orages en France.** — On doit à M. C. Martins un travail important sur la distribution des orages en France. Si l'on tire une ligne à peu près droite, allant du sud-ouest au nord-est, par La Rochelle, Orléans et Châlons-sur-Marne, on trouve, au nord de cette ligne, de 12 à 20 orages par an en moyenne, le nombre augmentant quand on descend vers le sud. Au midi de cette ligne et à l'ouest des Cévennes, le nombre d'orages augmente encore quand on marche vers le sud, mais on n'en compte plus que de 10 à 12.

**Influences locales.** — Dans ce qui précède, il est facile de reconnaître l'intervention de causes locales; c'est ainsi que nous rencontrons le plus d'orages dans le nord-ouest de la France, au centre de l'Allemagne et en Italie. Il tonne plus souvent sur les continents qu'en pleine mer.

## II. De la grêle.

**1766. Circonstances générales.** — La grêle vient des nuages orageux. Elle tombe pendant l'orage et jamais après. Les nuages à grêle sont épais, à contours déchirés. La grêle ne dure, en un même lieu, que peu de temps, 15 minutes au plus, et tombe dans un espace beaucoup plus étroit que celui que parcourt l'orage lui-même.

Un peu avant que la grêle ne tombe, on entend souvent dans les nuages un bruit particulier, qu'on a comparé à celui d'un tas de noix que l'on remue. Peltier cite une grêle tombée à Ham, qui fut précédée d'un bruit tellement intense, qu'il crut d'abord à l'arrivée d'un escadron de cavalerie. Ce bruit, mentionné par Aristote et par Lucrèce, est généralement attribué à la rencontre des grêlons qui s'entrechoquent avant de tomber. Quelquefois, ces grêlons n'arrivent pas à terre, avec la vitesse que comporte la hauteur d'où ils partent; ils tombent mollement, comme s'ils éprouvaient une résistance particulière supérieure à celle que produit l'air.

**1767. Grosseur, forme, structure des grêlons.** — Le volume des grêlons est très-variable. Dès qu'ils atteignent la grosseur d'une noix, ils anéantissent les récoltes; plus gros, ils brisent les branches des arbres; tuent les animaux. M. Delcros cite une grêle tombée à Angers, le 4 juillet 1819, qui enfonça des toitures; les grêlons étaient animés d'une telle vitesse, qu'ils perçaient des ardoises comme l'auraient fait des biscayens. La figure 1226 montre la coupe d'un de ces grêlons, dessinée à moitié grandeur; il y en avait de 12<sup>cm</sup> de diamètre. On a vu trop souvent des grêlons acquérir la grosseur d'un œuf de poule. M. Boisgiraud en a décrit de cette grosseur, tombés en grande quantité à Toulouse, dans la matinée du 8 juillet 1834. — En 1831, il tomba à Constantinople des grêlons gros comme le poing; une demi-heure après, ils pesaient encore 500<sup>gr</sup>. Le 15 juin 1829, une grêle enfonça les toits de Cazorta, en Espagne; les grêlons pesaient, dit-on, 2<sup>kil</sup>! Il est probable qu'ils étaient composés de plusieurs grêlons soudés les uns aux autres.

Muschenbroeck cite des masses tombées du ciel, formées de plusieurs grêlons soudés les uns aux autres. On doit recommander aux observateurs qui citent des grêlons de grosseur exceptionnelle, d'indiquer s'ils les ont vu tomber, ou s'ils les ont ramassés au milieu de grêlons tombés depuis quelque temps, car plusieurs peuvent se souder sur le sol, les uns étant à 0°, et d'autres au-dessous de zéro. Pouillet en a vu dont la température était à — 3°, et — 4°. C'est par une agglomération semblable qu'on pourrait expliquer la formation d'un bloc de

glace de 1<sup>m</sup> de long, que l'on dit être tombé en Hongrie, le 8 mai 1802. On prétend qu'on en a vu un de dimensions analogues près de Seringapatam, vers la fin du règne de Tippoo-Saïb.

**Forme.** — Les grêlons sont souvent de forme sphéroïdale, mais on en voit aussi d'ovales, d'aplatis, d'irréguliers; ils peuvent affecter les formes les plus bizarres; ceux d'une même averse sont généralement du même type. Leur surface est couverte d'éminences plus ou moins prononcées (fig. 1225 et 1226). Lecoq en a vu de forme ovale, sur les deux bouts desquels étaient implantées des aiguilles cristallines de glace. On rencontre assez souvent des grêlons ayant la forme de pyramides à angles émoussés par un commencement de fusion, et dont la base est remplacée par une portion de surface sphérique irrégulière, c (fig. 1225), qui semble avoir son

centre au sommet; ce qui permet de les considérer comme des fragments de masses sphéroïdales qui se sont divisées en secteurs.

**Structure.** — Il ne faut pas confondre avec la grêle, le simple grési (II, 1468), ou encore ces globules de glace qui tombent quelquefois pendant l'hiver et



Fig. 1225.

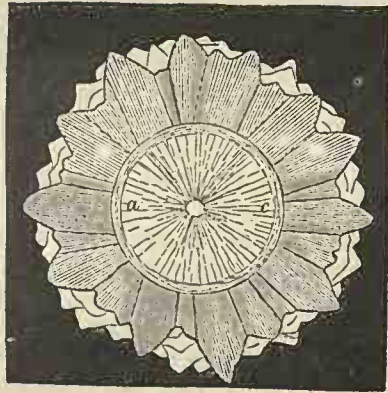


Fig. 1226.

ne sont que des gouttes de pluie congelées pendant leur chute. Les véritables grêlons sont produits pendant les orages; ils ont séjourné pendant quelque temps dans les nuages, et sont formés de plusieurs couches. Quand leur forme est sphéroïdale, ils présentent presque toujours au centre un noyau blanc opaques semblable à un grain de grési, autour duquel on voit une ou plusieurs couches concentriques, comme en a, b, d (fig. 1225), souvent alternativement opaque, et transparentes. Souvent aussi on distingue des stries rayonnantes partant du noyau opaque, comme en b (fig. 1225) et en ac (fig. 1226). La structure rayonnée explique la rupture de certains grêlons en secteurs sphériques présentant des couches parallèles à leur base (c, fig. 1225), rupture due, soit au choc des grêlons entre eux, soit à l'échauffement brusque qu'ils éprouvent en pénétrant dans les couches inférieures de l'atmosphère.

On remarque parfois, dans les grêlons, des bulles d'air allongées dans le sens des rayons. M. Boisgiraud a fait une remarque très-importante sur ceux qu'il a si bien décrits et que nous avons cités plus haut: Quelques-uns contenaient dans

la couche extérieure transparente, de petits grains de glace opaque, semblables au noyau central, et qui purent être séparés de la masse, dont ils paraissaient être indépendants. Enfin, on a trouvé dans certains grêlons des débris de paille, diverses poussières. M. Espy cite une grêle tombée en juin 1808, dans l'État de Tennessee, dont un grand nombre de grêlons avaient pour noyau des débris de branches d'arbre et de feuilles vertes.

**1768. Répartition des averses de grêle.** — Les indications que l'on a recueillies sur la répartition des averses de grêle sont assez vagues, à cause de la confusion faite généralement entre le grésil et la vraie grêle. Cependant, Muschenbroeck avait distingué la grêle sans orage (grésil) de celle qu'accompagne le tonnerre. Quand on ne fait pas cette distinction, on trouve que la grêle est d'autant plus rare en Europe, qu'on s'éloigne plus de la mer, et qu'elle tombe surtout au printemps. Mais la vraie grêle est propre, comme les orages, aux saisons chaudes; c'est alors que les grêlons sont gros, et ils le sont, en général, d'autant plus que la température est plus élevée.

Kaemtz a observé, en Allemagne et en Suisse, que, pendant l'été, la grêle tombe, le plus souvent, au moment le plus chaud de la journée. En *hiver*, au *printemps* et en *automne*, on l'observe surtout à 9 heures du soir et à 7 heures du matin; mais ce n'est le plus souvent que du grésil. De minuit à 4 heures du matin, on n'en voit que très-rarement, en toute saison.

**Influence des lieux.** — Le grésil est fréquent dans le nord, mais les grêlons proprement dits tombent surtout dans les régions tempérées. Entre les tropiques, il grêle rarement au niveau de la mer, et alors les grêlons sont en général très-gros. Une grêle qui tomba à la Martinique, en 1721, passa pour un prodige. Il ne grêle presque jamais à Cumana. Il résulte cependant, d'un bon travail de M. A. Poey, que la grêle n'est pas rare dans les Antilles. Ainsi il trouve, à Cuba, 49 grêles en 70 ans; de 1784 à 1854<sup>1</sup>. — Quand le niveau s'élève à 500 ou 600 mètres, la grêle devient moins rare. A Mexico il tomba, le 17 août 1830, une si grande quantité de grêle, qu'elle formait dans les rues une couche de 35 à 40<sup>cm</sup>. — Il tombe souvent de la grêle sur les montagnes. De Saussure en a observé 11 fois pendant un séjour de 13 jours au Col du Géant. M. Peytier a été souvent gêné dans ses travaux géodésiques des Pyrénées, par des averses de grêle. Quelquefois, au même moment, les vallées ne recevaient que de la pluie. Il est probable que, dans beaucoup de cas, il ne s'agissait encore que de grésil.

Ici, comme pour les orages, on remarque l'influence de la configuration du sol. Il y a des localités annuellement ravagées par la grêle : telles sont certaines parties de l'Auvergne, aux environs de Clermont; tandis qu'entre le Puy-de-Dôme et le mont Dore, on en voit à peine une fois en 20 ans. D'après Scheuchzer, les vallées de la Suisse dirigées de l'est à l'ouest, comme celles du Valais et de Glaris, jouissent de la même immunité.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLIV, p. 226.

**Marche des nuages à grêle.** — Muschenbroeck avait déjà remarqué que la grêle se forme dans un foyer très-circonscrit, qui s'avance rapidement en ravageant un espace étroit. Dans l'orage du 13 juillet 1788, si bien décrit par Tessier<sup>1</sup>, qui traversa la France du *sud-ouest* au *nord-est*, les points frappés par la grêle formaient deux bandes généralement parallèles à cette direction. La bande occidentale s'allongeait, du confluent de l'Indre à la Loire jusqu'à Gand; et la bande orientale, d'Amboise à Malines. La première avait 700 kilomètres de long et 16 de largeur moyenne, et la seconde 800<sup>kil</sup> de long et 8 de largeur. 1039 paroisses de France furent ravagées dans l'espace de quelques heures; les dégâts furent évalués à 24 ou 25 millions. Les deux bandes étaient séparées par un espace d'une largeur moyenne de 21<sup>kil</sup>, qui ne reçut que de la pluie. Il plut beaucoup aussi à l'est et à l'ouest des deux bandes. La grêle ne tomba, en chaque lieu, que pendant 10 minutes au plus, mais abondamment, et les grêlons étaient très-gros, pesant jusqu'à 250<sup>gr</sup>, et les nuages d'où elle tombait étaient très-bas. En comparant les heures du phénomène en différents pays, on reconnut que l'orage avait marché avec une vitesse de 64 à 65 kilomètres à l'heure, et l'on put constater ses effets en Hollande, et jusque dans la mer Baltique.

Dans son enquête sur la grêle du 28 juillet 1835<sup>2</sup>, Lecoq constata que la grêle tomba d'abord sur l'île d'Oléron, vers 10<sup>h</sup> du matin; à midi, dans le département de la Creuse; vers une heure, dans celui du Puy-de-Dôme; l'orage doublait ensuite cette montagne, et venait s'éteindre sur Clermont, après avoir parcouru 360<sup>kil</sup> environ, en 4 heures 30<sup>m</sup>. Les grêlons allèrent toujours en grossissant; comparables à des noisettes dans la Charente-Inférieure, ils présentaient, près d'Aubusson et de Clermont, la grosseur et la forme d'œufs de poule. Le nuage était bas, car le sommet du Puy-de-Dôme ne reçut pas de grêle, tandis que le petit Puy-de-Dôme en fut couvert.

**1769. De la théorie de la grêle.** — On a fait beaucoup de tentatives pour expliquer le phénomène de la grêle. Sans remonter jusqu'à certains philosophes de l'antiquité, pour lesquels les nuages à grêle étaient formés de masses de glace qui se brisaient en petits morceaux, nous citerons Muschenbroeck et l'abbé Mongez comme ayant les premiers cherché à expliquer ce météore. L'un expliquait la grosseur des grêlons par des agglomérations de très-petites masses de glace, et l'autre supposait qu'ils s'accroissaient pendant leur chute.

Les deux points principaux à expliquer sont l'origine du froid nécessaire à la congélation des grêlons, et le séjour de ceux-ci dans les nuages où ils s'accroissent en oscillant pendant un certain temps avant de tomber. Volta, le premier, a cherché à rendre compte de ces deux circonstances<sup>3</sup>. Il attribue le froid qui congèle l'eau des nuages, à l'évaporation, activée par l'électricité, par la sécheresse de l'air des hautes régions, et, chose étrange, par la chaleur solaire frappant

<sup>1</sup> Mémoires de l'Académie des sciences de Paris, pour 1790, p. 263.

<sup>2</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. II, p. 324.

<sup>3</sup> Journal de physique de Lametherie, t. LXIX, pp. 286 et 333.

le dessus des nuages, et il voyait là l'explication de ce fait que la grêle se montre aux heures les plus chaudes de la journée. Les particules de glace formées ainsi à la surface supérieure du nuage seraient soulevées par répulsion électrique, pour retomber après avoir perdu leur électricité, et être soulevées de nouveau. S'il y avait deux couches de nuages électrisées d'une manière opposée, les particules oscilleraient entre ces deux couches, comme les balles de l'*appareil à grêle* (1597), tout en grossissant et condensant de nouvelles vapeurs, et finiraient par tomber. Cette théorie, longtemps célèbre, est sujette à beaucoup d'objections même après les perfectionnements qu'y ont apportés Bellani et Peltier. Ce qu'il en faut retenir, c'est l'oscillation des grêlons dans les nuages où ils s'accroissent; oscillation admise depuis, dans presque tous les systèmes proposés pour expliquer la grêle.

M. Olmsted attribuait, avec beaucoup de physiciens, la congélation des grêlons, à la rencontre des vents du nord condensant et congelant les vapeurs apportées par ceux du sud, et il supposait que leur accroissement se faisait simplement pendant leur chute. — Lecoq croyait à la nécessité de la présence d'une couche de nuages électrisés au-dessus du nuage à grêle, et soutenant les grêlons pendant leurs oscillations. — M. Renou a introduit dans la question l'idée heureuse de la surfusion des gouttes d'eau ayant une température notablement inférieure à zéro. Mais tous ces systèmes sont sujets à de nombreuses objections surtout en ce qui concerne l'origine du froid nécessaire à la formation des grêlons. M. E. Solvay a approché de la vérité en supposant un abaissement brusque d'un courant d'air froid venant des hautes régions et pénétrant dans les couches inférieures chaudes et humides. Mais il n'a pas donné la cause de cet abaissement, dont la théorie suivante fait connaître l'origine.

**1770. Théorie de M. Faye.** — M. Faye a fait faire un grand pas à la question, si même il ne l'a pas complètement résolue, en rattachant la formation de la grêle aux mouvements tournants descendant de la région des cirrus, qui donnent naissance aux orages et entretiennent leur énergie. De l'air très-froid et chargé des parcelles glacées des cirrus, est entraîné par le tourbillon jusqu'à la région des nimbus, et si ce tourbillon pénètre assez bas pour présenter un diamètre relativement restreint, dans lequel le mouvement giratoire soit rapide (1756), les parcelles de glace très-froides s'agglomèrent en petites balles opaques qui forment le noyau des grêlons, et qui, entraînées dans le tourbillon, se soutiennent pendant assez de temps pour s'accroître en condensant les gouttes d'eau ou les fines gouttelettes qu'ils rencontrent. La glace ajoutée forme des couches transparentes ou opaques, suivant la température très-variable d'un point à l'autre du tourbillon; comme il résulte des expériences de M. R. Pictet, qui a montré que la glace présente une structure différente suivant la température à laquelle elle s'est formée (II, 1110).

Les grêlons peuvent prendre les formes les plus bizarres en s'annexant par congélation, des gouttes d'eau restées à l'état de surfusion jusqu'à ce qu'elle les aient rencontrées, et en produisant des agglomérations dont la forme dépend de.

la température, ainsi que l'a montré M. L. Dufour dans ses expériences sur des globules d'eau en suspension dans un liquide de même densité (II, 1101). Si la température n'est pas au-dessous de  $-2^{\circ}$ , la goutte d'eau enveloppe la masse de glace; à  $-3$  ou  $-4^{\circ}$ , elle s'étale seulement sur une partie de la surface, en formant un renflement plus ou moins prononcé; enfin, si la température est encore plus basse, la goutte se congèle, en formant un globule soudé au grêlon qu'elle a rencontré.

Le bruit qui précède l'averse de grêle est généralement attribué au choc des grêlons entre eux; cependant M. Faye l'explique par le sifflement qu'ils produisent dans leur mouvement rapide à travers l'air. M. Lecoq a, en effet, distingué ce sifflement de très-près, dans les circonstances que nous rapportons plus loin.

Dans cette théorie, l'électricité ne joue pas de rôle essentiel; sa présence constitue un phénomène concomitant, les cirrus qui apportent le froid étant chargés de l'électricité des hautes régions. Du reste, cette électricité est bientôt équilibrée dans la partie inférieure et relativement étroite du tourbillon, on voit de nombreux et courts éclairs, et les éclats de l'orage cessent presque aussitôt qu'il a commencé à verser des grêlons mêlés de gouttes d'eau, qui transportent l'électricité dans le sol. Cependant cette électricité semble concourir jusqu'à un certain point à la suspension des grêlons; car on a remarqué que leur chute suivait souvent un fort coup de tonnerre, de même que dans les orages sans grêle, il y a une recrudescence de grosses gouttes de pluie après une forte décharge.

**Observations à l'appui.** — Nous avons déjà vu comment on a constaté *de visu* la communication entre la région des cirrus et celle des nuages orageux (1758). Quant aux mouvements giratoires qui soutiennent les grêlons dans les nuages, ils ont été observés maintes fois. Tessier avait signalé, dans l'orage du 13 juillet 1788, deux bandes ravagées par la grêle, qui, d'après la théorie nouvelle, devaient être parcourues par deux tourbillons indépendants. C'est aussi sur ces deux bandes qu'on a observé les effets les plus désastreux, clochers renversés, fermes détruites, arbres arrachés par milliers sous l'effort de violentes raffales. Teissier remarque avec étonnement que le vent passait, dans un temps très-court, par toutes les directions, ce qui résulte simplement du mouvement giratoire de l'air. Lecoq a pu observer de près ce mouvement giratoire, en juillet 1835, sur le Puy-de-Dôme. Il vit d'abord, vers midi, des nuages poussés par le vent du sud et paraissant se détacher du mont Dore, passer au-dessous de lui. Vers une heure, ils se réunissaient par petits groupes formant de gros nuages noirs, que le vent ne déplaçait qu'avec peine. Le dessous de ces nuages *s'allongeait en une énorme protubérance*, dont il s'échappait des torrents de pluie, inondant des espaces restreints. Cependant, le vent d'ouest ayant accumulé un rideau de nuages au-dessus des nuages venant du sud, ces derniers formèrent de grandes masses séparées, entre lesquelles jaillissaient des éclairs; mais aucune ne partait entre les deux couches de nuages. Lecoq vit alors la grêle tomber des nuages *inférieurs*, en face de lui, à 50<sup>m</sup> du sommet du Puy-de-Dôme. Les

grêlons s'échappaient *par dessous et par dessus, dans toutes les directions*, comme obéissant à une répulsion. Le nuage qui les lançait avait ses bords dentelés et animés d'un mouvement tourbillonnant particulier, qui paraissait n'appartenir qu'au bord antérieur. Cette agitation s'arrêta au bout de 5 à 6 minutes, et la grêle cessa de tomber. — Vers les 3 heures, le même observateur fut enveloppé, sur le *Puy-des-Goules*, par un nuage à grêle dans lequel il resta pendant 5 minutes. Les grêlons, à couches concentriques et gros comme des noisettes, étaient animés d'une grande vitesse horizontale en tournant rapidement sur eux-mêmes, et ne tombèrent qu'à deux kilomètres plus loin <sup>1</sup>.

Dans ces observations, on voit facilement les effets du mouvement giratoire. Ce mouvement continue, du reste, quand les grêlons ont quitté le nuage, car on reconnaît qu'ils sont lancés dans toutes les directions. Ainsi, M. Boisgiraud, dans l'orage du 8 juillet 1834 (1767) a constaté que les vitres avaient été brisées sur des façades orientées de toute manière. M. N. Severtzow, en Asie, dans le Thian-Schan occidental, a fait une remarque analogue, et a reconnu que le vent tourbillonnait. Le P. M. Sanna Solaro a vu, à Barri, les grêlons tomber dans la mer dans les directions obliques les plus variées, en faisant rejallir l'eau à plus d'un mètre de hauteur. M. Buchwalder a vu entre Vérone et Padoue une grêle, précédée d'un vent violent en tourbillon, briser les vitres sur les quatre façades du bâtiment où il s'était réfugié.

Tous ces faits viennent confirmer la théorie de M. Faye. De nouvelles observations, dont les occasions ne se présenteront probablement que trop souvent, permettront de la contrôler et conduiront sans doute à expliquer quelques détails qui n'ont pu l'être dans une théorie générale.

**1771. Des paragrêles.** — On a cherché à préserver les champs des ravages de la grêle, au moyen de perches armées de pointes de fer communiquant avec le sol, et nommées *paragrêles*. Ces appareils ont eu pendant quelque temps une grande vogue, et toute la côte du lac de Genève, dans le canton de Vand, en était garnie; mais on ne tarda pas à reconnaître leur inefficacité, qui résulte, du reste, de la théorie précédente. Il peut même se faire, comme il paraît qu'on l'a observé, que le nuage arrivant sur un pays garni de paragrêles, y verse une grande quantité de grêlons, qui seraient tombés plus loin, si les pointes n'avaient pas déchargé le nuage.

### III. Des trombes.

**1772.** D'après ce qui précède, on voit que la grêle, les orages, les tornados et les cyclones ne sont que des aspects différents d'un même phénomène ayant son origine dans un tourbillon descendant, engendré dans les courants supérieurs de l'atmosphère. Les *trombes* vont nous montrer un nouveau cas du même

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXI, p. 211.



phénomène, dans des conditions où il est facile d'en embrasser toute l'étendue d'un seul coup d'œil.

Une trombe consiste en une colonne nébuleuse, plus ou moins courbe, descendant, d'une nuée où elle est très-évasée, à la surface de la terre ; cette colonne se déplace et est animée d'un mouvement giratoire rapide. L'air tourbillonne souvent tout autour jusqu'à une certaine distance, et au-delà règne un calme complet. La couleur est d'un gris sombre, comme celle des nuages, ou noire comme la fumée de la houille. Le diamètre inférieur varie, de moins de 1 mètre, à plusieurs mètres. Le phénomène dure peu, il ne paraît pas qu'on l'ait vu

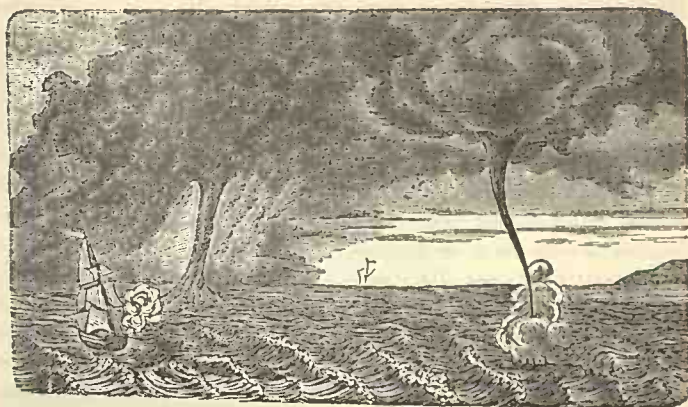


Fig. 1227.

persister une heure entière. On distingue les trombes formées sur les eaux, et les trombes de terre.

**Trombes de mer.** — Ces trombes se montrent généralement pendant les grandes chaleurs. On voit d'abord se former sous la base sensiblement plane d'un nuage orageux, une protubérance, qui s'allonge plus ou moins rapidement en s'inclinant et flottant sous l'action du vent. Au-dessous, les eaux de la mer semblent bouillonner et sont soulevées en formant une espèce de brouillard semblable à celui qui sort d'une chaudière à vapeur. Souvent le cône supérieur remonte, et la trombe ne s'établit pas. D'autres fois, le cône descendant arrive jusqu'au brouillard inférieur et la trombe est constituée. On entend alors un grand bruit comparable à celui d'une cascade. On voit dans la figure 1227, deux trombes de mer qui viennent de se former. Un navire envahi par le tourbillon peut être entraîné et submergé. Les marins cherchent à conjurer le danger, en lançant des boulets de canon à travers la colonne pour la rompre. Napier crut avoir ainsi coupé une trombe en deux, et vit les deux parties, ballottées par le vent, tendre l'une vers l'autre et finir par se réunir. Quand une trombe est près de disparaître, on voit à sa partie inférieure,

au-dessus du bouillonnement des eaux, un tube délié et transparent, remarqué d'abord par Al. Stewart, et dans lequel l'eau, par une illusion expliquée par M. Faye, semble monter comme la fumée dans une cheminée. M. Leps compare la trombe, en ce moment, à un long entonnoir d'où s'échapperait une veine liquide représentée par la partie transparente, et faisant jaillir l'eau de la mer. Ordinairement, le nuage donne aussitôt une pluie torrentielle d'eau douce.

On a vu plusieurs trombes sortir d'un même nuage; ainsi, le capitaine Bechey en a observé une présentant trois cônes qui semblaient partir d'un même pavillon; elles se réunirent bientôt pour se séparer de nouveau. Lamareck cite une trombe observée le 31 juillet 1808, entre deux groupes de nuages.

Les trombes sont propres aux mers orageuses; elles sont assez fréquentes dans les régions calmes des tropiques, et rares dans les pays froids.

**1773. Trombes terrestres.** — Les trombes terrestres, moins fréquentes que les autres, peuvent produire des dévastations effrayantes. Elles sont précédées d'une chaleur étouffante, et d'un calme complet. Le baromètre baisse ordinairement très-rapidement; par exemple, on l'a vu descendre de 16<sup>mm</sup>,34, à Rouen, une heure avant la trombe de Monville et Malaunay, à 15 kilomètres de cette ville. Pour donner une idée de la formation et des effets des trombes terrestres, nous citerons deux des plus désastreuses, celles de Chatenay et de Monville, qui ont été l'objet d'enquêtes scientifiques<sup>1</sup>. Voici d'abord, d'après Peltier et M. Bouchard, l'histoire de la trombe de Chatenay.

Le 18 juin 1839, un orage venant du sud s'était dirigé entre les collines d'Ecouen et le monticule de Chatenay, au-dessus duquel les nuages parurent s'arrêter. Vers midi, un second orage, venant aussi du sud, s'approcha rapidement, puis s'arrêta en présence du premier, qui le dominait et semblait le repousser. Tout à coup un des nuages du second orage s'abaissa vers le sol et se mit en communication avec lui; aussitôt le tonnerre cessa, et il s'éleva un effroyable tourbillon de poussière et de corps légers, accompagné d'un bruit confus très-intense. Des habitants virent alors le météore sous la forme d'un cône renversé, de couleur grise, dont la pointe, à quelques mètres du sol, était terminée par une calotté de feu d'un rouge vif. La trombe se mit en marche dans la direction du nord-est, en brisant et déracinant les arbres, dont le tronc fut clivé, et desséché du côté atteint, enleva le toit de deux fermes, ravagea le parc dont les murs furent renversés, et se dirigea vers le château, dont elle emporta les cheminées et les toits. Presque tous les pigeons du colombier de la ferme furent tués. L'aspect du météore était tel qu'on vit des lapins du parc chercher un abri près de la maison, à côté des chiens tout aussi effrayés qu'eux. La trombe traversa ensuite un étang, dont les poissons furent tués, et où elle perdit presque toute sa force. A 100 mètres de là, elle se partagea; la partie supérieure s'éleva en nuage, et l'autre tomba et disparut sur le sol, qui avait été ravagé sur une longueur de 4<sup>kil</sup> et sur une largeur d'environ 150<sup>m</sup>. Des arbres

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. IX, p. 134, et t. XXI, p. 545.

de 1<sup>m</sup> de tour furent arrachés et transportés à plus de 100<sup>m</sup>; des chevrons, des tuiles et divers débris, furent trouvés à plus de 500<sup>m</sup>. On remarqua des boules de feu, des lucurs diverses. Dans une cheminée du château, on vit des étincelles monter et descendre; des rideaux furent déchirés et roussis. Des objets de lingerie laissés dans une chambre bien close furent trouvés au loin dans la campagne; ils n'avaient pu sortir que par la cheminée.

La trombe de Monville et Malaunay produisit des effets encore plus désastreux. Le 19 août 1845, il régnait aux environs de Rouen un vent violent du sud qui rencontra, dans l'après-midi, un vent du sud-ouest chassant des nuages très-noirs, et forma un violent tourbillon, animé d'un mouvement de translation, qui tordit et arracha 180 gros arbres, et renversa une sécherie dépendant d'une fabrique d'indiennes. Au même moment, il tomba une forte averse accompagnée de grêle et de tonnerre. Il n'y avait pas encore de trombe proprement dite. Après s'être éloigné et avoir parcouru 4<sup>kil</sup>, ce tourbillon revint tout à coup dans la vallée, près de Malaunay et Monville, en traversant un bois, dont les arbres furent brisés près du sol. C'est alors qu'il se forma un énorme cône à contours arrêtés, noir comme la fumée du charbon de terre et dont le sommet inférieur était d'un jaune rouge. Des éclairs s'échappaient du cône, et l'on entendait un fort roulement. En quelques secondes, la trombe se porta successivement, avec une rapidité effrayante et en zig-zag, sur trois filatures considérables qu'elle écrasa avec tous leurs ouvriers! Les toits furent soulevés, et il ne resta pas pierre sur pierre. Les métiers étaient brisés, tordus; les fortes pièces rompues, principalement dans les endroits où il y avait de grosses masses de métal. Les arbres, dans les environs, étaient renversés en tous sens, clivés et desséchés sur une longueur de 2 à 7<sup>m</sup>. En déblayant, pour tâcher de sauver les malheureux ensevelis sous les ruines, on trouva des planches carbonisées, du coton brûlé ou roussi, beaucoup de pièces de fer ou d'acier aimantées. Des cadavres présentaient des traces de brûlures; d'autres n'avaient pas de lésions apparentes, comme s'ils avaient été frappés de la foudre. Des ouvriers, qui furent lancés dans les prairies, aperçurent de vives lucurs. Des hauteurs voisines, on vit les usines enveloppées par la trombe, couvertes de flammes et de fumée, et l'on crut à un incendie. La largeur de la bande ravagée était de 200<sup>m</sup> sur le plateau de Malaunay, à 2<sup>kil</sup> du point où les dégâts avaient commencé; de 307<sup>m</sup> au milieu; et de 60<sup>m</sup> près de Clères, où la trombe disparut. L'espace parcouru était de 15<sup>kil</sup> à vol d'oiseau.

Un fait très-remarquable, c'est que des débris de toutes sortes, ardoises, vitres, planches, chevrons, tombèrent près de Dieppe, à une distance de 25 à 38<sup>kil</sup> du lieu de la catastrophe! Ces divers objets furent aperçus dans les airs par plusieurs personnes, qui les prirent pour des feuilles d'arbres, tant ils étaient élevés. Parmi ces débris, on cite une planche de 1<sup>m</sup>,4 de longueur, de 12<sup>cm</sup> de largeur et de 1<sup>cm</sup> d'épaisseur.

Citons encore la trombe du 19 septembre 1874, aux environs de Châlons. Ce météore, d'une violence extrême, brisa plus de 2000 arbres forestiers, qui furent

couchés dans toutes les directions et entassés en plusieurs endroits en pyramides; des maisons furent démolies et une poutre en chêne de 10<sup>m</sup> de long, transportée à 50<sup>m</sup>.

On voit que les effets mécaniques produits par les trombes sont très-intenses, et que leur violence s'exerce dans tous les sens. Les arbres arrachés sont souvent déplacés contre la direction moyenne du vent. Plusieurs fois, des hommes ont été saisis et transportés à travers les airs. Le 26 août 1826, aux environs de Carcassonne, une trombe enleva 14 moutons, et les déposa à une grande distance.

Les globes de feu, les éclairs, signalés par la plupart des observateurs, la carbonisation du bois, la fusion de métaux; les vitres percées sans être étoilées, l'état des cadavres ne présentant pas de lésion extérieure, leur rapide décomposition....., tout prouve la présence de l'électricité en grande quantité. A Monville, la trombe s'est portée de préférence sur les usines, remplies de machines et de masses métalliques, en contournant, comme pour les éviter, les maisons d'habitation, excepté une dont le grenier était rempli de ferrailles, et qu'elle renversa en y produisant un commencement d'incendie. Nous verrons que cette électricité n'est qu'un accident dans le phénomène et qu'elle ne joue pas de rôle essentiel dans sa formation.

**1774. Explication des trombes.** — Franklin, Muschenbroeck, Monge..., considéraient les trombes comme des tourbillons d'air, engendrés par la rencontre de deux vents opposés. Mais souvent elles naissent et disparaissent au milieu du plus grand calme. M. Espy regardait les trombes de mer comme de très-petits tornados; idée heureuse mais qui avait besoin d'être complétée. Brisson, qui paraît avoir le premier attribué les trombes à l'électricité, les regarde comme produites par une communication électrique entre les nuages orageux et la terre. Peltier, après avoir comparé les récits de 116 trombes de terre ou de mer, a repris cette explication, dans son traité des trombes. Il suppose que ces météores sont formés par l'attraction du sol, induit par un nuage épais fortement électrisé. La partie inférieure de ce nuage s'allonge en colonne, et se met ainsi en communication avec le sol. L'électricité du nuage s'écoule alors, en produisant des effets d'autant plus intenses qu'elle trouve plus de résistance. Sur mer, les eaux sont attirées et comme aspirées, dans le nuage, suivant le préjugé des marins, préjugé tellement enraciné, que pour expliquer la pluie d'eau douce, qui tombe ensuite, ils n'hésitent pas à attribuer à la trombe la propriété de dessaler l'eau de mer. — Cette explication des trombes ne rend pas compte d'une foule de circonstances du phénomène; par exemple, du mouvement giratoire qui anime les trombes, et de leur déplacement au milieu du calme environnant.

**Théorie giratoire.** — Nous avons vu comment les tourbillons descendants prennent naissance dans les courants supérieurs de l'atmosphère et apportent dans la région des cumulus l'électricité qui charge les nuages orageux et le froid qui congèle les grêlons (1756). Le plus souvent la force vive de rotation s'épuise en faisant tourbillonner les glaçons et les gouttes d'eau condensées, et le mouvement ne dépasse pas la région des nuages. Mais si le tourbillon est étroit, et s'il ne

rencontre pas assez d'eau à mouvoir pour user sa force vive, il perce jusqu'au sol et constitue une trombe, qui n'est ainsi qu'un petit tornados contenant toute l'électricité que l'air descendant a empruntée aux couches supérieures de l'atmosphère. Dès que la colonne communique avec la terre, cette électricité s'écoule avec violence, à travers un conducteur imparfait, en produisant des décharges et divers effets intenses. On voit que l'électricité n'est qu'un accident, et non la cause du phénomène.

*Sur mer*, dès que la trombe s'est mise en communication avec l'eau, celle-ci est violemment agitée, et semble en ébullition, comme si un souffle violent la frappait de haut en bas en tournoyant; l'eau est lancée et soulevée à l'extérieur de la colonne en gouttelettes formant un épais brouillard (*fig. 1227*). En même temps, le météore marche au milieu du calme environnant, en suivant une route courbe et irrégulière; et son extrémité inférieure reste inclinée en arrière, ce qui prouve que le mouvement est imprimé par le haut.

On conçoit que la colonne puisse être d'abord invisible dans sa partie moyenne, où il peut n'y avoir pas de précipitation de vapeurs; on aperçoit alors deux cônes opposés qui tendent l'un vers l'autre, et si celui du bas attire seul l'attention avant qu'ils ne se réunissent, on croira que la trombe s'est formée de bas en haut; de là la supposition des *trombes ascendantes*. C'est aussi cette transparence de la partie moyenne, qui se montre souvent quand la trombe est près de finir, qui a fait croire qu'on avait pu la couper au moyen d'un boulet de canon (1772).

*Sur terre*, le mouvement giratoire, dont la rapidité augmente à mesure que le diamètre diminue (1756), vient s'épuiser sur le sol que l'air en mouvement travaille avec fureur, renversant les édifices, tordant et arrachant les arbres, pendant que l'électricité se manifeste par des effets plus ou moins intenses. L'air s'échappe ensuite dans toutes les directions, après avoir été se heurter de haut en bas sur la terre, en soulevant la poussière et toutes sortes de débris. Si la colonne rencontre une mare, elle en disperse les eaux dans tous les sens.

Quand la trombe finit, le tourbillon quitte le sol, remonte vers le nuage, et c'est alors qu'il peut enlever des débris, pour les laisser tomber plus loin, là où il s'est transporté.

Si la trombe est faible et transparente, la calotte de feu qui la termine quelquefois pourra être seule visible, et c'est par là qu'on a essayé d'expliquer les *globes fulminants* (1745), explication qui ne manque pas de vraisemblance.

**1775. Pluies de crapauds, etc.** — Ces phénomènes regardés longtemps comme apocryphes, paraissent bien prouvés aujourd'hui. Peltier a vu tomber à Ham, une pluie de crapauds; le sol en était couvert, et il en reçut sur son chapeau et sur ses mains. D'autres observateurs ont été témoins de faits analogues, et ont vu tomber sur leurs habits de petites grenouilles ou des crapauds dont quelques-uns étaient encore à l'état de têtard. On a observé aussi des pluies de poissons. M. Vital Masson, curé d'une commune de la Loire-Inférieure, vit tomber, en 1820, pendant une pluie d'orage, une infinité de petits poissons

de 2<sup>m</sup> de longueur. La même année, on trouva, près de Nantes, la campagne couverte, sur une étendue de 400 pas, de poissons ayant près de 3<sup>m</sup>. M. de Castelnau, à Singapore, après une pluie tellement épaisse qu'on ne distinguait pas à 3 pas, vit le sol couvert de poissons de 25 à 30<sup>m</sup> de long, appartenant à une espèce (*clarias batrachus*) abondante dans les eaux douces des îles asiatiques. Ces poissons peuvent cheminer quelque temps hors de l'eau, mais l'île de Singapore en renferme trop peu pour expliquer l'immense quantité observée, et l'on en a trouvé un grand nombre dans une cour complètement fermée. — En Écosse, on a constaté une pluie de harengs, et dans l'Amérique méridionale, une pluie de sangsues. On a vu enfin des pluies de paille, des pluies de sable.

On a tenté d'expliquer ces phénomènes singuliers par des bourrasques enlevant et transportant au loin ces divers objets. Mais ils s'expliquent bien plus naturellement en supposant qu'une trombe les a emportés dans son tourbillon, au moment où elle s'est séparée du sol, et les a laissés tomber plus loin. Ce que nous avons dit d'une pluie de débris divers, qui tomba à 25 kilomètres des usines où la trombe de Monville avait exercé ses ravages, vient à l'appui de cette explication. Nous ajouterons les faits suivants : le 8 juillet 1833, une trombe se forma sur mer, à la pointe du Pausilippe, près de Naples, et fit irruption sur le rivage, où des oranges contenues dans deux grandes corbeilles disparurent subitement, et allèrent tomber peu après, sur une terrasse assez éloignée<sup>1</sup>. Mauduit observa, le 13 septembre 1835, dans le pays de Caux, une trombe qui enleva toute l'eau d'une mare avec ses poissons ; or ces animaux ont dû retomber et former quelque part une pluie de poissons.

### § 3. — DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE. — AURORES POLAIRES

#### I. Appareils et méthodes d'observation.

**1776.** Lorsque, vers le milieu du dix-huitième siècle, on étudiait l'électricité des nuages orageux, au moyen de barres isolées (1729), on ne tarda pas à remarquer que ces barres étaient électrisées en l'absence de tout nuage. Ce fait important a été découvert par Lemonnier, qui tira des étincelles ; par un ciel serein, d'une longue tige de fer isolée et munie d'une pointe, qu'il avait dressée dans un jardin à Saint-Germain-en-Laye. Il reconnut ainsi que l'air est souvent électrisé ; que la quantité d'électricité est soumise chaque jour à des variations régulières quand le ciel est pur ; mais qu'il n'y en a aucun signe par les grands vents, par un ciel couvert de nuages épais marchant lentement, ni enfin par les temps humides et sans pluie.

**1777. Instruments d'observation.** — Pour étudier l'électricité de l'atmosphère, on emploie, tantôt des appareils fixes, comme la barre de Lemonnier,

<sup>1</sup> Garnier. *Traité de météorologie* (Paris), p. 306.

tantôt des appareils portatifs. On y distingue le *collecteur* qui va prendre l'électricité de l'air, et l'*électromètre* qui la reçoit et en évalue la quantité.

Les mâts sont difficiles à isoler. Read est un de ceux qui ont le mieux réussi dans leur construction; une pointe de fer était plantée au haut d'un mât de sapin appuyé sur un cylindre de verre enduit de gomme laque et placé dans une chambre élevée. Le mât traversait le toit sans le toucher. Des fils de cuivre, partant de la pointe, descendaient le long du mât, et aboutissaient à une boule isolée, dont on interrogeait l'état électrique. L'appareil était muni d'un carillon de sûreté (1729).

De Saussure employait un électromètre à pailles (*fig. 1228*) garanti de la pluie par un chapeau *c*, et surmonté d'une longue pointe composée de plusieurs parties pouvant se visser en *a, a*, pour que l'instrument fût plus portatif. Sur deux faces opposées de la cloche, étaient tracés des arcs divisés; une table de graduation, construite par la méthode de Saussure (1599), permettait de déduire les charges électriques, des angles d'écart.

Volta a aussi imaginé de mettre à l'extrémité de la tige *ca*, un corps enflammé donnant une colonne de fumée qui va recueillir l'électricité de l'air. Quand il faisait du vent ou de la pluie, il allumait une mèche de coton soufrée, placée dans une hélice en fil de fer. Comme nous le verrons, la combustion est une source d'électricité; mais Volta a prouvé qu'ici elle n'occasionne pas d'erreur. Quand la tension de l'air était très-faible, il employait l'électromètre à condensateur (1672), dont le plateau inférieur était mis en relation avec l'atmosphère, et le plateau supérieur avec le sol.

On procède encore en lançant à travers l'air une balle métallique qui prend l'électricité de tous les points qu'elle parcourt (*fig. 1229*). Cette balle est attachée par un fil conducteur, à un anneau *a*, qui glisse le long de la tige *b* et se sépare de l'appareil quand la balle est lancée avec assez de force.

Fig. 1229. — 1/6.

Becquerel et Breschet, dans leurs observations au grand Saint-Bernard, ont remplacé la boule par une flèche qu'ils lançaient au moyen d'un arc. Le cordon, de 80 mètres de long, était d'abord replié en zig-zag sur une feuille de taffetas isolant étendue par terre. Dans ces expériences, la tige *l* ne doit pas être terminée en pointe, afin que l'appareil conserve son électricité, et qu'on puisse en reconnaître la nature.

**1778. Électromètre de Peltier.** — B (*fig. 1230*) est un globe creux en cuivre, porté par une tige munie d'un chapeau *c* et entrant dans une cage de

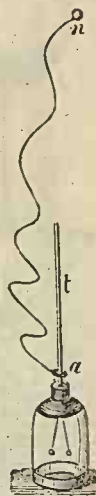


Fig. 1228.

verre, dont elle est isolée par un bourrelet de gomme laque *b*. Un anneau vertical *aa*, maintenu par de la gomme laque contenue dans un cylindre de verre fixé au pied de l'instrument, soutient une pointe verticale sur laquelle pivote une aiguille courbe de cuivre, *oo*, dont la chape porte une petite aiguille aimantée *e*. Une tige de cuivre *A* est fixée horizontalement au-dessous de l'anneau *aa*. Pour se servir de cet électromètre, on commence par le placer de manière que l'aiguille *oo*, dirigée par l'aiguille aimantée *e*, soit dans le même plan vertical que la tige *A*. Si alors l'anneau *aa* reçoit de l'électricité, il la communique à la tige *A*, et à l'aiguille *oo*, qui s'en écarte aussitôt. L'angle d'écart est donné par deux divisions, l'une tracée autour de la cage cylindrique, et l'autre sur le couvercle; et la charge électrique, par une table construite au moyen d'un second appareil identique, en suivant la méthode de Saussure (1599). Pour transporter l'instrument, on fait tourner la boule *b*; alors, une petite pièce que l'on voit au haut de l'anneau *aa*, sur le prolongement de la tige centrale, descend et maintient l'aiguille *oo*.

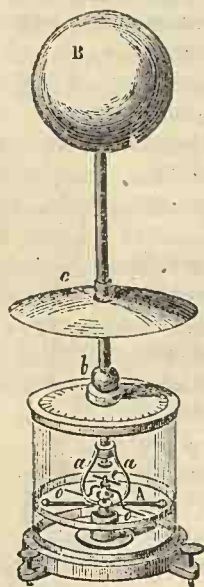


Fig. 1230. —  $\frac{1}{2}$ .

Au lieu de la boule *B*, on peut visser au sommet de la tige, une pointe ou une houppe de fils de platine; alors l'appareil s'électrise par influence, et reste chargé d'électricité de même nom que celle de l'atmosphère. Quand il porte la boule *B*, cette boule reçoit l'électricité opposée à celle de l'air, et les aiguilles, l'électricité de même nom; en touchant la boule *b*, on chasse cette dernière dans le sol, et l'appareil conserve le fluide contraire à celui de l'air.

**Balance de Dellmann.** — Cet appareil, qui peut servir d'électromètre ordinaire, tient à la fois de l'instrument précédent et de la balance de Coulomb (1618). L'électricité à évaluer est amenée par le bas, à une tige horizontale fixe *isolée*, sur laquelle s'appuie d'abord une aiguille d'aluminium suspendue par un fil de verre, dont l'élasticité est très-régulière. Ce fil s'enroule sur un petit treuil que porte un plateau divisé qui surmonte un tube central fixé au couvercle de l'instrument. Après avoir chargé la tige fixe, on soulève un peu l'aiguille, qui est aussitôt déviée; on la ramène à un écart constant, dans toutes les expériences, en tournant le plateau supérieur, et la force répulsive, égale à la force de torsion, est proportionnelle au carré de la charge totale, ou du potentiel fourni à la tige. Le potentiel est donc proportionnel à la racine carrée de l'angle total de torsion.

**1779. Électromètres de M. W. Thomson.** — Ces instruments très-commodes dans les voyages, portent avec eux une certaine charge constante d'électricité, à laquelle on compare celle de la couche d'air que l'on veut étudier. La figure 1231 représente le premier de ces instruments; il se compose d'une



petite jarre en verre spécial (1677), dont l'armature intérieure est formée par la plaque G et par son support, et l'armature extérieure par une garniture métallique ne dépassant pas le niveau G. La plaque G est percée d'une ouverture  $p$ , dans laquelle passe sans frottement une lame d'aluminium fixée à l'extrémité d'un levier de même matière. L'axe d'appui de ce levier est formé d'un fil de platine tendu horizontalement tout près de la lame d'aluminium; et la loupe  $l$  sert à suivre les déplacements de son extrémité. Un disque A, qui reçoit l'électricité du collecteur par le fil  $\varepsilon\gamma$ , peut être approché plus ou moins du plateau G au moyen d'une vis micrométrique C.

On commence par charger la plaque G négativement en enlevant le bouchon F, et introduisant une tige pointue, isolée des bords de l'ouverture par un tube de verre, et dont on approche une lame d'ébonite. L'air intérieur étant desséché par un anneau de pierre ponce P, sur lequel on a laissé tomber quelques gouttes d'acide sulfurique concentré, la charge ne diminue que de  $\frac{1}{20}$  en une huitaine de jours. Pour opérer, on tient l'appareil de la main gauche, la loupe  $l$  à la hauteur de l'œil, on abaisse le chapeau D, ce qui fait communiquer le collecteur avec le sol, et l'on fait tourner la vis C de manière que

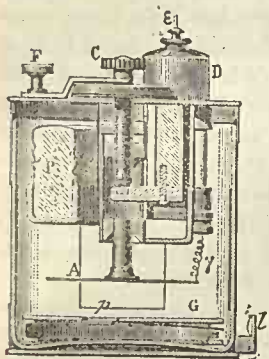


Fig. 1231.

le disque A amène la lame d'aluminium  $p$  dans le plan de la plaque G; la queue du levier coïncide alors avec un repère fixe. On relève ensuite le chapeau D, le disque A reçoit l'électricité du collecteur, la lame  $p$  se déplace, et en agissant sur la vis C, on fait en sorte qu'elle reprenne sa position première. La variation de distance entre les surfaces A et G mesure alors la différence des potentiels du collecteur et de la plaque G.

Le second électromètre, que M. Thomson nomme *hétérostatic*, consiste en deux bouteilles de Leyde,  $b, B$  (fig. 1232) renfermées dans une cage de verre  $v$ , et réunies par un fil de platine tendu  $c$ . Ce fil porte une aiguille d'aluminium  $e$  qui se meut sur un cercle divisé  $mn$ , et vient toucher deux languettes dépendant de l'armature intérieure de B. Il y a alors répulsion, l'aiguille s'écarte, et l'on peut, en faisant tourner la bouteille  $b$  sur elle-même, donner à cette aiguille la position que l'on veut. L'électricité d'un collecteur à mèche  $m$ , fixé au-dessus de l'appareil par une colonne isolante C, est amenée par un fil de métal  $f$  dans un conducteur



Fig. 1232.

isolé, non représenté dans la figure, et placé près de l'aiguille, qui éprouve alors un déplacement angulaire. Pour faire une observation, on fait communiquer le fil *f* avec le sol, et l'on donne à l'aiguille une position déterminée. On supprime ensuite la communication, le conducteur isolé reçoit l'électricité du collecteur, et l'aiguille se déplace. On la ramène à sa position première, et l'on compare les deux angles de torsion successifs du fil *c*.

**1779. Rhéomètre.** — Colladon a le premier appliqué le *rhéomètre multiplicateur* (II, 840) à l'étude de l'électricité atmosphérique. L'un des bouts du fil qui entoure l'aiguille aimantée communique avec une longue pointe isolée, et l'autre bout, avec le sol. Pour que les tours du fil de cuivre du rhéomètre soient bien isolés les uns des autres, on trempe la soie qui les recouvre, dans une dissolution concentrée de gomme laque dans l'alcool. — Quételet a installé, à l'Observatoire de Bruxelles, un appareil de ce genre, dont le fil, qui fait 2400 tours autour de l'aiguille, communique avec une longue tige de fer terminée par une houppe de fils de platine très-fins. Quand l'électricité parcourt le fil de l'appareil, l'aiguille aimantée est déviée, et le sens de la déviation fait connaître la nature de l'électricité qui passe. — Cet instrument est bien moins sensible que les électromètres à pendules. Peltier a fait voir, par un moyen que nous ne pouvons décrire ici <sup>1</sup>, qu'il faut, pour faire dévier de 1° l'aiguille d'un rhéomètre très-sensible, plusieurs milliers de fois la quantité d'électricité statique qui suffirait pour produire la même déviation dans son électromètre (*fig.* 1230). Aussi, les rhéomètres restent-ils souvent stationnaires, pendant que les autres instruments signalent la présence dans l'air de quantités notables d'électricité.

On emploie encore des cerfs-volants à pointe, ou des ballons captifs. Dans les observatoires, on a toujours plusieurs appareils, de sensibilité différente.

**1781. Appareils des observatoires.** — Dans les observatoires, on fait communiquer l'électromètre qu'on a adopté, avec différentes sortes de collecteurs.

1° On emploie une longue tige terminée par des pointes, et qui prend par influence un potentiel égal à celui de la couche d'air où pénètrent ces pointes.

La figure 1233 représente la disposition des appareils établis par M. Palmieri, à l'Observatoire du Vésuve <sup>2</sup>. Le conducteur à pointe AB traverse le toit de la chambre, qui se trouve à la partie la plus élevée de l'édifice, et peut glisser dans un tube de verre *v*, parfaitement isolé. On peut le soulever au moyen d'un cordon de soie *c, c, c* qui passe sur une poulie de verre A, portée par un cylindre isolant, et le conducteur peut être mis en communication avec un électroscope à pile sèche *o*, que nous décrirons plus tard, ou avec un rhéomètre *r*, ou enfin avec un électromètre imaginé par M. Palmieri, et construit sur le même principe que celui de Peltier (1778); seulement, l'électricité est communiquée à la tige horizontale fixe, l'aiguille mobile est suspendue par le système bi-filaire au moyen de deux fils de cocon, et la petite aiguille aimantée est supprimée.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXVII, p. 440.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XXVII, p. 105.

On observe les indications de l'électromètre dans deux positions de la tige AB, et l'on a ainsi la différence des potentiels des couches d'air dans lesquelles pénètre successivement la pointe.

2° On fixe à l'extrémité de la tige, un corps en combustion comme le faisait Volta (1777). M. W. Thomson, qui a remis cette méthode en faveur, prend pour mèche un petit rouleau de papier imprégné d'azotate de plomb, qui brûle sans flamme et en s'effilant régulièrement. M. Marié-Davy emploie simplement des mèches de lampe à pétrole imprégnées du même sel. Ces mèches communiquent à la tige deux fois plus d'électricité que les pointes, et rendent sensibles des différences de potentiels que celles-ci ne pourraient indiquer.

M. Birt à Kew a combiné les deux systèmes de collecteurs précédents. trois pointes de platine sont fixées au sommet d'une tige tubulaire le long de laquelle peut glisser une petite lampe que l'on fait mouvoir au moyen d'un cordon passant sur une poulie placée tout en haut. On allume cette lampe et on la hisse quand on veut s'en servir. La tige est isolée par un tube de verre chauffé par une petite lampe pour le maintenir sec.

3° M. W. Thomson emploie aussi, pour les observations régulières, un vase isolé communiquant avec l'électromètre, et contenant de l'eau qui sort lentement par un tube métallique. Ce vase prend bientôt un potentiel égal à celui de l'air autour de l'orifice quand l'eau sort goutte à goutte, ou de l'air au niveau où la veine se divise en gouttes, si elle sort d'une manière continue. M. W. Thomson pense que cette méthode est la meilleure.

**1782. Appareils enregistreurs.** — Pour suivre d'une manière continue les variations de l'électricité atmosphérique, on enregistre les indications des électromètres au moyen de la photographie. On a d'abord enregistré l'image des extrémités des pailles d'un électromètre à cloche, par le procédé de M. Ronals, (II, 1362), sur un papier sensible appliqué sur un cylindre tournant horizontal.

La figure 1234 représente un appareil enregistreur construit par M. Salleron pour l'Observatoire de Montsouris. Le potentiel de l'air est mesuré à la fois par deux électromètres de Branly (1678)  $Am'$ ,  $Bm$ , de sensibilité différente, le moins sensible servant à enregistrer les fortes charges avec un faible déplacement angulaire de son aiguille. Deux des quatre secteurs qui agissent sur cette aiguille

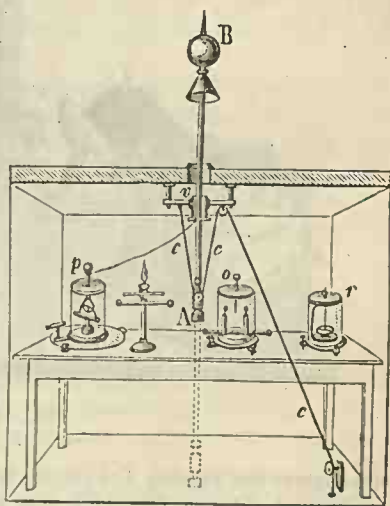


Fig. 1233.

sont chargés à un potentiel connus, et les deux autres communiquent avec le collecteur. Un bec de gaz entouré d'une cheminée opaque F, lance deux pinceaux lumineux qui sont renvoyés par les prismes  $g, g'$ , sur les miroirs suspendus

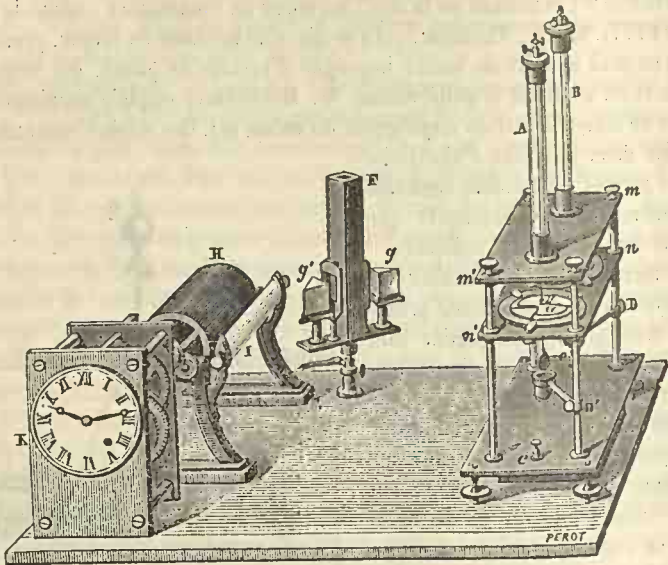


Fig. 1234.

sous chacune des aiguilles. Ces miroirs réfléchissent les pinceaux sur une lentille cylindrique I, à travers laquelle ils sont resserrés en deux foyers, qui dessinent des courbes sur le papier sensible recouvrant le cylindre II que fait tourner un mouvement d'horlogerie K.

## II. Distribution de l'électricité dans l'atmosphère.

**1783.** L'étude de la distribution de l'électricité dans l'atmosphère est encore peu avancée, et il n'y a pas longtemps qu'on s'est bien rendu compte de la portée du problème. Il est évident que les électromètres ne peuvent donner des indications que si l'extrémité du collecteur est plongée dans une couche d'air dont le potentiel diffère de celui de la couche dans laquelle se trouve l'instrument; qui, du reste, ne mesure que la différence des potentiels de ces deux couches. C'est pour obtenir la différence entre les potentiels de plusieurs couches d'air, qu'on fait varier la hauteur à laquelle on porte la tige du collecteur (fig. 1233). — Remarquons aussi que le potentiel en un point de l'air ne représente pas seulement la quantité d'électricité qui s'y trouve, mais l'effet résultant de toutes

les actions inductives exercées sur ce point par l'électricité de l'air et même du sol, agissant d'une distance qui peut être très-grande.

**1784. ÉLECTRICITÉ DE L'ATMOSPHÈRE PAR UN TEMPS SEREIN.** — L'électricité de l'air, quand le ciel est pur, est toujours positive. Il s'ensuit que la surface du sol doit être constituée par influence, à l'état négatif, surtout sur les parties saillantes qu'elle peut présenter. La quantité d'électricité que contient l'air dépend de la hauteur, de l'heure et de la saison. Pour étudier les lois de ce phénomène, il faut que l'électromètre soit placé dans un endroit découvert. Il ne donne aucun signe d'électricité quand il est dominé par des objets rapprochés; par exemple, au fond des vallées étroites, sous les arbres, dans des rues. On trouve un peu d'électricité sur les quais, au milieu des places. Sur les ponts, la quantité est souvent plus forte qu'en rase campagne.

**Variations avec la hauteur.** — Le potentiel électrique augmente à mesure qu'on s'élève. Ce résultat a été constaté par de Saussure, Ermann, Volta, Becquerel, Peltier, etc. Jusqu'à 1 mètre au-dessus du sol, on ne trouve aucun signe d'électricité. A partir de là, Quetelet a trouvé, à Bruxelles, que l'intensité électrique est proportionnelle à la hauteur, résultat trouvé également par M. W. Thomson et par MM. Mascart et Joubert. Mais cette proportionnalité n'a été constatée que pour des élévations assez restreintes. Pour les hauteurs considérables, on ne sait que peu de chose; Peltier a cependant reconnu, avec un cerf-volant, que l'électricité, qui croît lentement jusqu'à 100 mètres, augmente ensuite rapidement jusqu'à la hauteur de 247<sup>m</sup>, la plus grande qu'il ait atteinte. Les observations faites dans les ascensions acrostatiques ont prouvé que l'air des hautes régions (6 à 7 mille mètres) est fortement chargé d'électricité positive, que les cirrus recueillent, pour la transmettre en descendant, aux nuages orageux (1757).

**Couches de niveau.** — On nomme ainsi les couches d'air qui ont partout le même potentiel. Ces couches sont horizontales au-dessus d'une plaine unie; mais, comme l'a vu de Saussure, elles s'infléchissent et se resserrent au-dessus des reliefs, et d'autant plus qu'ils sont plus élevés. Quelques légers cirrus suffisent, du reste, pour troubler, par induction, la régularité du phénomène; ainsi Peltier trouva, un jour, de l'électricité positive jusqu'à 50<sup>m</sup> de hauteur, puis une zone neutre, et ensuite une zone négative de 20<sup>m</sup> d'épaisseur, au-dessus de laquelle reparut l'électricité positive.

L'accroissement de l'électricité avec la hauteur explique les expériences suivantes, qui donnent le moyen de le constater. Biot et Gay-Lussac, lors de leur voyage acrostatique, ayant laissé tomber de la nacelle un fil métallique de 50<sup>m</sup> de long terminé par une boule, trouvèrent le haut de ce fil électrisé *négativement*, quoique le temps fût serein. Biot expliqua ce résultat en remarquant que l'air supérieur à la nacelle, électrisé *positivement* et plus fortement que l'air situé au-dessous agit par influence sur le fil, en attirant vers le haut l'électricité *négative*.

**Expérience d'Hermann.** — Une expérience ancienne, faite par de Saussure,

puis par Hermann, s'explique par les mêmes principes<sup>1</sup>. Un électromètre surmonté d'une boule est mis en communication avec le sol, puis isolé; il ne donne aucun signe d'électricité. Mais si on l'élève de 40 à 50<sup>cm</sup>, les feuilles d'or s'écartent aussitôt par de l'électricité *positive*; si on le ramène au point de départ, les feuilles d'or retombent; si enfin on l'abaisse, les feuilles divergent de nouveau, mais par de l'électricité *negative*, pour retomber encore si l'on ramène de nouveau l'instrument au point de départ. L'électromètre n'a donc reçu aucune électricité de l'air, puisqu'il n'en conserve pas quand il revient au point de départ. En ce point, et quand on l'a fait communiquer avec le sol, il s'est chargé, sous l'influence des couches supérieures de l'atmosphère, d'électricité *negative*, qui est restée dissimulée dans la boule de l'instrument. Quand ensuite on l'a élevé, une nouvelle décomposition de fluide neutre a repoussé dans les feuilles d'or du fluide positif. Quand, au contraire, on l'a abaissé, le fluide *negatif*, moins attiré dans la boule supérieure, s'est répandu en partie dans les feuilles d'or.

On obtient les mêmes effets en élevant ou abaissant une boule métallique isolée, communiquant par un fil métallique avec l'électromètre, qui reste en place. Peltier a reconnu qu'un abaissement produit moins d'effet qu'une élévation égale. De plus, il faut beaucoup plus élever l'instrument, pour obtenir une certaine déviation, par un temps humide que par un temps sec.

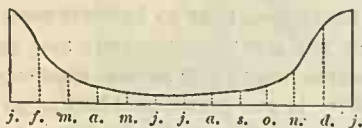


Fig. 1235.

**1785. Variations diurnes.** — Le potentiel de l'électricité de l'air en un même lieu et à la même hauteur, varie pendant la journée, et présente deux maximum et deux minimum, à des heures qui changent suivant les saisons. Cette loi, trouvée par Lemonnier, précisée par les observations de Beccaria, et de Schübler à Tubingue, en 1811 et en 1812, a été confirmée par Arago dans une série d'observations commencées en 1830 à l'Observatoire de Paris, et par Quételet, à Bruxelles, à partir de 1844. Voici les résultats moyens :

Du lever du soleil à 6 ou 7 heures du matin en été, à 10 ou 12<sup>h</sup> en hiver, et à 8 ou 9<sup>h</sup> dans les autres saisons, la tension électrique augmente et atteint son premier maximum. Elle diminue ensuite jusqu'à 3<sup>h</sup> en été, et jusqu'à 1<sup>h</sup> seulement en hiver, et atteint un minimum dans lequel la tension est à peu près la même qu'au lever du soleil. La tension augmente ensuite et atteint, vers 9<sup>h</sup> du soir en été, et 6<sup>h</sup> en hiver, un second maximum supérieur à celui du matin. Enfin, un second minimum se montre pendant la nuit; il a été trouvé, à Greenwich, à 2<sup>h</sup> du matin; Schübler l'avait fixé à 5<sup>h</sup>. — La moyenne diurne coïncide sensiblement avec la tension à 11<sup>h</sup> du matin.

M. Birt a déduit de 1500 observations faites à Kew pendant 5 ans, que les

<sup>1</sup> *Journal de physique de Lamétherie* (1804), t. LIX, p. 99.

deux maximum tombent à 10<sup>h</sup> du matin et à 10<sup>h</sup> du soir, et les deux minimum, à 2<sup>h</sup> du matin et à 4<sup>h</sup> du soir. Il n'a pas tenu compte de l'état du ciel, de sorte que  $\frac{1}{20}$  des observations environ, a donné de l'électricité négative. — Remarquons enfin que les différences entre le maximum et le minimum sont plus prononcées l'été que l'hiver, et par les temps sereins que par les temps couverts.

**1786. Variations mensuelles.** — Les variations de l'électricité de l'air avec les saisons ont été étudiées à Bruxelles par Quetelet à partir de 1844, en observant l'électromètre de Peltier, chaque jour à midi, et faisant chaque mois la somme des nombres de degrés obtenus pendant le mois. La figure 1235 fait connaître les résultats obtenus ainsi pendant 6 ans; les ordonnées sont proportionnelles aux sommes des différents mois, à l'échelle de 2<sup>mm</sup> par unité. On voit que la quantité d'électricité est bien plus grande en hiver qu'en été; le maximum a lieu en *janvier*, et le minimum en *juin*, le premier étant à peu près 13 fois plus grand que le second. Ce rapport n'est pas partout aussi fort; d'après Ronalds, il est plus faible à Kew, et, d'après M. Lamou, encore plus faible à Munich. On retrouve sensiblement la courbe de la figure, en construisant les maximum, ou les minimum des différents mois. La moyenne de ces termes extrêmes pour chaque mois, coïncide aussi avec la moyenne du mois. Enfin, les moyennes des mois de mars et de novembre représentent sensiblement la moyenne de l'année.

Les quantités d'électricité, par les temps sereins, varient avec la latitude; mais on n'a que peu de renseignements à cet égard. D'après Scoresby, l'électricité de l'air est nulle au-dessus des mers polaires.

**1787. ÉLECTRICITÉ PAR LES TEMPS COUVERTS.** — Quand le temps est couvert, l'état électrique est généralement très-variable et très-irrégulier; aussi, quand on veut rassembler des résultats comparables, faut-il, ce qui n'a pas toujours été fait, ne considérer que les observations faites dans les temps sereins.

Quetelet a trouvé, à Bruxelles, que l'électricité, quand le ciel est nébuleux, est généralement plus faible que par un ciel serein, et d'autant plus qu'on se rapproche davantage du mois de janvier, pendant lequel l'électricité des temps couverts n'est que  $\frac{1}{4}$  de celle des temps sereins.

Sous un ciel nuageux, les électromètres varient fréquemment et indiquent en peu de temps des changements de nature de l'électricité. Peltier, en juillet 1842, sur le Faulhorn, a vu que les nuages blancs qui passaient au-dessus de lui étaient fortement électrisés positivement et donnaient de la neige, tandis que les nuages gris étaient prodigieusement chargés de fluide négatif, et donnaient du grésil. Il a aussi reconnu, soit par le cerf-volant, soit par l'électromètre, que les vapeurs transparentes de l'air sont souvent groupées comme de grands nuages invisibles, plus continus que les nuages opaques. Cette disposition des vapeurs doit avoir une grande influence sur certains météores.

En temps d'orage, les électromètres sont continuellement en mouvement et

† Annuaire météorologique, année 1850.

indiquent que l'électricité change de nature d'un instant à l'autre. Ce n'est qu'après un éclair qu'ils restent un instant en repos, pour s'agiter ensuite, à cause des déplacements électriques qui se font dans les nuages.

Par les brouillards, l'électricité de l'air est augmentée, probablement parce que les vapeurs, en s'abaissant, apportent dans les régions inférieures de l'atmosphère l'électricité qu'elles ont amassée dans les couches supérieures. D'après Schübler, cette électricité, ordinairement positive, est plus prononcée en hiver qu'en été. Le dépôt de la rosée est aussi accompagné d'un accroissement notable dans l'électricité de l'air.

Pendant la pluie et la neige, on trouve une forte électricité dans les couches inférieures de l'air, si ce n'est pendant les pluies fines et continues. Cette électricité est tantôt positive et tantôt négative; en Allemagne, le second cas est un peu plus fréquent que le premier. A Bruxelles, Quetelet n'a vu que 23 fois en 4 ans, l'électricité de l'air négative, et ce phénomène suivait ou précédait en général des pluies ou des orages. Six fois seulement la pluie a été négative, tandis que, pendant le même espace de temps, il a observé 24 pluies positives; résultat bien différent de ce qui a été constaté en Allemagne. La direction du vent qui règne pendant la pluie influe notablement sur les résultats. Ainsi, Schübler et Hemmer trouvent en Allemagne, dans deux localités différentes, que les pluies négatives sont 2 ou 3 fois plus fréquentes par les vents du sud que par les vents du nord.

Schübler, Volta, Halles.... expliquaient ces pluies négatives, par l'évaporation des gouttes produisant de l'électricité; le fluide positif étant emporté par la vapeur, les gouttes restaient électrisées négativement. A l'appui de cette explication, on citait les cascades, qui forment un brouillard dont les gouttelettes sont électrisées négativement. Mais ce dernier résultat doit s'expliquer par l'influence de l'électricité positive des parties élevées de l'atmosphère, comme le prouvent les expériences de M. Belli, qui isola une fontaine de Héron et vit que, par un temps serein, le jet était négatif et le vase positif; tandis qu'il ne trouvait aucun signe d'électricité quand l'atmosphère n'en contenait pas. M. Belli attribue l'électricité négative de la pluie à l'action par influence exercée sur elle par le nuage positif qui la verse, quand elle est assez rapprochée du sol pour que son fluide positif repoussé puisse s'y transporter à travers l'air humide.

**1788. Relation entre l'humidité de l'air et son état électrique. —**

Quetelet a remarqué qu'il existe une relation importante entre les variations de l'électricité de l'atmosphère et celles de l'humidité qu'il contient<sup>1</sup>. Considérons d'abord les *variations diurnes* par un temps serein. Avant le lever du soleil, l'air très-humide laisse couler dans le sol l'électricité qu'il contient; après le lever du soleil, les vapeurs montent, et l'électricité atteint son maximum. Plus tard, le sol s'échauffant, de nouvelles vapeurs se forment, à travers lesquelles l'électricité de l'air passa dans le sol. L'action solaire fait ensuite monter ces nouvelles

<sup>1</sup> Sur le climat de la Belgique, et Bibl. universelle de Genève (arch. des sc.), t. XXVI, p. 5.



vapeurs, et l'on observe un second maximum, après lequel l'électricité diminue en même temps que les vapeurs s'abaissent.

Quant aux variations mensuelles de l'électricité, voici comment Quetelet résume les résultats :

Mois les plus froids.	$\left. \begin{array}{l} \text{maximum.} \\ \text{minimum.} \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} \text{d'électricité, humidité ordinaire.} \\ \text{d'humidité, beaucoup d'électricité.} \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} \text{ciel serein.} \\ \text{ciel couvert.} \end{array} \right\}$
Mois chauds et tempérés.	$\left. \begin{array}{l} \text{maximum.} \\ \text{minimum.} \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} \text{d'électricité, peu d'humidité.} \\ \text{d'humidité, peu d'électricité.} \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} \text{temps sec, nuages.} \\ \text{temps sec, ciel serein.} \\ \text{temps humide et couvert.} \\ \text{temps très-sec, ciel serein.} \end{array} \right\}$

On peut donc déduire avec une grande probabilité l'état électrique, de l'aspect du ciel et de l'observation de l'hygromètre.

**1789. Rôle de l'électricité atmosphérique dans la végétation.** — L'étude de la distribution de l'électricité dans l'atmosphère a pris une importance considérable depuis la découverte de l'influence des effluves électriques à haute tension pour fixer l'azote dans les matières organiques (1726). On pouvait dès lors admettre que les décharges des orages étaient capables de produire des effets semblables, et notamment l'absorption de l'azote par les végétaux; et, en effet, on a remarqué depuis longtemps que la végétation est activée par les orages; mais comme ils ont lieu quand il fait chaud et qu'ils donnent de la pluie, on pouvait attribuer les résultats à ces deux circonstances. M. Berthelot, après les belles expériences que nous venons de rappeler, chercha si l'électricité de l'atmosphère par les temps sereins ne serait pas capable aussi de déterminer la fixation de l'azote dans les substances organiques, et il reconnut qu'il en est ainsi<sup>1</sup>.

L'appareil employé dans ces nouvelles expériences consisté en deux tubes de verre mince TT, *tt* (fig. 1236) placés l'un dans l'autre et séparés par de petites masses de verre. Dans l'intérieur du tube *tt* est une armature *aa*, formée d'une feuille de platine ou d'argent, à laquelle est fixé un fil de platine *o* qui traverse les deux tubes, dans lesquels il est soudé. Ce fil communique avec un collecteur à écoulement d'eau (1781). Dans l'espace, de 30 à 35 centimètres cubes, qui sépare les deux tubes, on introduit des bandelettes de papier blanc-humide, ou de la dextrine, puis on le remplit d'air ou d'azote, au moyen de l'appendice *s* et de

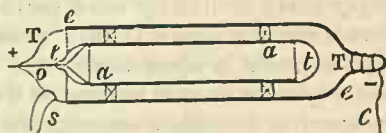


Fig. 1236.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. X, p. 55.

celui qui termine le gros tube du côté *c*. On applique ensuite une armature d'étain extérieure en *ee*, on garnit de gomme laque l'extrémité nue *soe*, et l'on fait communiquer le fil *c* avec le sol. L'électricité empruntée à l'atmosphère passe alors par effluves invisibles, d'un tube à l'autre à travers l'azote.

Dans des expériences poursuivies par M. Berthelot, du 29 juillet au 5 octobre 1876, sur 12 tubes, ouverts ou fermés, remplis d'azote ou d'air, de l'azote s'est toujours fixé sur le papier ou la dextrine, en formant un composé amidé que la chaux sodée décomposait vers 300 à 400 degrés, en régénérant de l'ammoniaque. Dans deux de ces tubes, le papier était couvert de taches verdâtres, végétations microscopiques produites par quelques germes introduits avec l'air, et la quantité d'azote fixée dans ces deux tubes a été notablement plus grande que dans tous les autres.

Il faudra donc désormais, dans les études sur les causes qui activent la végétation, considérer cette influence de l'électricité atmosphérique, dont on n'avait pas soupçonné l'existence avant ces remarquables expériences.

**1790. De l'origine de l'électricité atmosphérique.** — Volta, Laplace et Lavoisier avaient annoncé que la vaporisation de l'eau dans un creuset très-chaud, produisait de l'électricité. Plus tard, Pouillet, dans des expériences que nous décrirons (1838), a précisé les conditions du phénomène, et a trouvé qu'il n'y a dégagement d'électricité qu'autant que l'eau tient en dissolution quelques matières dont la vapeur se sépare. Quand ces matières sont des sels, le vase est électrisé négativement et la vapeur positivement. Pouillet a fait voir, de plus, que l'acte de la végétation est aussi accompagné d'un dégagement d'électricité. Voilà donc deux sources d'électricité atmosphérique : la végétation, et l'évaporation qui se fait à la surface des mers, des terres humides et des feuilles des végétaux.

Cette origine de l'électricité de l'air a été adoptée d'abord sans conteste; mais depuis quelque temps, elle a été assez vivement attaquée. M. Guthrie a fait remarquer que c'est pendant l'hiver que l'air est le plus fortement électrisé, et c'est l'époque de l'année où l'évaporation et la végétation ont le moins d'activité. A quoi l'on a répondu que, pendant l'hiver, l'électricité des hautes régions arrivait plus facilement dans les parties basses, où l'on observe; mais la conductibilité de l'air est moindre pendant l'hiver, puisqu'elle dépend du poids absolu de vapeur que contient l'air (1639), et que ce poids est moindre en hiver qu'en été. Peltier remarque aussi que c'est au moment de la journée où l'évaporation est la plus active, que se présente le premier minimum diurne. Le même observateur ayant repris les expériences de Pouillet, a trouvé que l'électricité ne se montre avec l'eau ayant pris la forme globulaire, qu'au moment où la vapeur se produit brusquement, de manière que l'électricité qu'elle emporte soit aussitôt soustraite à l'action de celle que garde le creuset; or, ce n'est pas dans ces conditions que l'évaporation se fait, dans la nature.

On peut répondre à ces expériences par celles qui suivent : Matteucci, ayant isolé une plaque de métal de  $\frac{1}{3}$  de mètre carré, recouverte de terre mouillée d'eau salée, l'exposa au soleil, après l'avoir mise en communication avec un électromètre;

les feuilles d'or s'écartèrent par de l'électricité négative. S'il agitait l'air au-dessus de la plaque, l'effet était encore plus marqué, l'agitation activant l'évaporation et entraînant la vapeur avec son électricité. Les vapeurs qui se forment à la surface de la terre emportent donc dans l'atmosphère de grandes quantités d'électricité positive. Il résulte aussi de là que le sol doit recevoir continuellement de l'électricité négative retenue à sa surface par l'attraction de celle de l'air, et s'accumulant dans les objets élevés, les arbres, les montagnes. Cet état négatif du sol, augmenté par l'induction produite par l'électricité positive de l'air, explique l'ascension des nuages négatifs, l'abaissement des nuages positifs, et leur station autour des pics élevés, où ils sont retenus assez fortement pour résister à des vents assez forts. Nous avons vu comment ce dernier phénomène peut être produit par une cause toute différente (II, 1463).

M. Palmieri a annoncé, en 1869, avoir constaté par l'expérience la production d'électricité dans la condensation de la vapeur. Le P. Secchi admet ce mode de production, par des considérations théoriques, ne pensant pas que le mouvement calorifique qui accompagne les changements d'état puisse s'effectuer sans déplacement d'éther et par conséquent sans mouvement électrique. D'un autre côté, Faraday, Peltier, De la Rive, Becquerel, Gauguin, ont conclu de leurs expériences que les changements d'état des corps ne sont pas accompagnés de manifestations électriques.

Peltier a proposé l'explication suivante<sup>1</sup> : L'air, par les temps sercins, ne contiendrait pas d'électricité positive, et si les instruments en indiquent, cela vient d'une induction produite par la terre, qui est naturellement électrisée négativement. Les vapeurs qui s'élèvent du sol emportent de cette électricité, et forment une couche négative dans laquelle les électromètres restent en repos, parce qu'ils y sont entièrement plongés. Si on les éloigne du sol, on les fait sortir de cette couche, et les feuilles d'or indiquent du fluide positif provenant d'une induction produite par l'électricité négative qui se trouve au-dessous de l'instrument. Si l'on abaisse ce dernier, on obtient un effet inverse. — Dans cette manière d'interpréter les phénomènes, il n'y a plus à se préoccuper de l'origine de l'électricité positive de l'air, puisqu'il n'en contiendrait pas. Mais la théorie de Peltier n'est pas établie sur des bases assez certaines pour qu'on puisse admettre que l'électricité positive que l'on trouve dans l'air par les temps sercins, n'est que le résultat d'une illusion.

De la Rive qui avait d'abord cherché à rattacher l'électricité atmosphérique à la distribution de la chaleur dans l'air, penche à admettre une électricité propre du globe, produite par les actions chimiques qui s'exercent à la surface interne de la croûte solide. Celle-ci garderait le fluide négatif, et le fluide positif, repoussé à la surface extérieure, serait transporté dans l'atmosphère par les vapeurs qui se forment à la surface<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. IV, p. 385.

<sup>2</sup> *Traité d'électricité théorique et appliquée*, par M. A. de la Rive, t. III, p. 191.

Enfin, on a été chercher jusque dans le soleil l'origine de l'électricité de l'atmosphère. Becquerel a développé cette hypothèse<sup>1</sup>, et comme l'électricité ne traverse pas le vide, il a invoqué des effluves de gaz hydrogène lui servant de véhicule et lancées de la surface solaire par cette force répulsive que M. Faye a supposée au soleil, pour expliquer la direction de la queue des comètes.

On voit par ce qui précède, que la question de l'origine de l'électricité atmosphérique est loin d'être résolue; il y a là tout un champ de recherches bien fait pour attirer l'attention des physiciens et des météorologistes.

### III. Aurores polaires.

**1791.** Nous avons vu comment l'électricité abondante des couches élevées de l'atmosphère peut, d'après une théorie récente, se perdre dans la terre par l'intermédiaire de tourbillons descendants (1756). Cette électricité peut aussi se décharger dans le sol, en s'écoulant vers les régions polaires à travers l'air très-raréfié, et donne lieu, quand l'écoulement est considérable, à des effets lumineux qui constituent l'*aurore polaire*. Ce majestueux météore connu aussi sous le nom d'*aurore boréale* ou d'*aurore australe*, suivant qu'il se montre vers le pôle nord ou vers le pôle sud, présente des aspects très-variés, et suit cependant une marche assez constante; il naît, se développe, et passe successivement, avant de disparaître, par une série de phases plus ou moins brillantes.

**Description de l'aurore polaire.** — Plusieurs heures avant l'apparition du météore, l'agitation de l'aiguille aimantée indique une perturbation dans l'équilibre magnétique du globe. Cette agitation ne fait qu'augmenter pendant les différentes phases du phénomène (1575); et l'action magnétique qui la produit est souvent assez intense pour empêcher les télégraphes électriques de fonctionner régulièrement. Au moment où le phénomène va se montrer, et dans la direction du méridien magnétique, on voit d'abord l'air se rembrunir et former un segment circulaire obscur d'une teinte brune ou violacée, derrière lequel les étoiles apparaissent comme à travers un brouillard. Ce segment, d'autant moins apparent que la latitude du lieu d'observation est plus basse, paraît bientôt bordé d'un arc lumineux dont les extrémités s'appuient sur l'horizon. Cet arc augmente d'épaisseur et d'éclat; quelquefois il est composé de parties séparées. Le point le plus élevé est à peu près dans le méridien magnétique; il s'en écarte ordinairement de 5 à 18° dans le sens de la déclinaison du lieu d'observation, et d'autant plus que ce lieu est plus rapproché du pôle. L'éclat de l'arc est souvent comparable à celui de la pleine lune, et quelquefois visible en plein jour. La nuance est variable, purpurine, bleuâtre, violacée. Il paraît que les divers observateurs voient un arc particulier, qui dépend de leur position.

**Rayons.** — L'arc lumineux est souvent agité pendant des heures entières

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. LXXV, p. 1446.

par des ondulations, et par une sorte d'effervescence; puis on y distingue des stries rayonnantes, qui semblent mordre sur le segment obscur, en certains points d'où s'élancent normalement des bandes brillantes, ou *rayons*, plus vives au milieu que sur les bords, comme on le voit dans la figure 1237 qui représente une aurore boréale vue à Turin le 29 février 1780. Ces rayons montent avec une vitesse plus ou moins rapide, comparable à celle des fusées d'artifice. Ils se brisent, se multiplient, dépassent le zénith, et finissent par envahir toute la voûte céleste en formant une coupole de feu, mobile comme les flots de la mer, et dont tous les éléments convergent, en formant ce qu'on nomme la *couronne*, vers un point situé sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison, point que

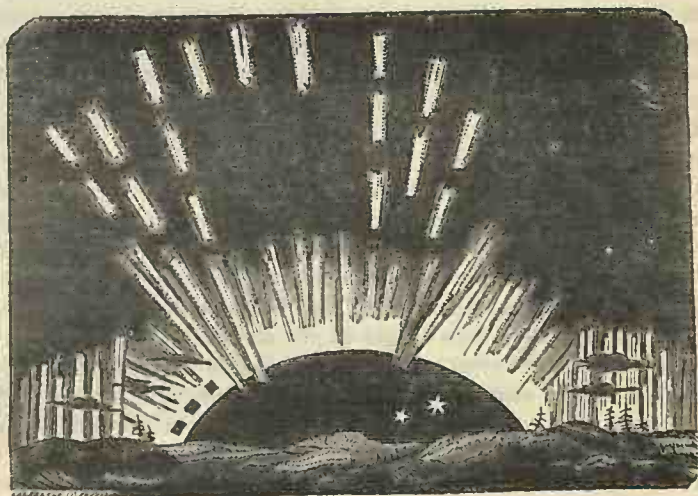


Fig. 1237.

l'on appelle le *zénith magnétique*. La formation de la couronne annonce la fin du phénomène : les arcs perdent leur éclat, les rayons s'affaiblissent, et tout finit par disparaître.

C'est surtout dans les zones glaciales que les aurores polaires se montrent avec toute leur magnificence. On y voit souvent l'arc lumineux monter avec plus ou moins de rapidité, tout en dardant ses rayons, et en conservant quelquefois les mêmes points de réunion avec l'horizon. Cet arc peut être suivi de plusieurs autres, qui naissent successivement, et sont séparés par des espaces sombres. Cependant le premier arc finit par dépasser le zénith; il se sépare quelquefois alors de l'horizon et apparaît comme un immense ruban strié transversalement et dardant des rayons vers le bas; car, le ruban se trouvant alors au sud de l'observateur, le côté par où ces rayons s'élancent paraît en bas. La bande

lumineuse est animée de mouvements d'ondulation, comme un serpent qui se replie, ou comme une longue draperie agitée par le vent; elle forme les courbes les plus gracieuses, présentant quelquefois des contours fermés.

La voûte lumineuse constituée par la couronne, quand il s'en forme une, est un effet de perspective; car, d'après Wilke, tous les rayons sont sensiblement parallèles à l'aiguille d'inclinaison, et s'ils semblent diverger en partant de l'arc, et converger ensuite vers le centre de la couronne, c'est par la même illusion qui fait que les arêtes d'un tunnel au milieu duquel on se trouve, paraissent converger vers les centres des deux ouvertures. Du reste, Bravais, qui a étudié beaucoup d'aurores polaires, a reconnu que les rayons ne sont qu'à peu près parallèles à l'aiguille d'inclinaison; et MM. Galle et Reimann ont constaté que le centre de la couronne est toujours de quelques degrés *au-dessous* du zénith magnétique. Morlet regarde l'arc auroral comme composé de stries très-serrées ou superposées; en effet, quand cet arc passe au zénith, on le voit souvent coupé en ce point par un large espace obscur. On a vu quelquefois des rayons ou des bandes noires s'élever du segment obscur et passer sur l'arc et le reste de la lueur.

Les aurores polaires ne se présentent pas toujours avec toutes les phases que nous venons de décrire. Souvent elles ne consistent qu'en une lueur diffuse non striée semblable à celle qui se montre à l'orient avant le lever du soleil. D'autres fois, il n'y a qu'un simple arc lumineux bordant le segment obscur et dardant à peine quelques rares et courts rayons. Les plus belles aurores polaires perdent beaucoup quand on est éloigné du pôle magnétique; alors on n'aperçoit que les extrémités des rayons, et la couronne, quand il s'en forme une. Les aurores boréales se voient rarement en Italie, tandis qu'en Amérique, à la même latitude, on en voit fréquemment, à cause de la proximité du pôle magnétique (1551).

**Étendue, hauteur des aurores polaires.** — Le météore s'étend quelquefois à des distances immenses des pôles : le capitaine Lafond, dans l'hémisphère austral à la latitude de 45° et sous le méridien du milieu de la Nouvelle-Hollande, a pu voir, le 14 juin 1831, une aurore *boréale*, dans la direction du *nord-est*. Dalton a observé plusieurs fois des aurores *australes* en Angleterre.

La hauteur des aurores polaires a été d'abord fort exagérée; les anciens physiciens la portaient bien au-delà des limites de l'atmosphère. Ayant ensuite remarqué que le météore est entraîné dans le mouvement de la terre, ils l'ont placé dans les régions supérieures de l'air. La hauteur de l'arc est très-variable, et peut être assez petite vers le pôle, pour qu'on l'ait vu se projeter sur des nuages et même sur des montagnes, et Parry dit avoir vu un rayon auroral frapper la terre à une petite distance devant lui.

**Du bruit de l'aurore polaire.** — Les habitants des régions boréales admettent généralement que, dans les hautes latitudes, l'aurore polaire est accompagnée d'un léger bruit ressemblant à celui des aigrettes électriques, et augmentant d'intensité quand les rayons s'élancent avec vivacité. Cependant bien

des voyageurs, entre autres les membres de la Commission scientifique du Nord, en 1838, qui ont observé, à Bosekop, 153 aurores boréales, n'ont rien pu entendre. De plus; il résulte d'une sorte d'enquête qu'ils ont faite dans le pays, que le bruit entendu était produit soit par le vent, soit par la crépitation de la neige; et ils ont fini même par faire partager cette opinion aux habitants.

**1792. DE L'EXPLICATION DES AURORES POLAIRES.** — Les aurores boréales avaient attiré l'attention des anciens. Aristote et Sénèque les ont observées en philosophes, ce qui n'a pas empêché Plinc d'y voir plus tard des présages funestes. Au moyen âge, ce brillant météore était un sujet d'épouvante. L'imagination effrayée y voyait des torches, des épées sanglantes, des têtes hideuses à cheveux hérissés. Au commencement du dix-septième siècle, les préjugés et l'ignorance commencèrent à reculer devant les lumières de la science; et tandis que l'historien Legrain parle encore, en 1615, d'une apparition effroyable d'hommes de feu combattant avec des lances, Lamote Levoyer, témoin du même phénomène, le réfute et ramène les choses à leur juste valeur. Gassendi, un des premiers, a observé le météore scientifiquement, et c'est lui qui lui a donné le nom d'*aurore boréale*. Il faudrait des volumes pour analyser tous les systèmes qui ont été proposés depuis cette époque pour en donner l'explication. D'abord, on eut recours à des exhalaisons s'élevant du sol des régions polaires, et fermentant en dégagant de la lumière; Muschenbroeck les suppose arrangées en nuées s'entrechoquant; et Lemonnier les compare à la matière des comètes. Euler suppose que les particules de l'air sont lancées par l'impulsion des rayons solaires, à une immense hauteur où elles deviennent lumineuses. D'autres ont fait intervenir la réflexion et la réfraction des rayons solaires sur les glaces polaires, puis sur des parcelles de glace en suspension dans l'air. Halley supposait un courant de fluide *magnétique* s'échappant de la terre par le pôle Nord. De Mairan, dans son *Traité de l'aurore boréale*, l'attribue à une vapeur lumineuse enveloppant le soleil et venant jusqu'à la terre, qui en emporte une partie; théorie, présentée avec tant d'art qu'elle fut généralement admise, jusqu'au moment où Celsius et Hiorter, en 1740, découvrirent l'influence de l'aurore boréale sur l'aiguille aimantée. Plus tard, Eberhart à Hall, et Paul Frisi à Pise, firent faire un grand pas à la question, en comparant la lumière du météore à celle de l'électricité dans le vide. Canton, Beccaria, Wilke, Franklin, puis Dalton et Bertholon, ébauchèrent ensuite des théories électriques de l'aurore boréale. Volta supposait que le météore pourrait être produit par l'inflammation du gaz des marais, que l'on venait alors de découvrir, et Biot chercha à l'expliquer par des nuages de poussières ferrugineuses lancées par des volcans voisins des pôles, et servant de conducteur à l'électricité de l'air. Suivant de Humboldt, l'aurore polaire est la résolution de l'orage magnétique qui agite l'aiguille aimantée; ce qui n'explique pas le phénomène, et ne fait que donner une indication lointaine de sa cause première. Enfin, M. Morlet n'est pas loin de la vérité quand il invoque l'électricité atmosphérique rendue lumineuse par son déplacement dans l'air très-raréfié, et repoussée par le magnétisme terrestre.

Il explique l'arc auroral par la réflexion de la lumière électrique sur les facettes de particules de glace prismatiques ou pyramidales convenablement orientées<sup>1</sup>.

**1793. Théorie de l'aurore polaire.** — L'origine électrique de l'aurore polaire est prouvée principalement par son action sur l'aiguille aimantée, et par la ressemblance de la lumière qu'elle émet avec celle que manifeste l'électricité quand elle s'écoule dans les gaz raréfiés (1693). — Le premier point à expliquer est l'accumulation de grandes quantités d'électricité dans les régions polaires. Voici comment raisonnait Peltier<sup>2</sup>. Les vapeurs qui s'élèvent entre les tropiques, avec l'air dilaté, s'écoulent vers les pôles, à une grande hauteur, emportant avec elles toute l'électricité qu'elles contiennent, et se condensant en particules glacées. A mesure que le courant s'approche du pôle, il coupe des cercles parallèles de grandeur décroissante, et la portion d'électricité non perdue en route, se trouvant resserrée dans un espace de plus en plus petit, finit par acquérir une tension considérable, et produit des décharges lumineuses entre les particules de glace, et d'autant plus facilement que cela se passe dans un air très-raréfié. Ces décharges, qui ont lieu circulairement autour du pôle, forment l'aurore polaire.

A. de la Rive a formulé d'une manière plus précise et plus complète une explication analogue<sup>3</sup>. L'électricité *positive* des hautes régions de l'atmosphère intertropicale se rend vers les pôles en augmentant de tension, et va se joindre par l'intermédiaire des particules glacées qui flottent dans l'air, au fluide négatif de la terre, puis forme dans le sol un courant dirigé du pôle à l'équateur. Ce courant, nécessairement variable suivant la température de l'air, agit sur l'aiguille aimantée, et produit les variations diurnes. Quand il y a une grande accumulation de particules glacées, on aperçoit un nuage sombre, qui n'est autre chose que le segment obscur; puis des décharges lumineuses qui forment les rayons auroraux. Ces rayons s'élancent en montant, mais, comme le remarque Franklin, le mouvement électrique n'en est pas moins dirigé vers les pôles, comme dans les vents d'aspiration qui soufflent en sens contraire de leur propagation. Dès qu'une décharge commence près du pôle, l'équilibre est rompu et le mouvement se propage rapidement en arrière jusqu'à une grande distance.

L'aiguille aimantée est agitée par les décharges, pendant lesquelles le courant terrestre éprouve nécessairement des variations brusques d'intensité, en donnant lieu à ce qu'on a appelé un *orage magnétique*. Lors des fortes aurores boréales, la déclinaison occidentale de l'aiguille est augmentée. Les fils télégraphiques, dont les extrémités plongent dans le sol, dérivent une partie des courants terrestres, de manière à troubler souvent le jeu des appareils, et l'on remarque que ces courants, qui sont intermittents ou ne durent que quelques minutes, marchent tantôt du nord au sud, tantôt du sud au nord. — Les particules glacées sont surtout abondantes quand le soleil se trouve dans l'hémisphère opposé au pôle

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXVII, p. 63.

<sup>2</sup> *Archives de l'électricité*, de M. A. de la Rive, t. IV, p. 240.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXV, p. 340.



considéré; aussi a-t-on remarqué que c'est dans la saison froide que les aurores polaires sont le plus fréquentes; elles se produisent alors presque tous les jours, suppléant en partie à la lumière absente du soleil.

M. Lemstrom a apporté une modification à cette théorie en ce qui concerne la cause de l'accumulation de l'électricité dans l'atmosphère des régions polaires. Il explique cette accumulation par l'action qu'exerce l'électricité négative de la terre sur l'électricité positive répandue dans les couches élevées de l'atmosphère rendues conductrices par leur raréfaction. Il trouve par le calcul que cette attraction est plus grande de 42 pour cent, au pôle qu'à l'équateur<sup>1</sup>.

**1794. Remarques.** — La théorie qui précède a été confirmée par diverses observations. — Wrangel a vu des cercles lumineux autour de la lune quand les rayons auroraux s'élançaient dans sa direction, cercles produits, comme nous le verrons dans l'optique, par des particules cristallines de glace. On a vu souvent, à l'arrivée du jour, des cirrus nombreux aux endroits où les lueurs s'étaient montrées, et même on a remarqué fréquemment qu'ils conservaient la forme des plaques aurorales observées pendant la nuit précédente.

Il résulte de nombreuses observations que, lorsqu'il se produit une aurore à l'un des pôles, il s'en produit constamment une autre à peu près en même temps dans l'hémisphère opposé. M. Loomis a publié, en 1861, un tableau des aurores observées, de 1841 à 1848, à Christiania et à Hobarton (Ile de Diemen), dans lequel se vérifie cette coïncidence remarquable. Elle suffit pour expliquer les anomalies dans le sens du courant dérivé dans les fils télégraphiques.

Nous avons vu qu'il existe une relation entre les perturbations de l'aiguille aimantée et les mouvements violents de l'atmosphère (1576). Cette relation s'explique facilement par le trouble apporté dans les courants supérieurs de l'atmosphère transportant l'électricité vers les pôles. On a constaté de plus, que les fortes tempêtes sont souvent précédées de l'apparition d'une aurore polaire, qui montre que de grands déplacements d'air ont produit des cirrus épais amassant de grandes quantités d'électricité, d'où sont résultées les décharges lumineuses observées. M. Ch. Dufour a fait remarquer que, lors du célèbre orage du 13 juillet 1788 cité plus haut (1755), de Saussure, au col du Géant, avait constaté la présence de trois bandes aurorales pendant la nuit du 12 au 13, et avait vu sa boussole fortement agitée pendant la journée du 12.

**Expériences de de La Rive.** — De La Rive a cherché à imiter par l'expérience, les principales apparences que présente l'aurore polaire, et à montrer comment elle est en relation de position avec le pôle magnétique du globe<sup>2</sup>. La figure 1238 représente un appareil au moyen duquel on peut reproduire ces expériences. Dans un *auf électrique* pénètre un cylindre de fer doux CF, appuyé sur un *électro-aimant* extérieur E. Ce cylindre est enveloppé, excepté à ses deux bases, d'une couche isolante formée d'un tube de verre dont les deux faces sont

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), 1875, t. LIV, et (1876), t. LV.

<sup>2</sup> Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. XXV, et Bibl. de Gen. (Arch. des sc.), t. XXIV.

garnies de gomme laque. Un anneau de cuivre C entoure cette couche isolante à sa partie inférieure, et communique avec le bouton *c*. Quand, après avoir fait le vide dans l'œuf électrique, on fait communiquer, par le bouton *f*, le cylindre CF avec l'électrode positive d'une bobine de Ruhmkorff, ou d'une machine de Holtz, et l'anneau C avec l'électrode négative, on voit une gerbe lumineuse agitée qui va de la base F à l'anneau C, et dans laquelle on distingue des jets assez brillants. Si alors on fait passer un courant électrique dans l'électro-aimant E, de manière à aimanter le cylindre CF, la lumière prend un autre aspect, et se met à tourner rapidement autour de CF dans le sens du mouvement de l'électricité positive dans le fil de l'électro-aimant.

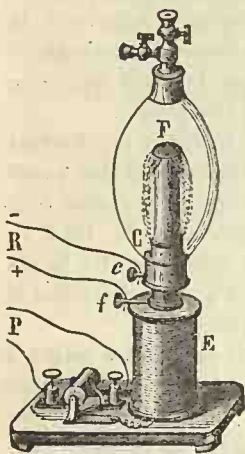


Fig. 1238.

Or on a vu souvent les aurores boréales tourner de l'est à l'ouest, avec une vitesse qui peut aller à près de 20° par heure; et Ampère ayant établi l'existence de courants terrestres circulant de l'est à l'ouest, on voit que l'expérience reproduit la rotation de l'aurore autour du pôle magnétique.

Nous devons dire, en terminant, que l'on a cru saisir une coïncidence entre une période décennale de la fréquence des aurores polaires et une période semblable de la fréquence des taches du soleil (1579). Mais cette coïncidence est loin d'être parfaite, et il faudra bien des observations discutées avec grand soin, pour la faire admettre; d'autant plus qu'on ne voit aucune relation probable entre ce qui se passe dans le soleil, et le phénomène purement terrestre de l'aurore polaire.

## CHAPITRE IV

### SOURCES D'ÉLECTRICITÉ — PILES

Cette pile.... est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé, sans en excepter le télescope et la machine à vapeur.

ARAGO, *Éloge de Volta*.

**1795. Différentes sources d'électricité.** — On peut produire de l'électricité par cinq moyens principaux : 1° les actions mécaniques, frottement, pression...; 2° les actions chimiques; 3° la chaleur, agissant soit dans les

cristaux, soit dans des circuits hétérogènes; 4<sup>o</sup> les *phénomènes physiologiques*; 5<sup>o</sup> l'*induction* par les aimants; mais nous parlerons de cette dernière source, dans un chapitre à part consacré à cette sorte d'*induction*.

On a admis pendant longtemps, d'après Volta, que le *contact seul* de deux corps suffisait pour développer de l'électricité, et quelques physiciens reviennent aujourd'hui à cette opinion, sans toutefois lui attribuer une aussi grande portée que Volta. Nous discuterons cette question en parlant de l'électricité produite par les actions chimiques, actions par lesquelles on explique généralement les phénomènes attribués autrefois au contact.

Il résulte de l'énumération qui précède, qu'il se dégage de l'électricité toutes les fois qu'on ébranle les molécules des corps. Nous avons déjà fait une remarque semblable relativement aux sources de chaleur (II, 1244); seulement, ici, nous ne trouvons pas de manifestation électrique dans le changement d'état des corps, ce qui tient peut-être au rétablissement immédiat de l'équilibre électrique rompu au premier moment.

Un semblable retour partiel à l'équilibre a lieu dans beaucoup de cas, et il nous explique les lueurs qui accompagnent la production de l'électricité dans les actions mécaniques (1582). On cherche à éviter le plus possible cette perte d'électricité; mieux on réussit, plus la tension obtenue est grande. Tout ce qui augmente la rapidité du dégagement électrique élève aussi la tension, jusqu'à ce que la quantité détruite soit égale, à chaque instant, à celle qui se dégage.

## § 1. — SOURCES MÉCANIQUES D'ÉLECTRICITÉ

### I. Lois du dégagement de l'électricité par le frottement.

**1796. Faits généraux.** — Nous avons vu comment l'électricité et ses principales propriétés ont été découvertes au moyen du frottement, et comment les deux états électriques se montrent toujours en même temps. Nous avons aussi étudié les causes qui modifient, chez les mauvais conducteurs, la tendance d'une même substance à prendre de préférence l'un ou l'autre état (1587). Parmi ces causes figure d'abord la chaleur et l'état de division; plus un corps est chaud et plus il est divisé, plus il tend à prendre l'état *négalif*. L'énergie de l'ébranlement moléculaire augmente aussi cette tendance; résultat qui dépend soit de l'ébranlement en lui-même, soit de la chaleur qui en est la conséquence.

M. E. Becquerel a reconnu que l'état moléculaire a plus d'influence que la substance même des corps. Ainsi, le talc, la farine, le charbon de cornue en poudre impalpable, appliqués sur les coussins d'une machine de Nairne (1606), donnent des résultats qui approchent de ceux que produisent l'or musif et les amalgames. La quantité d'électricité était déduite approximativement de la distance explosive des deux boules portées par les conducteurs de la machine tournant avec une vitesse constante.

En général, quand les surfaces frottées sont humides, on ne recueille pas d'électricité; ce qui peut provenir de ce que les fluides séparés se recombinaient aussitôt, à travers la couche d'humidité interposée entre ces surfaces. Quand elles sont bien sèches, le moindre frottement fait apparaître l'électricité. Le papier humide frotté sur un métal poli ne produit pas d'électricité, mais il s'électrise positivement quand il est bien sec. Dans les fabriques de papier continu, on observe souvent des étincelles provenant de la bande de papier qui passe sur les cylindres chauds destinés à la sécher. — Après avoir rappelé ces généralités, il nous reste à étudier les circonstances du dégagement de l'électricité par le frottement, telles que la pression, la vitesse tangentielle, et la nature du frottement.

**1797. Frottement des métaux par les mauvais conducteurs.** — Les métaux frottés avec des conducteurs imparfaits, comme le bois, le liège, l'ivoire, le soufre même et la gomme laque, s'électrisent négativement. Cavallo, Wilson, Haüy avaient déjà constaté ce résultat sur plusieurs métaux; mais il s'était présenté des anomalies, surtout avec ceux qui sont facilement oxydables, comme le plomb, le bismuth, qui s'électrisent assez souvent positivement. A. de La Rive a expliqué ces anomalies, en remarquant que l'électricité est toujours négative quand la surface métallique est bien décapée<sup>1</sup>. Mais si cette surface est ternie par une mince couche d'oxyde, le corps frottant enlève et retient l'oxyde, qui devient alors la substance frottante, et qui ayant une grande tendance négative, donne au métal l'état positif. Le liège, le caoutchouc, les corps mous qui enlèvent facilement l'oxyde, produisent surtout cet effet. Si le métal oxydable a été chauffé, il s'est plus fortement oxydé, et il s'électrise toujours positivement. Quand la couche d'oxyde est trop épaisse pour être entièrement enlevée par le frottoir, le frottement s'exerçant sur cette couche, le métal s'électrise négativement, ou pas du tout, les surfaces en présence étant de même nature. — Ces expériences ont été faites au moyen d'un électroscope à feuilles d'or, avec lequel la lame métallique, tenue par un manche isolant, était mise en communication. En passant délicatement le bout du doigt bien sec sur cette lame décapée avec soin, on lui donnait facilement l'état négatif.

**1798. Frottement des métaux entre eux.** — Quand on frotte deux corps bons conducteurs, il faut employer des précautions spéciales pour empêcher les électricités de se recombinaient immédiatement. Voici comment opère Becquerel<sup>2</sup>: Deux lames métalliques sont unies aux extrémités du fil d'un rhéomètre par des soudures enchâssées dans du liège destiné à arrêter la chaleur des mains. Si l'on applique les deux lames l'une sur l'autre, l'aiguille du rhéomètre reste en repos; mais dès qu'on les fait glisser, l'aiguille est déviée; chaque lame ayant reçu une des électricités séparées par le frottement, et une partie, reçue par le fil du rhéomètre ayant échappé à la recomposition. La déviation de l'aiguille est

<sup>1</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), 1835, t. LIX, p. 13.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 433.

d'autant plus grande que le glissement est plus rapide, les surfaces se quittant alors plus rapidement. Si l'on ne fait que presser les lames l'une sur l'autre, ou les frapper fortement sans glissement, l'aiguille ne bouge pas, quoiqu'il doive se produire de l'électricité. Le côté vers lequel est repoussé le pôle nord de l'aiguille fait connaître, comme nous le verrons (1829), par quelle extrémité du fil arrive le fluide positif. Dans la liste qui suit, chaque substance prend l'état négatif avec celles qui la suivent, et l'état positif, avec celles qui la précèdent :

(—) *Bismuth, palladium, platine, plomb, étain, nickel, cobalt, cuivre, or, argent, iridium, zinc, fer, cadmium, arsenic, antimoine, anthracite, peroxyde de manganèse (+).*

Becquerel a remarqué que, dans cette liste, les métaux qui ont des propriétés physiques et chimiques analogues, ou qui se trouvent associés dans la nature, sont, en général, placés les uns à côté des autres. Par exemple, le palladium et le platine; le plomb et l'étain; le nickel et le cobalt; le cuivre et l'argent; le zinc, le fer et le cadmium. Les divers métaux frottés deux à deux s'échauffent inégalement (II, 1270), et c'est celui qui s'échauffe le plus qui s'électrise *négativement*. Nous avons vu (II, 840) que la chaleur est une source d'électricité; mais ici elle n'est pas la cause, mais seulement un effet concomitant et indépendant; car les résultats restent les mêmes quand les surfaces sont polies, ou dépolies; et si, au lieu de plaques, on emploie des cylindres de cuivre et de fer, et qu'on fasse glisser un point de l'un d'eux sur une arête de l'autre, les résultats sont encore les mêmes, quel que soit le cylindre en repos. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet (1804).

On obtient encore de l'électricité en frottant deux masses *d'un même métal* l'une sur l'autre; mais il faut que l'une d'elles glisse sur la surface de l'autre, en la pressant toujours par les mêmes points; ce que l'on obtient en remplaçant l'une des lames par un bouton. Sur le *bismuth, l'antimoine, le fer, le platine*, le bouton prend l'électricité positive, quoiqu'il s'échauffe plus que la lame; il prend le fluide négatif sur le *cuivre*.

**1799. Métaux en limaille.** — Singer avait reconnu que les limailles métalliques que l'on fait tomber à travers une capsule de cuivre criblée de petits trous, sur un plateau fixé à un électromètre à feuilles d'or, chargeaient ce dernier d'électricité positive. Becquerel versait simplement la limaille sur une lame métallique tenue à la main (*fig. 1239*), d'où elle tombait sur le plateau d'un électromètre très-sensible, formé d'une feuille d'or placée entre les pôles opposés de deux *piles sèches* égales. La limaille s'électrise en glissant sur la lame, et dépose sur le plateau de l'électroscope, l'électricité qu'elle a reçue.



Fig. 1239.

Becquerel a encore opéré au moyen d'un disque horizontal tournant rapidement sur lui-même, sous l'influence d'un système d'horlogerie placé sur le plateau de l'électromètre. La limaille tombant au centre du disque glissait sur sa surface en l'électrisant, et était projetée en dehors par la force centrifuge.

Par ces deux méthodes, Becquerel a reconnu que la limaille projetée sur une lame de même métal prend l'électricité *négative*, et que l'effet est d'autant plus marqué qu'elle est plus fine et qu'elle tombe de plus haut. On peut dire, en général, que les limailles se comportent comme des corps dépolis en présence de corps polis. Les résultats sont plus prononcés avec les métaux oxydables, qu'avec l'or, le platine, l'argent.

Quand la lame et la limaille sont formées de métaux différents, la tendance de la limaille à prendre l'état négatif se manifeste encore, mais pas assez pour

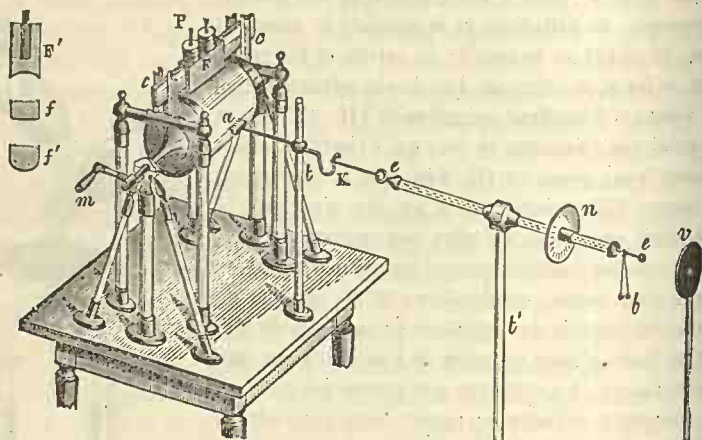


Fig. 1240.

l'empêcher de s'électriser positivement quand sa substance est positive, prise en masse. Ainsi, la limaille des métaux oxydables s'électrise positivement en tombant sur des métaux moins oxydables; telle est la limaille de zinc glissant sur des lames d'or, platine, argent, plombagine, persulfure de fer, cuivre, étain; tandis qu'elle prend le fluide *négatif*, sur le bismuth, l'antimoine et le fer. Les oxydes et les sulfures métalliques en limaille s'électrisent négativement en tombant sur des lames faites avec le métal qu'ils contiennent.

Si l'on chauffe la limaille de zinc, à 60°, elle prend le fluide *négatif*, avec les métaux sur lesquels elle s'électrisait positivement à froid. Quand la lame et la limaille sont en même temps à 60°, le résultat est encore plus marqué, et l'effet est simplement exalté par la chaleur, avec les lames sur lesquelles le zinc prend le fluide négatif à la température ordinaire.

**1800. Influence des circonstances du frottement.** — Pecclet a fait des

recherches importantes sur ce sujet, au moyen d'une machine électrique particulière<sup>1</sup> (fig. 1240). Un cylindre de verre, travaillé au tour, et recouvert à ses extrémités d'une couche épaisse de gomme laque, peut tourner sur lui-même, soutenu par des colonnes isolantes. F est un frottoir en bois maintenu par les coulisses c, c, et chargé par des poids P; il présente en dessous la courbure du cylindre, et est garni de quelques peaux minces et flexibles sur lesquelles on applique successivement des feuilles de papier nu, cuivré, doré ou argenté; des feuilles d'étain; des étoffes de laine, soie, coton; du taffetas gommé, de la peluche, etc.... Un conducteur isolé, ak, muni de pointes a, s'électrise par l'influence du cylindre tournant, proportionnellement à la charge de ce dernier. L'électricité repoussée passe, par un fil métallique recouvert de soie, ke, sur la tige de cuivre ee, logée dans un tube de verre supporté lui-même par la colonne isolante l'.

be est un électromètre à pendules dont un est fixe et l'autre mobile, leur écart est mesuré par projection sur un cadran divisé n. On ne compare que les résultats obtenus dans le même état hygrométrique de l'air.

**Influence du temps et de la vitesse.** — Avec les substances frottantes qui ne s'altèrent pas, la tension, pour une même vitesse, reste constante, après avoir augmenté pendant les premières minutes, ce qui paraît dû aux déplacements, au premier moment, des molécules de la surface frottante, et aussi, peut-être, à la chaleur du frottement.

Des cylindres de verre, résine, taffetas ciré faisant un tour pendant 8, 4, 2, 1 battements de montre, ont donné des tensions indépendantes de la vitesse, pour toutes les pressions. Les surfaces à longs filaments, comme la peluche de soie, le molleton, ont donné des tensions augmentant avec la vitesse; les filaments neutralisant au-delà du contact, une partie d'autant plus grande de l'électricité emportée par le cylindre, que ce dernier tourne plus lentement. Quand le frottoir est bon conducteur, la *quantité absolue* d'électricité produite, est indépendante de la vitesse, et reste la même pour chaque tour, quelle que soit sa durée; car le nombre de décharges d'une bouteille de Lane (1670) restait le même pour un même nombre de tours, quelque fût la vitesse de rotation. Mais quand le frottoir était mauvais conducteur, le nombre des décharges augmentait avec la vitesse.

**Influence de la pression.** — Pour les mêmes substances en présence, la pression n'a pas d'influence sur la tension. Cependant, pour la peluche et les substances analogues, la tension augmente jusqu'à 4<sup>k</sup> de pression; ce qui tient probablement à ce que la surface du corps frottant touche le cylindre par un plus grand nombre de points, quand la pression est plus forte. Il se présente aussi, parfois, des anomalies que Pecclet attribue à la chaleur dégagée par le frottement, qui donne aux frottoirs une tendance négative qui modifie les résultats.

**Étendue et forme de la surface frottante.** — L'étendue n'a pas d'influence

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LVII, p. 337

sur la tension. Pecelet laissait dépasser la lame mince frottante, qui s'appliquait sur le cylindre dans une certaine étendue au-delà du frottoir, et il relevait le bord de cette lame sur ce dernier; la partie flottante, pressée seulement par son élasticité, produisait le même effet que la partie rigide du frottoir chargée de 10<sup>kil</sup>. Il résulte de là, que l'électricité recueillie est produite par le bord de la surface frottante. Quand la feuille n'est pas relevée et que son bord libre est appuyé sur le cylindre, la déviation diminue avec l'étendue de la surface en contact, la lame ne touchant réellement qu'en quelques points, à cause de son faible poids. Dans ces expériences et celles qui suivent, les pointes *a* (fig. 1240) étaient placées sous le cylindre tournant.

La courbure du frottoir, quand il est bon conducteur, modifie les résultats, ce que l'on voit, en tendant plus ou moins la lame, de manière à en changer la courbure au point où elle quitte le cylindre. Des frottoirs, terminés par des surfaces planes, ou plus ou moins convexes, *f*, *f'* (fig. 1240), ont donné des déviations de 58°, 57° et 55°, d'autant plus faibles que la convexité était plus prononcée; ce qui paraît provenir de l'électrisation par influence de la partie courbe, dont le fluide contraire à celui du cylindre, augmente la destruction d'une partie de l'électricité qu'il reçoit. Le cuir à surface filamenteuse, produit un effet inverse; les filaments neutralisant d'autant plus l'électricité du cylindre, que le frotteur est moins convexe.

**Frottement de seconde espèce.** — Pecelet, ayant remplacé le frottoir de son appareil par un cylindre métallique creux garni de plusieurs couches de cuir, et muni de deux tourillons qui s'engageaient dans les coulisses *c*, *c* (fig. 1240), reconnut que, dans le frottement de roulement ou de seconde espèce, l'électricité produite est soumise aux mêmes lois, relativement aux variations de vitesse et de pression, que dans le frottement de première espèce. De plus, les métaux en feuilles, le papier, les peaux lisses, le satin du côté non satiné, produisent les mêmes quantités d'électricité dans les deux espèces de frottement.

On peut dire, en général, qu'elles donnent les mêmes résultats quand il n'y a pas de causes accidentelles d'anomalie. Il semble résulter de là que l'électricité dégagée par le frottement peut être attribuée à l'effet de la séparation des deux surfaces pressées l'une contre l'autre, ou à l'ébranlement moléculaire qui résulte de cette séparation.

On voit que, d'après les expériences de Pecelet et dans les limites des pressions et des vitesses dont il s'est servi, l'espèce de frottement, la pression, la vitesse n'ont pas d'influence sur la tension électrique. Quant à la quantité d'électricité, elle est proportionnelle à la vitesse quelle que soit la pression.

**1802. Électricité des courroies de transmission.** — Vers 1803, des ouvriers, dans l'usine à gaz de Saint-Étienne, virent des lueurs s'échapper d'une courroie communiquant le mouvement à une poulie, et reçurent des étincelles partant d'un tuyau de fonte voisin. Ce phénomène, étudié par M. Loir, fut d'abord attribué au frottement résultant d'un léger glissement de la courroie sur la poulie. Mais, d'après les expériences de Coulomb, l'électricité, qui était négative,



aurait dû être positive. M. Joulin a fait une étude détaillée de ce phénomène; après avoir reconnu que le signe de l'électricité observée dépend de diverses circonstances, tension de la courroie, vitesse, température, substances en présence, ... il construisit un appareil, sorte de machine électrique spéciale, au moyen duquel il a fait un très-grand nombre d'expériences <sup>1</sup>.

Cet appareil consistait essentiellement en deux arbres parallèles horizontaux sur lesquels étaient affirmées deux poulies égales embrassées par une courroie horizontale. L'un de ces arbres tournait dans des coussinets fixes et recevait son mouvement d'une turbine dont on pouvait faire varier facilement la vitesse; l'autre tournait dans des coussinets pouvant glisser sur leur appui, de manière à tendre plus ou moins la courroie; ils étaient sollicités par un poids dont on pouvait faire varier l'effort au moyen d'un levier.

Pour apprécier la *tension électrique* sur la courroie, le plan d'épreuve ne pouvant être employé à cause du mouvement, on approchait une petite boule, ordinairement de 15<sup>mm</sup> de diamètre, fixée au bout d'une mince tige métallique non isolée. Une aigrette produite par induction jaillissait de la boule, et sa forme indiquait si elle était positive ou négative (1692); l'électricité de la courroie était de nature opposée. On cherchait, dans l'obscurité, à quelle distance il fallait éloigner cette boule, pour obtenir l'aigrette la plus faible possible. Cette distance, nommée *distance d'aigrette*, était d'autant plus grande que la tension était plus forte sur la courroie; et elle était la même, à égale tension, pour les deux espèces d'électricité.

Quand on promenait la boule au-dessus de la courroie, d'une poulie à l'autre, celles-ci étant conductrices, les distances d'aigrette formaient une *courbe de niveau* partant de la poulie mue, qui paraissait lumineuse le long de l'arête par laquelle la courroie la quittait. Cette courbe s'étendait vers la poulie motrice, à mesure que l'électricité était en plus grande quantité, et finissait par former une ligne ressemblant à une demi-ellipse, dont la forme dépendait de la conductibilité et des dimensions de la courroie, et qui était symétrique de chaque côté du milieu de celle-ci.

Quand les poulies n'étaient pas conductrices, la distribution était plus compliquée, à cause de l'intervention des électricités restant sur ces poulies.

L'électricité est produite principalement par la séparation des surfaces le long de l'arête où la courroie quitte la poulie. Les électricités séparées se recombinent en partie en formant des lieux, et en proportion d'autant plus faible que la poulie présente une courbure plus prononcée et qu'elle communique mieux avec le sol, dans lequel son électricité se perd rapidement si elle est conductrice. L'autre électricité se répand sur la courroie et est entraînée dans son mouvement. Les quantités produites dépendent de la vitesse, de la tension de la courroie, qui modifie sa résistance à l'incurvation; de ses dimensions, du rayon des poulies, du bombement que présente leur jante. L'état de cette jante, les poudres qu'on peut

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. II, p. 5.

disséminer sur la courroie, la nature des poulies et des courroies, leur température, ont aussi une grande influence. Voici quelques-uns des résultats auxquels ont conduit de très-nombreuses expériences :

1° Quand on fait varier d'une manière continue une des circonstances du phénomène, la *tension électrique* varie aussi d'une manière continue, et si le signe de l'électricité doit changer, la tension diminue d'abord, passe par zéro, puis le signe de l'électricité change et la tension va en augmentant ; — 2° Quand plusieurs circonstances varient en même temps, les effets de ces variations se superposent ; — 3° La *tension électrique* sur la courroie, quand la poulie est métallique, est généralement négative, et augmente avec la vitesse et avec la force qui tend la courroie. — La *fonte de fer* fait exception : la tension électrique, négative pour les faibles vitesses, diminue en valeur absolue, devient nulle pour une certaine vitesse, puis croît positivement jusqu'à la vitesse maximum de 1100 mètres. Quand on tend de plus en plus la courroie, la tension électrique, pour une même vitesse, varie dans un sens ou dans l'autre, suivant les courroies, mais toujours d'une manière continue.

4° Quand on chauffait la courroie, soit en en approchant des charbons ardents, soit en promenant une flamme d'alcool sur sa surface extérieure, la tension électrique augmentait si elle était positive ; elle diminuait si elle était négative et pouvait passer par zéro, pour croître ensuite positivement. — Quand tout l'appareil était enveloppé d'un tambour dans lequel il conservait la chaleur du frottement, les phénomènes, positifs ou négatifs, étaient considérablement exaltés.

**1803. Électricité dans le frottement des gaz.** — Divers physiciens, Wilson, Henley, Volta, Marx..., sont parvenus à électriser différents corps par le choc d'un courant d'air ; mais les résultats étaient inconstants et souvent contradictoires. Faraday reconnut qu'ils dépendent de l'état de l'air ; *quand il est sec, il ne se produit pas d'électricité*, mais quand il est humide, ou mêlé de poussières diverses, il s'en dégage plus ou moins, dont le signe dépend de la nature des poudres. Quand l'air entraîne avec lui des gouttelettes d'eau, l'espèce d'électricité dépend de la substance du tube par lequel sort le jet d'air comprimé. M. Armstrong, en laissant sortir par un tube de verre, de l'air comprimé à 8 atmosphères dans un récipient isolé, vit ce dernier s'électriser tantôt positivement, tantôt négativement, tantôt enfin rester à l'état neutre. C'est surtout quand l'intérieur du récipient est humide, que l'électricité se dégage abondamment ; si on l'échauffe de manière à en dessécher l'air, on n'en obtient plus. On doit conclure de là que le frottement des particules d'eau se condensant dans le jet, ou des poussières mélangées, est nécessaire au développement de l'électricité par le frottement des gaz contre les corps solides. Nous avons vu l'application de ces principes aux machines hydro-électriques (1609).

**1804. Objections à l'opinion que le frottement est une source d'électricité.** — Comme le frottement est accompagné d'un dégagement de chaleur, et que la chaleur est une source d'électricité, quelques physiciens ont

admis que l'électricité dégagée pendant le frottement était due à la chaleur qu'il produit. Remarquons d'abord que le frottement de roulement dégage beaucoup moins de chaleur que l'autre, et que cependant il peut produire autant d'électricité. M. Gaugain <sup>1</sup> a bien, il est vrai, trouvé que, en échauffant directement un disque métallique posé sur un second disque, autant qu'il l'était par le frottement, on obtenait sensiblement la même déviation de l'aiguille d'un rhéomètre. Mais nous verrons que le dégagement de l'électricité par la chaleur est dû aux déplacements moléculaires qu'elle produit; alors, comme l'a fait remarquer de La Rive, il n'est pas étonnant de voir le dérangement moléculaire produit par le frottement des deux lames, donner autant d'électricité que ce même dérangement occasionné par l'échauffement direct de l'une d'elles.

Wollaston, frappé de la grande quantité d'électricité dégagée dans les actions chimiques, a voulu attribuer à une action de ce genre l'électricité qui prend naissance dans le frottement <sup>2</sup>. Il expliquait par là l'efficacité des amalgames et des autres matières très-oxydables dont on garnit les coussins. Ayant renfermé une petite machine électrique sous un récipient rempli d'acide carbonique, il n'obtint plus d'électricité. Il annonça aussi que des coussins garnis d'amalgame d'argent, ou d'un métal non oxydable, ne lui avaient pas donné d'électricité. Mais on peut répondre à ces expériences, par des faits très-concluants: d'abord, nous avons vu qu'on produit de l'élec-

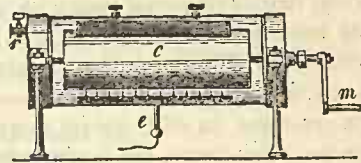


Fig. 1241.

tricité par le frottement dans le vide (1638). Gay-Lussac en a obtenu dans l'acide carbonique, en ayant soin de bien dessécher ce gaz; ce qui est difficile, à cause de la force avec laquelle il retient l'humidité. Plus tard, Pecelet a repris cette question. Il commença par constater que la déperdition de l'électricité est la même dans l'air et dans l'acide carbonique secs, au moyen de deux balances de torsion identiques, remplies l'une d'air, et l'autre, d'acide carbonique bien desséchés; résultat confirmé depuis par Matteucci (1639). Pecelet a disposé ensuite l'appareil (fig. 1241), dans lequel on peut faire tourner un cylindre *c* pressé par un coussin. Ce cylindre est renfermé dans un récipient de verre, dans lequel on peut faire le vide, et introduire différents gaz par le robinet *r*. Les quantités d'électricité recueillies au moyen des pointes et du conducteur *e*, ont été les mêmes, quand le vase était rempli d'air, d'hydrogène ou d'acide carbonique bien desséchés. L'électricité développée n'était donc pas due à une oxydation.

Les expériences de M. E. Becquerel, citées plus haut (1796), conduisent à la même conclusion; car, si les substances les plus oxydables donnent la plus

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXVI, p. 444.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 52.

grande tension, des matières très-différentes, comme le *talc*, la *farine*, la *plombagine*, en donnent aussi une très-grande, quoique très-douces au toucher et ne produisant pas d'actions chimiques pendant le frottement.

## II. Électricité produite par pression, clivage, etc.

**1805. PRESSION.** — Si l'on presse deux corps l'un contre l'autre et qu'on les sépare ensuite, on les trouve chargés d'électricités contraires. Ce fait a été découvert par *Æpinus*, sur deux plaques de verre. Plus tard, *Libes* ayant légèrement pressé un disque de laiton isolé, contre une feuille de taffetas gommé appliquée sur du bois, trouva, après la séparation, le métal électrisé *négativement*, et le taffetas *positivement*. Ce résultat ne peut être attribué à un frottement involontaire; car, si l'on frotte, le métal s'électrise positivement. Des disques d'argent, de cuivre, de zinc, etc., donnent les mêmes résultats.

*Bequerel* a reconnu qu'il se produit de l'électricité toutes les fois qu'un corps flexible est pressé contre un autre corps, et qu'on les sépare au moyen de manches isolants, pourvu que l'un au moins de ces corps soit mauvais conducteur. Il est probable que dans le cas où ils sont tous deux bons conducteurs, les électricités se séparent encore, mais qu'elles se recombinent aussitôt; on remarque, en effet, que les charges sont d'autant plus fortes, avec les corps un peu conducteurs, que la séparation est faite plus vivement. L'espèce d'électricité reçue par chaque corps dépend de sa nature et de celle de l'autre corps. Par exemple, le liège prend l'état négatif avec les minéraux à surface vitreuse, et le fluide positif, quand on l'appuie sur des disques de houille, succin, cuivre, zinc, argent, écorce d'orange, caoutchouc, poils d'animaux. La chaleur manifeste encore ici son influence ordinaire: le spath d'Islande chaud prend l'état négatif avec le liège; un disque de liège chaud s'électrise négativement quand on le presse sur un autre disque de liège froid. Il faut toujours que les surfaces soient bien desséchées.

**1806. Pression des cristaux.** — *Haüy* a découvert un autre mode d'électrisation par la pression<sup>1</sup>: ayant pressé entre ses doigts, pendant un temps très-court, une lame de spath d'Islande, il la trouva électrisée positivement. En la pressant entre deux morceaux d'étoffe ou de quelque autre matière flexible, il obtint le même résultat, mais moins prononcé. Les corps rigides, comme le bois, ne donnent aucun résultat; il faut que la substance puisse se mouler sur la surface du cristal en déplaçant les molécules, qui reviennent ensuite, par élasticité, à leur première position. Une foule de cristaux naturels s'électrisent comme le spath d'Islande. Il faut que les faces soient brillantes et polies comme celles que l'on obtient par le clivage. L'espèce d'électricité dépend à la fois de la nature du cristal et de la substance qui le presse.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 72.

Un fait remarquable, c'est que les cristaux qui s'électrisent par pression conservent leur électricité pendant longtemps. Le *spath d'Islande*, sur lequel Haüy a fait par hasard ses premiers essais, peut rester électrisé pendant 11 jours. La *topaze du Brésil*, la *chaux fluatée*, conservent leur électricité pendant quelques heures seulement; le *corindon*, l'*émeraude*, le *spinelle*, pendant 5 ou 6 heures; l'*aragonite*, qui a la même composition que le *spath d'Islande*, pendant 1 heure; le *crystal de roche*, le *diamant*, pendant 15 ou 20 minutes. Ces nombres ne sont qu'approximatifs, les résultats dépendant de la charge électrique. La *faculté conservatrice* de certains cristaux se manifeste encore quand l'électricité est produite par le frottement. Elle paraît due à la pénétration de l'électricité à une certaine profondeur au-dessous de la surface; car, si l'on appuie ces cristaux électrisés sur des corps bons conducteurs, si même on les plonge dans l'eau, ils restent encore électrisés.

**Aiguille électrique.** — Haüy a appliqué la faculté conservatrice du *spath d'Islande* à la construction d'un électroscope (fig. 1242) qui fait connaître immédiatement la nature de l'électricité. En *a* est une lame de *spath d'Islande* fixée à l'extrémité d'un levier mobile sur un pivot, et que l'on électrise positivement par la pression des doigts. On en approche ensuite les corps dont on veut connaître l'état électrique.

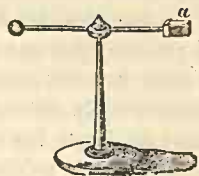


Fig. 1242.

**1807. Lois du dégagement de l'électricité par la pression.** — Becquerel<sup>1</sup> a trouvé que les tensions électriques de deux surfaces polies sont proportionnelles aux pressions qui les retenaient l'une contre l'autre, quand on les sépare assez vivement pour obtenir le maximum de charge électrique. Les charges étaient mesurées au moyen d'une balance de torsion, les pressions variant de 1 à 10<sup>kil</sup>. Cette loi est en contradiction avec l'indépendance entre la tension et la pression, trouvée par Pecclet; mais ce dernier physicien fait remarquer que les matières, comme le liège, dont se servait Becquerel cédaient et présentaient un nombre de points de contact augmentant avec la pression.

Le *spath d'Islande*, le *sulfate de baryte*, le *quartz hyalin*, et le *sulfate de chaux*, pressés sur du liège, ont pris des charges qui étaient entre elles comme les nombres 6; 4,2; 3,9; 1,9.

L'état de la surface a parfois une grande influence; c'est ainsi que le *spath d'Islande* dont les faces sont obtenues par clivage, s'électrise trois fois plus que celui dont les faces ont été polies artificiellement.

Remarquons que l'électricité de pression ne s'observe qu'après la séparation des surfaces en contact. Becquerel pense que la pression donne aux deux surfaces les fluides contraires, qui ne peuvent se réunir tant que dure la pression. Dès qu'on éloigne les deux corps, une portion seulement des fluides

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXI, p. 5.

se recombine, et l'on en conserve une quantité d'autant plus grande que la séparation est plus rapide. Ne peut-on pas supposer, au contraire, que, pendant la compression, il n'y a pas d'électricité libre, mais que c'est au moment de la séparation des surfaces, que l'ébranlement moléculaire, produit par l'élasticité, décompose le fluide neutre? Les expériences qui suivent semblent favorables à cette dernière explication.

**1808. ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LE CLIVAGE, ETC.** — On sait depuis longtemps que lorsqu'on détache par clivage, des lames de mica, elles répandent de la lumière visible dans l'obscurité. Quand on tient les lames que l'on veut séparer, par des tiges isolantes fixées avec de la cire, on les trouve électrisées d'une manière opposée, et d'autant plus, que la séparation est faite plus vivement. Becquerel<sup>1</sup> a vérifié cette propriété sur divers minéraux cristallisés bien desséchés : les sulfates de chaux et de baryte, le talc, des topazes... La galène, les pyrites, qui conduisent bien l'électricité, ne donnent aucun résultat. Quelque minces que soient les feuilles de mica enlevées, le phénomène se produit de la même manière; d'où Becquerel conclut qu'il aurait encore lieu dans la séparation de deux molécules. Les faces qui se séparent emportant des électricités opposées, les molécules doivent y être arrangées en couches, de manière à présenter sur une face, des points jouissant tous des mêmes propriétés, et sur l'autre face des points jouissant de propriétés aussi égales entre elles, mais différentes de celles de la première face. Quand on presse l'une sur l'autre les deux faces que l'on vient de cliver, pour les séparer ensuite, elles reprennent les électricités qu'elles avaient reçues par le clivage. Si l'on chauffe un peu la lame qui prend l'état négatif, le résultat est plus prononcé.

**Séparation des corps adhérents.** — Si l'on dédouble une carte à jouer, on trouve les deux moitiés électrisées d'une manière contraire. Si l'on coule du soufre, de la résine, de la gomme laque dans des vases coniques en verre, en bois, etc., et que l'on sépare des parois du vase la matière solidifiée, celle-ci s'électrise négativement, et le vase positivement. Le chocolat, l'acide phosphorique donnent des résultats analogues. Ce phénomène, découvert par Wilke, avait fait croire d'abord que la solidification des liquides produisait de l'électricité; mais Gay-Lussac a reconnu que la séparation de la substance solidifiée, soit par le retrait, soit par toute autre cause, précède toujours l'apparition de l'électricité. Van-Marum procédait en versant de la résine fondue sur du mercure, et l'en séparant ensuite. Le protochlorure de mercure sublimé et condensé dans le col d'un matras de verre, s'électrise aussi quand on l'en sépare mécaniquement.

**1809. ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR ÉBRANLEMENT DIRECT DES MOLÉCULES.** — Quand on écrase un corps, il produit souvent une lueur électrique visible dans l'obscurité. La craie produit cet effet, quand on l'écrase sous le marteau; le sucre, quand on l'écrase entre les doigts, même sous l'eau. Le choc des silex

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. II, p. 46, et t. XXXVI, p. 265.

produit aussi une lueur attribuée à la même cause. Pendant qu'un fil passe à la filière, il y a déviation dans l'aiguille d'un rhéomètre mis en communication avec ses extrémités; ici, il y a à la fois compression, frottement et déplacement permanent des molécules. Becquerel attribue à l'électricité dégagée par la compression, la lumière assez vive que répandent subitement les blocs de glace des mers polaires, quand ils se heurtent avec l'énorme puissance que comporte leur masse.

**Division, mécanique.** — Quand on lime, ou qu'on râcle certaines substances peu conductrices, comme le soufre, la résine, la cire, le suif, le chocolat....., les parcelles détachées, reçues sur le plateau d'un électroscope, sont électrisées, et, d'ordinaire, positivement. Les résultats varient, suivant que l'on râcle avec une lame tranchante, ou émoussée. Dans le premier cas, les parcelles de gomme laque ou de bois de hêtre chaud sont électrisées négativement, et positivement quand le tranchant est émoussé. Quand le bois est froid, les parcelles sont toujours négatives.

**Flexions.** — Peltier est parvenu à obtenir de l'électricité par de simples flexions produites dans un fil de cuivre. Les extrémités de ce fil, courbé en cercle et soutenu de distance en distance par des supports, étaient mises en communication avec un rhéomètre. Si l'on venait à infléchir successivement dans deux sens opposés, une des parties libres de ce cercle, on observait une déviation de l'aiguille du rhéomètre. Il arrive assez souvent qu'on n'obtient pas de résultat, probablement quand la flexion est symétrique de part et d'autre du point attaqué. Si, dans ce cas, on change la structure du fil près d'un des appuis, soit en l'écroutissant, soit en le recuisant, l'électricité se manifeste beaucoup plus facilement<sup>1</sup>. On peut aussi lui donner naissance en frottant le fil, comme pour le faire vibrer longitudinalement.

**1810. Vibrations.** — Il y a encore dégagement d'électricité dans les vibrations. M. Sullivan<sup>2</sup>, ayant fait vibrer un fil tendu, dont une moitié était en laiton et l'autre en fer, soudées bout à bout, vit une légère déviation dans l'aiguille d'un rhéomètre communiquant avec les extrémités du fil en vibration, déviation qui cessait en même temps que les vibrations. L'effet était plus marqué avec des barreaux de bismuth et d'antimoine, formant une longueur totale de 25<sup>cm</sup>, et qu'on fait vibrer par le choc d'une baguette de métal. Du fer à structure grenue, et du fer fibreux joints bout à bout, donnent des résultats semblables; ce qui montre que l'effet dépend de la différence de structure des deux corps, et de la manière dont les vibrations s'y propagent.

**Polarité électrostatique par les vibrations.** — M. Volpicelli a produit

<sup>1</sup> Ces expériences pourraient laisser des doutes, à cause de l'électricité d'induction qui peut naître dans le fil pendant qu'on le déplace, sous l'influence du magnétisme terrestre, comme nous le verrons plus tard. C'est pourquoi on fait plusieurs expériences, en orientant le cercle dans différents azimuts par rapport au méridien magnétique.

<sup>2</sup> Archives de l'électricité de A. de La Rive, t. V, p. 480.

de l'électricité polaire dans des conditions très-remarquables, au moyen de vibrations <sup>1</sup>. Ayant fait glisser des bâtons de verre, gomme laque, soufre, dans un ou plusieurs anneaux de métal isolés ou non, il trouva que ces bâtons présentaient à leurs extrémités des électricités contraires, séparées par une ligne neutre. L'extrémité qui marchait en avant pendant le glissement, était positive avec le verre, et négative avec les résines ou le soufre.

Pour trouver la cause de ce phénomène, M. Volpicelli recouvrit d'une couche de résine ou de soufre, sur une longueur de 30<sup>cm</sup>, l'extrémité d'un barreau de laiton de 1<sup>m</sup>,5 de longueur; la couche isolante avait  $\frac{1}{2}$ <sup>cm</sup> d'épaisseur, et était garnie d'une petite virole métallique. Quand le barreau, tenu par sa partie non recouverte, glissait dans un anneau, la virole, qui communiquait avec l'électroscope condensateur, ou l'électroscope (*fig.* 1239), était électrisée négativement quand elle se trouvait en avant, et positivement quand elle reculait. Quand le barreau glissait dans l'anneau isolé, pendant qu'on le tenait par la virole, il prenait l'électricité contraire à celle qu'eût prise la virole si elle eût été isolée. Les électricités recueillies dans les deux cas provenaient des fluides dégagés aux surfaces intérieure et extérieure de la couche résineuse, par les vibrations qui accompagnaient les frictions, puisque ces frictions ne s'exerçaient que sur la partie nue de la barre. Quand les deux extrémités étaient recouvertes en même temps d'une couche isolante, chacune d'elles éprouvait les mêmes effets que si elle eût été seule. — M. Volpicelli ayant remplacé la résine et le soufre par une enveloppe de verre, trouva des résultats semblables, seulement les électricités étaient distribuées en sens inverse. Ces résultats sont encore plus marqués quand l'anneau est de même matière que la barre, l'ébranlement étant alors plus prononcé; ce qui montre que l'électricité n'est pas due au frottement. Ils se produisent, mais à des degrés différents, avec des barres d'argent, de fer ou d'acier, et ne sont faciles à observer qu'autant que l'air est très-sec.

**1811. Électricité attribuée à la capillarité.** — Becquerel <sup>2</sup> a produit de l'électricité par le moyen suivant : on plonge dans de l'acide chlorhydrique contenu dans une cuiller de platine, un morceau d'éponge de platine fixé à une pince de même métal, communiquant avec la cuiller par le fil d'un rhéomètre. Aussitôt, on obtient un courant qui va de l'éponge à l'acide par le rhéomètre, et en sens contraire de ce qui aurait lieu si l'éponge était attaquée par l'acide. Ce courant, qui cesse bientôt, est moins prononcé quand l'acide est concentré que lorsqu'il contient 4 ou 5 fois son poids d'eau. On peut remplacer l'acide chlorhydrique par l'acide azotique, mais le courant, plus faible, présente son maximum quand l'acide est concentré. Quelquefois, il y a d'abord un courant inverse de celui que nous venons d'indiquer, mais il ne dure qu'un instant. Dans toutes ces expériences, il faut laver l'éponge et les surfaces de platine, à grande eau, puis dans l'acide azotique, que l'on fait ensuite disparaître par la chaleur.

<sup>1</sup> *Compt. rend. de l'Ac. des Sc.*, XXXVIII, 351 et 877, et *Bibl. de Gen.* (arch. des sc.), XXX.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXIV, p. 341.



Le charbon de bois dans l'acide nitrique et l'acide sulfurique, donne des résultats analogues à ceux de l'éponge de platine, et le courant, de sens contraire, est bien plus durable et peut persister pendant 12 heures. Les gaz condensés dans le corps poreux peuvent être la cause du courant qui se manifeste quand les liquides pénètrent dans les pores. La chaleur qui se dégage pendant la pénétration (II, 1276) peut aussi y contribuer; car, si l'on retire l'éponge de l'acide azotique concentré, et qu'on la chauffe légèrement pour l'y plonger de nouveau, on obtient un courant qui va de l'éponge à l'acide par le rhéomètre, et qui persiste tant que l'éponge est plus chaude que l'acide. Du reste, ces phénomènes sont encore très-obscur.

## § 2. — ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LES ACTIONS CHIMIQUES. — PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

### I. Galvanisme. — Pile de Volta.

**1812.** De même que les actions chimiques produisent de grandes quantités de chaleur, de même elles sont une source abondante d'électricité. Parmi les phénomènes chimiques, il faut distinguer l'action de certains liquides sur les métaux, qui donne lieu à un grand dégagement d'électricité, dont on a méconnu pendant longtemps l'origine, et qu'on a attribuée d'abord au simple contact de corps de nature différente. Volta a basé sur cette hypothèse toute une théorie ingénieuse, qui l'a conduit à créer un des instruments les plus merveilleux et les plus féconds en applications qui ait été mis entre les mains des physiciens. Cet instrument est la *pile de Volta*. C'est à Galvani qu'est due la découverte des phénomènes remarquables qui ont provoqué les recherches de Volta; c'est pourquoi on a donné le nom de *galvanisme* à la branche d'électricité qui a pris naissance à la suite de ces admirables recherches. Nous allons d'abord faire connaître les faits découverts par Galvani et par Volta; nous montrerons ensuite comment ils s'expliquent par l'électricité qui se dégage dans les actions chimiques.

**1813. Expérience de Galvani.** — En 1780, Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, étudiant l'influence de l'électricité sur les nerfs, remarqua par hasard, dans les membres dépouillés d'une grenouille fraîchement tuée, des convulsions qui se manifestaient au moment où l'on déchargeait une machine électrique peu éloignée. Ce n'était là qu'un effet de *choc en retour*, bien connu de Galvani, quoiqu'on ait dit le contraire. Il se mit aussitôt à étudier les circonstances du phénomène sur divers animaux à sang chaud et à sang froid, dans le désir de prouver l'identité du fluide nerveux et de l'électricité. Il consacra six années à ce travail<sup>1</sup>.

Dans le cours de ces recherches, en 1786, voulant voir quels effets produirait

<sup>1</sup> Gavarret, *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXV, p. 58.

la décharge des nuages orageux, il suspendit à un balcon de la terrasse du palais Zambeccari, les membres inférieurs d'une grenouille, au moyen d'un crochet de cuivre qui traversait la moelle épinière, et vit, avec une vive surprise, ces membres s'agiter convulsivement en l'absence de tout orage. Il remarqua bientôt que cela avait lieu au moment où les membres venaient accidentellement toucher le fer du balcon. Il put dès lors répéter l'expérience aussi souvent qu'il voulut, et se trouva en possession d'un fait nouveau, inattendu, qui est devenu le point de départ d'une longue suite de brillantes découvertes, et l'origine d'une partie des plus étendues et des plus importantes de la physique.

Cette expérience fut bientôt connue du monde savant, et chacun s'empressa de la répéter. On se rappela que Sulzer, en 1767, avait vu deux disques métalliques différents appliqués l'un au-dessus de la langue, l'autre au-dessous, produire une saveur acide ou amère, quand on les joignait par leur bord extérieur.

On sut aussi qu'un étudiant de Bologne avait éprouvé une légère commotion à la main en disséquant une souris.

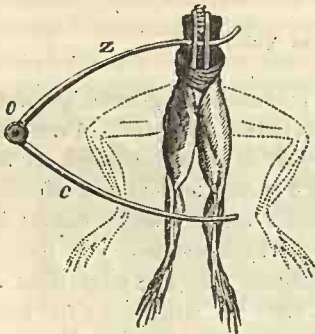


Fig. 1243.

Galvani remarqua que les contractions n'avaient lieu qu'au moment où un arc conducteur établissait une communication entre les muscles et les nerfs lombaires de la grenouille. Il constata que ces contractions étaient bien plus vives quand l'arc était formé de deux métaux différents placés l'un à la suite de l'autre. On reconnut aussi plus tard que la communication entre les deux métaux pouvait être établie par plusieurs personnes se donnant la main.

Pour répéter l'expérience de Galvani, on coupe en deux, avec des ciseaux, une grenouille vivante, vers la région lombaire. On dépouille les membres inférieurs, et l'on met à découvert les deux faisceaux de nerfs qui se voient de chaque côté de la colonne vertébrale (fig. 1243). On engage sous ces faisceaux l'une des branches d'un conducteur articulé *zoc*, formé de deux métaux différents, par exemple de cuivre *c*, et de zinc *z*, et l'on appuie l'autre branche sur les jambes pendantes; on voit aussitôt ces membres s'agiter convulsivement. Au lieu de cet arc, on peut employer deux disques de métaux différents: on appuie le bord de l'un d'eux sur les muscles lombaires, le bord de l'autre sur les nerfs, puis on rabat l'un des disques sur l'autre de manière à le lui faire toucher; aussitôt les mouvements se manifestent. Au bout de quelque temps, la raideur cadavérique empêche les contractions. Les animaux à sang froid conviennent le mieux, pour ces sortes d'expériences, leurs muscles étant plus excitables, et conservant plus longtemps leur irritabilité.

**1814. Théorie de Galvani.** — Pour expliquer les contractions de la grenouille, Galvani supposa qu'il y avait dans les nerfs une électricité propre

aux animaux, et que ce *fluide vital*, passant des nerfs dans les muscles par l'arc métallique, produisait la commotion. Il assimilait ainsi le corps de la grenouille à une bouteille de Leyde, dont les muscles et les nerfs formeraient les armatures; et qui serait chargée d'un fluide analogue à l'électricité, et qu'on a nommé depuis *fluide galvanique*.

Cette théorie eut d'abord un grand succès; mais elle fut bientôt abandonnée. Volta, professeur à Pavie, répétait avec soin toutes les expériences de Galvani, et, frappé de la nécessité d'employer deux métaux différents pour obtenir des contractions prononcées, il combattit l'explication de Galvani, qu'il avait d'abord adoptée. Il soutint que, le corps de la grenouille ne jouant dans le phénomène qu'un rôle passif, l'électricité dont on observait les effets prenait naissance dans l'arc de communication. Il avança que le *contact* entre les molécules différentes des deux métaux qui composent cet arc, détruisait l'équilibre du fluide neutre; l'un des métaux étant électrisé positivement, et l'autre négativement. Les deux fluides se recombinaient ensuite à travers les membres de la grenouille, y déterminaient des contractions.

Galvani et ses partisans se défendirent avec ardeur; voulant prouver qu'un seul métal suffisait pour produire des contractions, ils n'en obtinrent que de très-faibles. Hallé et Wels objectèrent que les métaux communs ne sont pas purs, et montrèrent que les contractions deviennent plus fortes, quand on a frotté une des extrémités de l'arc avec un autre métal. Galvani montra alors que des membres de grenouille étendus sur du mercure éprouvent de légères agitations au bout des doigts, et comme on objecta que les couteaux avaient laissé quelques parcelles de métal sur les muscles, il employa des couteaux de verre, et fit voir que les résultats restaient les mêmes. Aussitôt on trouva dans l'humidité déposée sur le mercure aux points touchés par les membres frais, la cause des faibles mouvements observés. La discussion continuait ainsi avec des chances diverses; les expériences se multipliaient, on les variait de toutes les manières, lorsque Galvani, expérimentant avec son neveu Aldini, reconnut qu'il suffisait de mettre en contact avec les nerfs lombaires, quelques parties des muscles, pour obtenir des contractions sensibles, et il crut bien, cette fois, avoir fermé la bouche à ses adversaires. Mais, tout au contraire, Volta trouva dans ce fait une généralisation de son principe: il n'y avait pas que les métaux en contact qui pussent développer de l'électricité, tous les corps conducteurs étaient dans le même cas. La discussion dura ainsi depuis dix ans, quand Plaff, professeur à Kiel, ou, suivant d'autres, Volta et Fowler, reconnurent que les convulsions se produisent aussi bien au moment où l'on *supprime* la communication, qu'au moment où on l'établit. Ce résultat, inexplicable dans la théorie de Galvani, la fit dès lors abandonner, et les idées de Volta furent généralement adoptées.

**1815. Expériences de Volta.** — Volta chercha, par un grand nombre d'expériences, à prouver directement qu'il se produit de l'électricité dans le contact des métaux. Il se servit pour cela principalement, de cuivre en contact avec du zinc ou de l'argent, ayant remarqué que ces métaux produisent de fortes

contractions galvaniques. Il prit d'abord deux disques, l'un de zinc, l'autre de cuivre, isolés par des manches de verre, les appuya l'un sur l'autre, les sépara, et fit toucher le disque de cuivre au plateau collecteur de l'électromètre à condensateur (*fig. 1244*), dont l'autre plateau communiquait avec le sol. Ayant déchargé le disque de zinc, il répéta l'expérience une seconde fois, puis une troisième....., et il vit les feuilles d'or s'écarter, quand ensuite il enleva le plateau supérieur. Il reconnut ainsi que le cuivre s'était électrisé négativement, et le zinc, positivement.

Comme on pouvait objecter que l'électricité était produite par le frottement ou la pression des deux disques, Volta fit souder l'une au bout de l'autre une lame de zinc et une lame de cuivre, *zc* (*fig. 1244*), prit la première entre ses doigts, et appuya l'autre sur le condensateur de l'électromètre. Au bout de quelque temps, il trouva les feuilles d'or chargées de fluide positif; d'où il conclut que le plateau collecteur avait reçu de l'électricité négative. — Pour recueillir la positive qui se porte sur le zinc, on tient le cuivre avec la main, et l'on fait communiquer le zinc avec le plateau de l'électromètre; seulement, il faut que ce dernier soit en zinc, ou, s'il est en cuivre, qu'il soit séparé de la lame de zinc par du papier mouillé. Sans cette précaution, il y aurait deux points où du zinc serait en contact avec du cuivre, et les effets se contrarieraient.

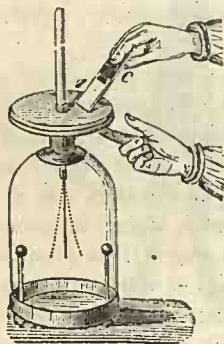


Fig. 1244.

Au lieu de tenir l'une des lames avec les doigts pour la faire communiquer avec le sol, on peut se contenter de lui donner une très-grande surface, sur laquelle le fluide se répand, ou la faire communiquer avec l'intérieur d'une bouteille de Leyde non isolée.

**1816. Force électromotrice.** — Volta crut pouvoir conclure de ses expériences, qu'il se développe de l'électricité au contact des corps conducteurs, qu'il nomme, à cause de cette propriété, *corps électromoteurs*. Les métaux sont les meilleurs *électromoteurs*. Les liquides en contact avec les métaux ne sont pas électromoteurs, suivant Volta, ou du moins le sont à peine. L'électricité attribuée au contact a été appelée *électricité voltaïque*, et Volta a donné le nom de *force électromotrice* à la cause inconnue qui agirait au contact pour décomposer le fluide neutre; il s'est appliqué à déterminer les propriétés et la manière d'agir de cette force, et est arrivé aux résultats suivants :

- 1<sup>o</sup> La force électromotrice décompose le fluide neutre qui existe à la surface de contact des deux métaux; elle chasse sur l'un d'eux le fluide positif provenant de cette décomposition, et sur l'autre, le fluide négatif; —
- 2<sup>o</sup> Cette force s'oppose à la recomposition des fluides à travers la surface de contact; —
- 3<sup>o</sup> Elle est limitée et ne peut décomposer et maintenir décomposée qu'une quantité déterminée de fluides, présentant une différence maximum de tension

(nous dirions aujourd'hui une différence de potentiel) qui ne peut être dépassée, mais qui est toujours atteinte dans un temps insensible; — 4<sup>o</sup> L'effet est indépendant du nombre de points de contact, un seul donnant le même résultat qu'une large surface.

Cela posé, considérons deux corps différents, de même surface  $S$  isolés et en contact; par exemple, une lame de zinc et une lame de cuivre. Le zinc prendra une tension  $+\frac{1}{2}a$  d'électricité positive, et le cuivre une tension  $-\frac{1}{2}a$  de fluide négatif, de manière que la différence algébrique des tensions des deux lames sera égale à  $a$ , quantité dépendant de la nature des corps en contact. Si l'on fait communiquer le cuivre avec le sol, il perdra son électricité, la force électromotrice ne sera plus contrebalancée par l'attraction mutuelle des deux fluides, de nouvelle électricité se produira instantanément et donnera au zinc la tension  $a$ , de manière que la différence de tension des deux lames soit toujours égale à  $a$ . Si ensuite, le cuivre étant isolé, on fournit de nouvelle électricité au zinc, celle-ci ne pourra être arrêtée par la force électromotrice, et se répandra uniformément sur les deux lames, en y apportant une augmentation de tension  $b$ ; de manière que, la tension étant  $a + b$  sur le zinc, et  $b$  sur le cuivre, la différence soit toujours égale à  $a$ .



Fig. 1245.

Si les plaques isolées et en contact ont des surfaces inégales,  $S, S'$ , on calculera les tensions  $x, y$  sur ces lames, en remarquant que les quantités d'électricité doivent être égales sur les deux surfaces, et qu'elles sont proportionnelles, sur chaque surface, à son aire et à la tension. On aura donc  $Sx = S'y$ . De plus, la différence algébrique des tensions devant toujours être égale à  $a$ , on aura  $x + y = a$ ; ces deux équations donneront les valeurs de  $x$  et de  $y$ . — C'est en partant des considérations qui précèdent que Volta a été conduit à la découverte de l'appareil admirable qui porte son nom.

**1817. PILE DE VOLTA.** — Considérons un disque de cuivre  $c$  communiquant avec le sol, et sur lequel soit posé un disque de zinc  $z$  (fig. 1245). La force électromotrice agissant au contact  $n$ , poussera sur  $c$  du fluide négatif qui passera dans le sol, et sur  $z$  du fluide positif qui atteindra immédiatement le maximum de tension  $a$  dont est capable la force électromotrice. Plaçons un second disque de cuivre au-dessus du zinc, en ayant soin de l'en séparer par une rondelle de drap imbibée d'eau acidulée, qui constitue un bon conducteur non électromoteur. La tension en  $z$  sera diminuée, mais elle sera rétablie aussitôt par une nouvelle décomposition en  $n$ , de manière que la tension soit  $a$ , en  $z$  et  $c'$ . Si maintenant nous plaçons sur  $c'$  un autre zinc  $z'$ , la force électromotrice en  $n'$  poussera du fluide positif en  $z'$ , et du fluide négatif en  $c'z$ ; celui-ci diminuera la tension  $a$ ; mais elle sera aussitôt rétablie par l'action qui s'exerce en  $n$ . Or la force électromotrice en  $n'$  ne sera satisfaite que lorsque la tension en  $z'$  dépassera de  $a$  celle qui existe en  $c'$ , c'est-à-dire quand la tension en  $z'$  sera  $2a$ . — Cette

tension sera diminuée, si l'on pose sur  $z'$  une nouvelle rondelle de drap et un nouveau disque de cuivre  $c''$ , mais elle sera aussitôt rétablie par l'action qui s'exerce en  $n'$ , laquelle produira en même temps du fluide négatif qui viendra en  $c'z$  diminuer la tension  $a$ ; tension aussitôt rétablie par la force qui réside en  $n$ . On verrait de même que la tension serait  $3a$  sur un 3<sup>e</sup> zinc, et en général  $na$  sur le  $n^{\circ}$  zinc. On pourra donc obtenir une très-forte tension à la partie supérieure, en empilant un grand nombre de disques.

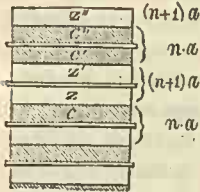


Fig. 1246

Si au lieu de commencer par un disque de cuivre communiquant avec le sol, nous avions commencé par un disque de zinc, le système aurait contenu du fluide négatif, au lieu de fluide positif, avec une tension proportionnelle sur chaque disque à son rang dans la série.

**Remarque.** — Il faut toujours placer les disques dans le même ordre. Si cet ordre était interverti entre deux disques en contact, ils détruiraient l'effet des deux disques précédents, et il y en aurait ainsi quatre d'inutiles. En effet, plaçons sur le disque de cuivre  $c$  dont la tension est  $na$  (fig. 1246), un zinc  $z$ , puis un couple renversé  $z'e'$ ; la tension sera  $(n + 1)a$  sur  $z$  et sur  $z'$ , et comme la tension sur le cuivre  $c'$  doit toujours être moindre que sur le zinc en contact  $z'$ , de la quantité  $a$ , la tension sur  $c'$  sera  $na$ . Si ensuite on rétablit l'ordre primitif entre les disques, la tension de  $c''$  sera  $na$ , et sur  $z''$ ,  $(n + 1)a$ , comme si les disques  $c$ ,  $z$ ,  $z'$   $c'$  n'existaient pas.



Fig. 1247.

**1818. Définitions.** — Le système de disques empilés toujours dans le même ordre, tel que nous venons de le décrire, se nomme *pile de Volta*, ou encore *pile galvanique*, quoique Galvani, mort en 1798, n'ait pas eu le bonheur de voir cet appareil, dont ses expériences avaient amené la découverte. On voit d'où vient le nom de *pile*; ce nom lui a été conservé, quoiqu'on en ait beaucoup changé la forme, et qu'elle ne ressemble plus à une colonne de lames empilées.

La réunion d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre forme un *couple*, une *paire* ou un *élément* de la pile. La figure 1247 représente l'ensemble de la pile, nommée *pile à colonne*. Trois tiges de verre la soutiennent latéralement. Les disques doivent être bien décapés du côté où ils se touchent; souvent on les soude deux à deux, ce qui dispense de les nettoyer chaque fois que l'on monte la pile. Les rondelles de drap ou de carton sont mouillées avec de l'eau salée, ou acidulée par de l'acide sulfurique. Ce liquide attaquant le zinc bien plus que le cuivre, on donne au zinc une plus grande épaisseur qu'au cuivre.

Les extrémités de la pile se nomment ses *pôles*; on distingue le *pôle positif* et le *pôle négatif*. On attache aux disques extrêmes des fils métalliques nommés les *rhéophores* de la pile. Leurs extrémités se nomment les *électrodes*, *positive*

et négative, de la pile, parce que c'est par là que sort l'électricité pour pénétrer dans les corps sur lesquels on veut la faire agir. Ces électrodes portent aussi, par extension, le nom de *pôles*.

**1819. Pile en activité.** — Si l'on réunit les deux pôles de la pile par un fil métallique, il se fait aussitôt, dans tous les couples, un mouvement continu d'électricité, qui fait dire que la pile est *en activité*. Soit  $b$  la quantité d'électricité positive qui passe du pôle supérieur  $z'''$  dans le fil conjonctif  $o'f'$  (fig. 1245). La tension de  $z'''$  ne sera plus égale à  $4a$ ; alors la force électromotrice agira en  $n'''$  pour remplacer la quantité  $b$ , en produisant en même temps une quantité  $-b$  de fluide négatif, qui viendra diminuer de  $b$  la tension de  $c'''z'''$ . Cette tension sera aussitôt rétablie par la force électromotrice qui agit en  $n''$ , et en même temps la tension  $2a$  en  $c''z'$  sera diminuée, puis rétablie par l'action qui s'exerce en  $n'$ ; et ainsi de suite jusqu'au dernier couple  $ze$ , dont le cuivre  $e$  recevra la quantité  $-b$  de fluide négatif; ce fluide passera dans le fil conjonctif, vers lequel il est attiré par le fluide positif  $+b$  qui vient de  $o'$ , et il s'unira à ce dernier, pour former du fluide neutre. Ces décompositions et recompositions se reproduisent continuellement tant que la communication reste établie entre les deux pôles, et d'autant plus rapidement que les rondelles de drap laissent plus facilement passer l'électricité. Le fil conjonctif est en même temps le siège d'un mouvement des deux fluides qui s'y combinent pour reformer du fluide neutre.

Si l'on établit la communication entre les pôles au moyen des bras, on ressent une commotion, d'autant plus forte que le nombre de couples est plus grand. Cette commotion peut être renouvelée aussi souvent que l'on veut, la pile se comportant comme une bouteille de Leyde qui se rechargerait d'elle-même aussitôt qu'on l'a déchargée. Au moment où l'on rapproche les extrémités des rhéophores  $f, f'$  (fig. 1245), on voit jaillir une étincelle, quand la distance est assez petite; distance qui dépend de la tension ou du nombre des couples.

**1820. Pile isolée.** — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé la pile en communication avec le sol par l'un de ses pôles. Supposons-la maintenant isolée. Pour trouver la distribution de l'électricité entre les divers couples, il suffira de considérer deux piles égales non isolées, commençant en bas, l'une par le cuivre, et l'autre par le zinc. La première contiendra du fluide positif, et la seconde du fluide négatif. Si, renversant cette dernière, on applique son zinc inférieur sur le cuivre du bas de la première, en ayant soin d'interposer une rondelle de drap, on formera une pile unique ayant tous ses disques dans le même ordre, et dont une moitié sera chargée d'électricité positive, et l'autre d'électricité négative; car les disques du milieu étant à l'état neutre, rien ne sera changé dans l'état électrique de tous les autres. On voit que la tension aux pôles ne sera que la moitié de celle d'une des extrémités d'une pile non isolée ayant le même nombre de couples.

Quand on met la pile isolée en activité, les phénomènes se passent dans chaque moitié comme dans la pile non isolée; seulement les fluides, en même quantité, qui arrivent dans la rondelle du milieu, s'y neutralisent, au lieu de passer dans

le sol. Du reste, quand la pile non isolée est en activité, l'électricité ne tarde pas à s'y distribuer, comme dans la pile isolée, de manière que les deux moitiés renferment des électricités contraires, et que la rondelle du milieu soit à l'état naturel.

**1821. DIFFÉRENTES DISPOSITIONS DES PILES.** — La pile à colonne (fig. 1247) présente divers inconvénients : elle est longue à monter, et le poids des disques

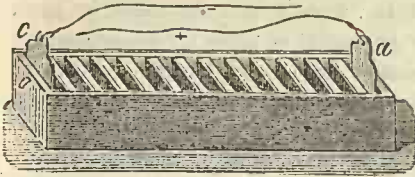


Fig. 1248. — 1/6.

comprime les rondelles et en exprime le liquide. On a imaginé diverses dispositions destinées à rendre l'appareil plus commode et à en augmenter l'énergie.

**Pile à auge, ou de Cruikshank.** — Dans cette pile, les couples, formés de deux plaques rectangulaires zinc et cuivre appliquées et soudées l'une sur l'autre, sont placés parallèlement dans une auge de bois qu'elles divisent en compartiments égaux (fig. 1248) et dont un mastic résineux les isole. On remplit les compartiments d'eau acidulée, et des lames de cuivre *a* et *c*, munies de fils rhéophores, reçoivent les électricités des compartiments extrêmes, la positive étant du côté du zinc, *a*. Quand on ne veut plus se servir de la pile, on renverse le liquide, et on lave les couples à grande eau.

**Pile à couronne de tasses.** — Chaque couple de cette pile, imaginée par Volta, se compose d'une bande formée de cuivre *c* et de zinc *z* (fig. 1249),

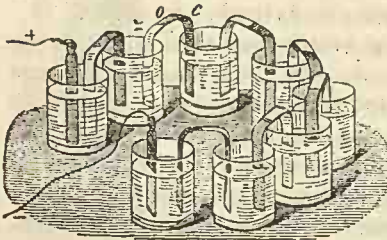


Fig. 1249.

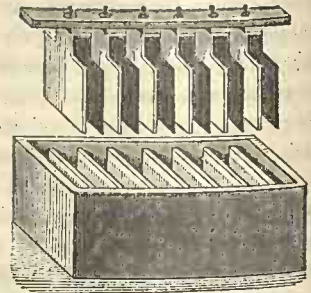


Fig. 1250.

soudés l'un à l'autre en *o*, et repliée en U. Des tasses, placées les unes à la suite des autres, contiennent de l'eau acidulée, et chacune d'elles reçoit une branche cuivre et une branche zinc, appartenant à deux couples voisins. Ces branches, qui ne doivent pas se toucher, communiquent par l'eau acidulée. Les électricités qui s'accablent dans les vases extrêmes sont reçues par des lames de cuivre, munies de fils rhéophores. Avec une centaine de couples, on éprouve des commotions assez fortes, quand on plonge les doigts dans les vases extrêmes.



La pile à couronne est longue à monter. On simplifie l'opération, en fixant les couples à une barre de bois (fig. 1250), et on les plonge dans une auge partagée en compartiments égaux isolés, dont chacun reçoit une lame de zinc et la lame de cuivre du couple suivant. En 1806, l'Institut royal de Londres fit établir dans ce système 200 auges donnant en tout 2000 couples. Cette pile, célèbre par les expériences de Davy, était renfermée dans une cave, dont les rhéophores traversaient la voûte, afin que les gaz et les vapeurs acides se dégageant d'un aussi grand nombre d'éléments ne pussent incommoder. Children a fait construire dans ce même système, une pile remarquable par l'intensité de ses effets, composée de 20 couples ayant chacun 1 mètre carré de surface environ.

**Pile de Wollaston.** — Wollaston ayant reconnu qu'il y a beaucoup d'avantage

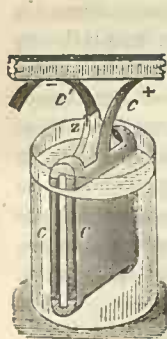


Fig. 1251.

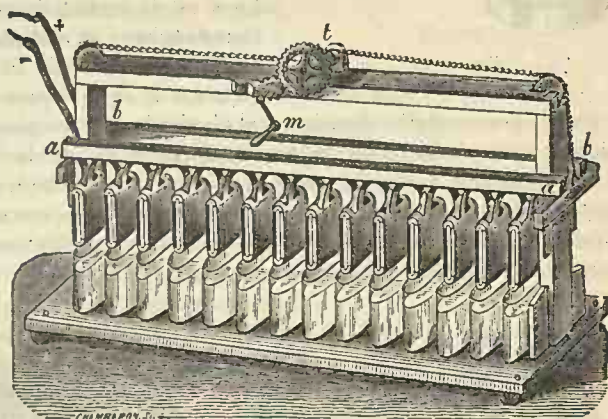


Fig. 1252.

à donner au cuivre une plus grande surface qu'au zinc, a recourbé la lame de cuivre *ccc* (fig. 1251) de manière à envelopper la lame de zinc *z*, qui est soudée au cuivre *c'* de l'élément suivant. De petits morceaux de bois placés en haut et en bas séparent les deux lames. Le cuivre est fendu en dessous, pour faciliter la circulation du liquide. La figure 1252 représente l'ensemble d'une pile de Wollaston de 28 couples, fixés en deux rangées, sur les barres de bois *aa*, *bb* que l'on peut soulever, au moyen de chaînes qui passent sur des poulies et s'enroulent sur un treuil *t*, que l'on fait mouvoir au moyen de la manivelle *m*. — Quand on abaisse les couples, chacun d'eux plonge dans un vase plein d'eau acidulée contenant  $\frac{1}{10}$  d'acide sulfurique et  $\frac{1}{20}$  d'acide nitrique en poids. Tantôt les deux séries forment une pile de 28 éléments repliée en deux; alors les deux pôles sont d'un même côté de l'appareil; tantôt elles forment une pile de 14 éléments d'étendue double, et alors les deux pôles sont aux extrémités opposées, et les éléments sont tournés de la même manière dans les deux moitiés.

**Pile en hélice.** — Quand on a besoin d'éléments à très-grande surface, on emploie la *pile en hélice*, imaginée par Hare. Pour construire un couple de cette pile, on enroule en spirale autour d'un cylindre de bois *r, r* (fig. 1253), une lame de zinc et une lame de cuivre, en ayant soin de les séparer par des bandes de drap, ou par des baguettes d'osier. Les deux faces de la lame de zinc se

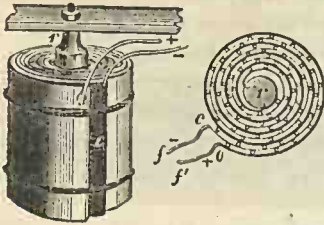


Fig. 1253.

trouvent ainsi presque partout en présence du cuivre, et réciproquement, comme on le voit dans la coupe transversale *or*, où le trait fort représente le zinc. Quand on veut se servir de ce couple, on le plonge dans un tonneau rempli d'eau acidulée. Les lames de zinc et de cuivre sont munies de fils *f, f'*. En *o* est le contact des deux métaux; la lame de cuivre *c* est destinée, dans la théorie de Volta, à recueillir l'électricité qui se porte sur le zinc, et passe sur cette lame *e*

à travers l'eau acidulée. Quand on veut réunir plusieurs couples, on fait communiquer, au moyen de larges bandes de cuivre, le zinc de chacun d'eux avec le cuivre du suivant. Ces couples sont fixés à des barres de bois, que l'on élève ou que l'on abaisse à volonté, au moyen d'un treuil disposé d'une manière analogue à celui de la figure 1252. — Hare a construit un appareil semblable, qu'il a nommé *calorimoteur* ou *déflagrateur*, à cause de l'intensité de ses effets calori-

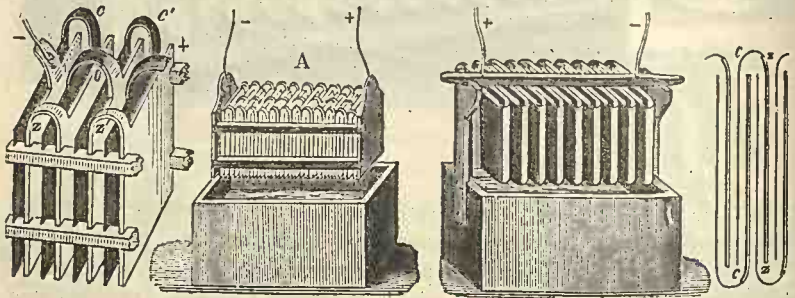


Fig. 1254.

Fig. 1255.

ques. Pouillet a fait construire, pour la Faculté des sciences de Paris, une pile en hélice de 12 couples, dont les lames ont chacune 5 à 6 mètres carrés de surface. Les couples sont fixes, et les seaux pleins d'eau acidulée sont placés sur un plancher qu'on soulève au moyen de chaînes, de manière à envelopper les couples de liquide.

**Pile d'Young.** — Cette pile dont le principe est dû à Faraday, se compose de lames de zinc et de cuivre découpées et repliées comme on le voit en *z, z', c, c'* (fig. 1254), où les lames de cuivre sont ombrées. Chaque lame de zinc

porte un appendice *o*, qui est soudé à un appendice semblable de la lame de cuivre suivante. Ces lames sont engagées les unes dans les autres, de manière que chaque zinc se trouve entre deux cuivres, et réciproquement. 50 couples peuvent ainsi n'occuper que 25<sup>cm</sup>. On voit en A l'ensemble de cette pile; on la plonge toute entière dans une seule auge; ce qui montre que le liquide ne joue pas uniquement le rôle de conducteur.

**Pile de Muncke.** — Dans cette pile, plus simple que la précédente, les lames de zinc et de cuivre, dont on voit une coupe horizontale en *c z c z* (fig. 1255), sont soudées suivant des lignes verticales, et pliées en forme d'U; elles sont maintenues en dessus et en dessous par des barres de bois, comme on le voit à gauche. Les piles d'Young et de Muncke permettent de réunir un grand nombre d'éléments sous un petit volume.

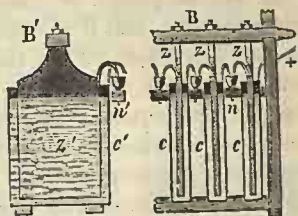
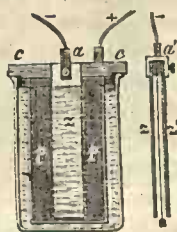


Fig. 1256.

**Pile d'Ersted.** — Dans cette pile, l'un des métaux forme le vase qui contient l'eau acidulée. Des vases étroits en cuivre *c, c, c; c'* (fig. 1256), contiennent ce liquide, dans lequel plongent, sans toucher le cuivre, des lames de zinc *z, z, z; z'*. Chaque vase communique avec le zinc du vase suivant, par des crochets s'enfonçant dans de petits godets de fer *n, n'*, remplis de mercure. Il suffit de soulever ou d'abaisser la barre de bois *B, B'*, à laquelle sont fixées les lames de zinc, pour faire fonctionner la pile, ou la mettre au repos.

**1822. PILES CONSTANTES A UN SEUL LIQUIDE.** — Les piles que nous venons de décrire éprouvent, quand elles sont mises en activité, un affaiblissement rapide dont nous discuterons plus tard les causes (1852), et qui est dû entre autres à l'adhérence de gaz hydrogène à la surface du cuivre. Dans les piles suivantes, on cherche à combattre cet inconvénient.

**Pile de Smée.** — La figure 1257 représente un élément de cette pile, vu de face et de profil. Deux plaques de zinc *z, z z'* sont réunies par le haut, et serrées, au moyen d'une pince à vis *a, a'*, contre une règle de bois *cc*. Cette règle est composée de deux parties, entre lesquelles est serrée, par son bord supérieur, une lame de platine *pp*, trois fois plus large que les plaques de zinc. Comme la lame de platine, par économie, est très-mince, on la soutient par un cadre de bois. Le couple plonge dans de l'eau renfermant à peu près  $\frac{1}{2}$  d'acide sulfurique. Le platine est *platiné*, c'est-à-dire recouvert de poudre de platine qui empêche l'hydrogène d'adhérer, ou fait que la couche d'hydrogène adhérente reste toujours la même. Il résulte de là que l'électricité se dégage d'une manière sensiblement constante.

Fig. 1257. —  $\frac{1}{10}$ .

Pour platiniser la lame, on la plonge, bien décappée, dans une dissolution de

chlorure double de platine et de potassium, et on la fait communiquer avec le pôle négatif d'une pile; dont le pôle positif communique avec la dissolution. Le chlorure est décomposé par le courant de la pile, et le platine se dépose sous forme de poudre noire, sur la lame de platine, qui reçoit l'électricité positive.

Au lieu de platine, M. Smée a aussi employé du plaqué d'argent, comme moins coûteux; mais il se prête moins au platinage, à cause de son poli. — M. Boquillon dépose sur une lame de cuivre, par décomposition d'un sel, une couche de cuivre, qui rend la surface rugueuse, et par-dessus, une couche d'argent, qui se trouve ainsi couverte d'aspérités, et il précipite le platine en poudre sur la surface argentée ainsi obtenue. — Enfin, Poggendorff a simplement remplacé le platine platiné, par une lame de cuivre couverte d'une couche de cuivre pulvérulent. — Pour que cette pile donne beaucoup d'électricité, il faut que le zinc soit *amalgamé*, c'est-à-dire imprégné de mercure, dont nous verrons plus tard le rôle (1851).

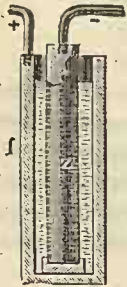


Fig. 1258. — 1/6.

**Pile Tyer.** — La pile Smée a été rendue très-économique par M. Tyer, sous la forme suivante. Au fond d'un vase de verre, sont des fragments de zinc, ordinairement débris de vieilles piles, baignés dans du mercure, et à l'un desquels est fixé le fil rhéophore négatif. Le rhéophore positif est porté par une barre qui soutient la lame platinée. Cette pile, employée en Angleterre pour le service télégraphique des chemins de fer, fonctionne pendant des années sans qu'on ait besoin d'y toucher, quand elle est renfermée dans une boîte bien close.

**Pile de Sturgeon.** — Dans un vase cylindrique en fonte de fer *f* (fig. 1258), est de l'eau contenant  $\frac{1}{6}$  d'acide sulfurique. Dans ce liquide, plonge un cylindre de zinc amalgamé *z*, appuyé sur une rondelle de bois. Des tiges de cuivre sont vissées au cylindre de zinc et au vase de fonte; la première va s'adapter au vase de fonte du couple précédent. Quand le vase de fonte est devenu rugueux par l'oxydation, l'hydrogène n'adhère pas à la surface du vase. — M. Caillaud a imaginé, de son côté, un couple qui ne diffère de celui-ci que par la forme, qui est aplatie au lieu d'être cylindrique. Parmi les liquides qu'il emploie, nous citerons l'acide chlorhydrique, et l'acide sulfurique étendu de 3 à 4 parties d'une dissolution concentrée de sel marin.

**Piles lentes.** — On rend la plupart des piles à peu près constantes, en employant un liquide tel qu'elles ne donnent que très-peu d'électricité, de manière que les matières déposées sur les lames puissent se dissoudre au fur et à mesure. Par exemple, on a longtemps employé, pour les télégraphes électriques, des piles du modèle (fig. 1250) dont les lames étaient enfoncées dans du sable mouillé d'eau acidulée. La pile suivante est aussi une *pile à sable*.

**Pile de Bagration.** — Le prince de Bagration a imaginé des couples à action lente, pouvant fonctionner longtemps en conservant une constance remarquable. Une lame de zinc *z* (fig. 1259) et une lame de cuivre *c* plongent sans se toucher dans un vase rempli de sable mouillé avec une dissolution de chlorhy-

drate d'ammoniaque. Le courant dure jusqu'à la destruction du zinc, quand on a soin d'arroser de temps en temps le sable avec la dissolution. On peut réunir plusieurs couples disposés d'une manière concentrique dans un même vase, ou ayant chacun un vase séparé. Ces vases sont quelquefois des tonneaux, et l'on a alors des couples à très-grande surface.

M. Bain, M. Loomis,..... ont aussi obtenu des courants d'électricité en enfouissant simplement les lames métalliques dans le sol humide, dans la mer.....

**1823. Piles au charbon.** — Grove ayant reconnu, en 1839, que la plombagine artificielle que l'on trouve dans les cornues où l'on prépare le gaz, d'éclairage conduit assez bien pour qu'on puisse la substituer au cuivre ou au platine, on a construit des piles voltaïques avec ce charbon, qui, étant poreux, ne retient pas l'hydrogène et présente une grande surface au liquide.

**Pile Palagi.** — Cette pile qui dure très-longtemps, se compose d'un vase profond contenant de l'eau, pure ou salée, dans laquelle s'enfonce une longue bande de zinc, et une chaîne formée de morceaux de charbon de cornues, suspendus les uns aux autres par des fils de cuivre. Le courant est faible, mais il dure indéfiniment, si l'on a soin de remplacer l'eau qui s'évapore.

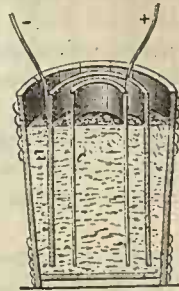


Fig. 1259.

**Pile simple à bichromate de potasse.** — Le couple de cette pile se compose d'une lame de zinc amalgamé placée entre deux plaques de charbon de cornue, et plongeant dans une dissolution aqueuse contenant  $\frac{1}{20}$  de bichromate de potasse et  $\frac{1}{20}$  d'acide sulfurique concentré. M. Grenet lui a donné la forme représentée (fig. 1260) connue sous le nom de *pile Grenet*, ou à *bouteille*. Les lames sont suspendues à un couvercle d'ébonite; les plaques de charbon communiquent avec une borne à vis, à laquelle est adapté le rhéophore positif, et le zinc, avec l'autre borne par la tige *t*, au moyen de laquelle on peut le retirer du liquide.



Fig. 1260.

Cette pile, par son élégance, sa propreté, l'absence de tout dégagement gazeux, convient particulièrement aux usages domestiques de l'électricité. Elle s'affaiblit rapidement par un dépôt d'oxyde de chrome sur le zinc. MM. Grenet et Fonvielle empêchent ce dépôt par une insufflation d'air à travers le liquide. M. Ruhmkorff a aussi reconnu que, si la longueur de la lame de zinc n'est que  $\frac{1}{4}$  de celle des plaques de charbon, la pile fonctionne régulièrement pendant toute une journée.

On préfère aujourd'hui, à la plupart des appareils que nous venons de décrire, et dont plusieurs ne sont plus que des instruments historiques, des piles à deux liquides, que nous décrirons, après avoir parlé des sources chimiques d'électricité. Nous reviendrons alors sur les piles à un seul liquide, pour montrer l'origine véritable de leur électricité.

**1824. Batteries voltaïques.** — En réunissant plusieurs piles semblables, on forme une *batterie voltaïque*, ou *batterie galvanique*. Il y a deux manières de procéder : 1° on met les piles les unes à la suite des autres, de manière à tourner tous les pôles positifs du même côté, et l'on réunit, au moyen d'arcs métalliques, les pôles voisins. On voit en A (fig. 1261) comment on effectue cette réunion avec les piles à auge; les arcs, A, sont terminés par des lames, qui plongent dans les compartiments extrêmes des auge voisines. L'ensemble forme alors une pile ayant un nombre de couples égal à la somme des couples de toutes les auge. On dit que la batterie est assemblée *en tension* ou *en série*. — 2° On place des piles égales, parallèlement, les unes à côté des autres, de manière que le zinc soit dans toutes du même côté, et l'on fait communiquer entre eux tous les pôles positifs, et entre eux tous les pôles négatifs, au moyen d'arcs métalliques. On voit, en r, un arc semblable réunissant les pôles de même nom de trois auge parallèles a, b, c. On a alors une pile dont les couples sont en même nombre que dans chaque auge, mais où ces couples ont une surface triple de celle de l'élément d'une des auge.

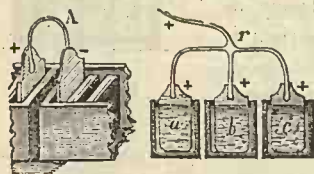


Fig. 1261.

On dit alors que la batterie est assemblée *en quantité*, parce que la quantité d'électricité produite augmente avec la grandeur des éléments. Nous verrons plus loin que, suivant les effets que l'on veut produire, il importe d'avoir, tantôt de grands éléments, tantôt de nombreux éléments. — L'École polytechnique possédait une batterie voltaïque, composée de 6 piles à auge ayant 100 couples chacune, de 9 décimètres carrés, avec laquelle Gay-Lussac et Thénard ont fait, en 1808, des expériences célèbres que nous ferons connaître.

**1825. PILES SÈCHES.** — Le liquide qui entre dans la composition de la pile présentant divers inconvénients, on a cherché à le remplacer par un conducteur sec non métallique; mais on n'a obtenu ainsi que des piles très-faibles. Les premiers essais ont été faits par Hachette et Desormes, vers 1802. Ils empilaient des disques minces de zinc et de cuivre, séparés par une couche de colle d'amidon. Biot a remplacé la colle par des disques de salpêtre fondu. Deluc forma ensuite des piles sèches au moyen de disques très-minces de zinc et de papier cuivré pressés les uns contre les autres; le papier formait le conducteur intermédiaire entre les métaux.

En 1812, Zamboni construisit les piles sèches qui portent son nom. Pour construire une *pile de Zamboni*, on colle une feuille d'étain sur une feuille de papier un peu humide<sup>1</sup>, et l'on fait adhérer sur la face opposée, en frottant avec

<sup>1</sup> Quelquefois le papier est imbibé d'huile, de miel, de lait, d'eau légèrement salée, d'essence de térébenthine... La pile est alors plus forte dans les premiers temps, mais elle perd plus rapidement son énergie.

un bouchon ; du peroxyde de manganèse en poudre. On superpose plusieurs feuilles ainsi préparées, en mettant l'étain toujours du même côté, puis on enlève, avec un emporte-pièce, des groupes de rondelles qu'on superpose, toujours dans le même ordre, de manière à réunir plusieurs milliers de couples. On place aux extrémités de cette pile, des disques épais de cuivre et de zinc, que l'on presse et que l'on maintient par des cordons de soie attachés, pendant la pression, à de petits crochets. On plonge ensuite la pile dans du soufre ou de la gomme laque en fusion, dont elle se trouve enveloppée, ce qui la préserve du contact de l'air. Ces piles, même avec un très-grand nombre d'éléments, ne donnent que de très-faibles résultats. Au bout de quelques années, elles cessent de fonctionner. Cependant, Delezenne en a construit qui conservaient une partie de leur activité au bout de 28 ans.



Fig. 1262. — 1/6.

Peltier et Delezenne, chacun de leur côté, ont établi des piles sèches à grands éléments pouvant donner des commotions, et des étincelles, et produire des effets chimiques. Delezenne empilait des feuilles de papier cuivré et de papier étamé, de manière que le cuivre s'appuyât sur l'étain; ou bien des feuilles étamées garnies, du côté non étamé, d'une couche de peroxyde de manganèse appliquée avec de la colle de gélatine<sup>1</sup>. Une pile de 300 couples, convenablement comprimés et dont le papier est suffisamment humide, donne des commotions, décompose l'eau, et dévie l'aiguille d'un rhéomètre; effets qui diminuent à mesure que la pile perd de son humidité.

**1826. Applications.** — On produit, au moyen des piles sèches, différents effets d'attraction et de répulsion électrique, dont il nous suffira de citer un exemple. On dispose verticalement deux piles de Zamboni *ab, cd* (fig. 1262), dont les pôles sont opposés, et qui communiquent entre elles par le bas. Un pendule *on*, dont la balle isolée vient toucher alternativement les boutons électrisés *a* et *c*, oscille continuellement de l'un à l'autre. On a beaucoup varié la disposition de ces petits instruments. On a fait des horloges dans lesquelles le mouvement du pendule, produit par l'électricité, se transmet par des rouages à des aiguilles; mais ces instruments marchent très-irrégulièrement; l'intensité des piles sèches variant avec l'humidité et la température, et allant en décroissant peu à peu.

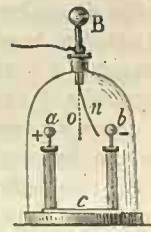


Fig. 1263.

**Électroscope de Bohnenberger.** — Cet instrument, dont la première idée est due à Behrens, consiste en deux piles sèches identiques *a, b* (fig. 1263), communiquant en *c*. Entre les pôles opposés *a* et *b* est suspendue une feuille d'or, *o*, qui reste en équilibre quand elle n'est pas électrisée. Cet équilibre est

instable, mais l'inertie de l'air suffit pour le maintenir, à cause de la faible masse de la feuille d'or; mais dès qu'elle reçoit de l'électricité de la boule B, elle s'incline vers le bouton qui contient l'électricité contraire, et fait ainsi connaître immédiatement le signe de l'électricité communiquée en B.

**Diagonètre de Rousseau.** — Cet instrument (fig. 4264) est destiné à comparer la conductibilité des liquides. *ns* est une faible aiguille aimantée mobile sur une pointe isolée *o*. Un conducteur *oc*, porte une coupe *c* et un disque métallique *r*. L'appareil étant orienté de manière que les disques *n* et *r* soient en contact, on fait communiquer le pôle d'une pile sèche non isolée P, avec le liquide de la coupe *c*. Quand ce liquide est bon conducteur, l'électricité le traverse, les disques *n*, *r* se repoussent et arrivent aussitôt au maximum de déviation. Mais si le liquide est imparfaitement conducteur, la déviation augmente

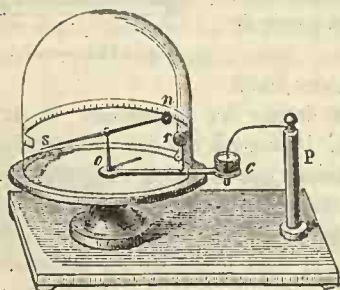


Fig. 4264.

peu à peu, on en suit les accroissements sur un cercle divisé, et le temps que met l'aiguille à atteindre le maximum d'écart, donne une idée de la conductibilité du liquide. Au moyen de cet appareil, on peut déceler de très-petites quantités d'huile de graines dans l'huile d'olive; celle-ci conduisant à peine, tandis que la première conduit bien. On peut aussi constater que les meilleurs charbons pour la confection de la poudre sont ceux qui conduisent le moins bien l'électricité.

**1827. DU COURANT DE LA PILE.** — Le conflit électrique qui a lieu dans le fil métallique qui réunit les deux pôles d'une pile se nomme *courant électrique* ou *courant voltaïque*. On nomme *circuit*, la série de conducteurs non interrompus formée par la pile et par les corps qui établissent la communication entre ses deux pôles. Le circuit est dit *ouvert* quand il y a une interruption que ne peut franchir l'électricité; dans le cas contraire, le circuit est *fermé*.

**Sens du courant.** — Dans la théorie des deux fluides, les deux électricités accumulées aux pôles de la pile se réunissent dans le fil conjonctif, en allant l'une vers l'autre. On ne peut donc dire que le courant marche dans un sens plutôt que dans l'autre. Cependant, pour indiquer de quel côté se trouve le pôle positif de la pile, on est convenu d'appeler *sens du courant*, le sens dans lequel semble marcher l'électricité positive. On dit donc que le *courant va du pôle positif au pôle négatif*.

**1828. Effets généraux des courants.** — Les courants voltaïques produisent sur les corps qu'ils traversent, ou près desquels ils passent, divers effets que nous étudierons plus tard en détail, mais que nous allons dès à présent énumérer. Ces effets sont principalement les effets *physiologiques*, *calorifiques*, *chimiques*, et *magnétiques*.



Les *effets physiologiques* consistent dans les commotions produites, soit sur les cadavres des animaux, soit sur les animaux vivants. Ces effets dépendent principalement de la *tension*, et sont d'autant plus intenses que les éléments de la pile sont plus nombreux.

Les *effets calorifiques*; par exemple, si l'on met entre les extrémités des électrodes, un fil métallique suffisamment fin et court; ce fil rougit, fond, ou même se volatilise. Ces effets dépendent surtout de la grandeur des éléments.

**Effets chimiques.** — Quand le courant traverse un corps composé, liquide, ou en dissolution, ce corps peut être décomposé. Le résultat, comme dans les effets calorifiques, dépend principalement de la grandeur des éléments, c'est-à-dire de la quantité d'électricité qui passe. Faraday donne le nom d'*électrolyse* à la décomposition par le courant, et celui d'*électrolyte* au liquide décomposé. L'eau est le premier corps qu'on ait décomposé par la pile : en 1800, Carlisle et Nickolson, ayant monté une pile à colonne avec des disques de zinc et d'argent, sentirent une odeur analogue à celle de l'hydrogène préparé au moyen d'eau, d'acide sulfurique et de zinc. Ayant alors fait passer un courant dans de l'eau, ils virent du gaz hydrogène se dégager au pôle positif, et des traces d'oxydation se manifester au pôle négatif.

**Voltamètre.** — Pour décomposer l'eau par le courant, on emploie aujourd'hui un petit appareil (fig. 1265) que Faraday a nommé *voltamètre*. Il consiste en un vase de verre, dont le fond est traversé par des fils de platine isolés l'un de l'autre.

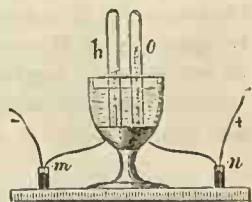


Fig. 1265.

Leurs extrémités extérieures sont mises en communication, en *m* et *n*, avec les pôles d'une pile. Le vase contient de l'eau, à laquelle on ajoute, pour la rendre plus conductrice, quelques gouttes d'acide sulfurique, quand la pile n'a pas un grand nombre d'éléments. Dès que le circuit est fermé, on voit partir de chaque point des fils de platine, de fines bulles de gaz, que l'on recueille dans des éprouvettes *o*, *h*, placées au-dessus. L'*oxygène* apparaît seul en *o*, sur l'électrode *positive*, et l'*hydrogène* seul en *h*, sur l'électrode *négative*, où il se dégage deux fois plus de gaz qu'en *o*; ce qui montre que l'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène contre un d'oxygène. On reconnaît qu'il y a en *o*, de l'oxygène, en plongeant dans l'éprouvette une allumette présentant quelques points en ignition; elle se rallume aussitôt. En approchant une flamme, de l'ouverture de l'éprouvette *h*, après y avoir introduit un peu d'air, on entend une petite détonation qui prouve la présence de l'hydrogène.

**Théorie de Grotthuss.** — Ce qu'il y a surtout de remarquable dans cette expérience, c'est que les éléments de l'eau se dégagent séparément, quelque grande que soit la distance des électrodes. On avait admis d'abord qu'il y avait réellement transport des gaz cheminant à travers l'eau, sous l'influence des électricités contraires. Grotthuss, en 1805, a proposé une théorie ingénieuse,

qui rend bien compte des particularités du phénomène <sup>1</sup>. Cette théorie s'appuie sur une hypothèse de Davy, adoptée plus tard par Berzélius et Ampère, dans laquelle on considère les atomes réunis dans un composé, comme constitués dans des états électriques opposés. Considérons, par exemple, une file de molécules d'eau placée entre les électrodes de platine  $p$ ,  $p'$  (fig. 1266), et supposons que l'hydrogène, dont les atomes sont représentés par des points noirs, soit électrisé

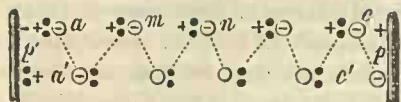


Fig. 1266.

positivement, et l'oxygène, représenté par des points blancs, électrisé négativement. Les molécules d'eau obéissant aux actions électriques des électrodes, se tourneront comme sur la figure, l'hydrogène de chacune d'elles étant attiré vers  $p'$  et repoussé

par  $p$ . L'oxygène sera, de même, sollicité vers  $p$ . Si ces actions sont assez énergiques, l'hydrogène de la molécule  $a$  sera séparé de son oxygène et se dégagera au pôle  $p'$ . L'oxygène de cette molécule, repoussé par  $p'$ , rencontrera l'hydrogène de la molécule suivante  $m$ , et se combinera avec lui. De même, l'oxygène séparé de  $m$  se combinera avec l'hydrogène de  $n$ , et ainsi de suite, de manière que l'oxygène de la molécule  $c$  sera mis en liberté. La série  $ac$  sera alors dans l'état indiqué en  $a'c'$ . Les choses se passent de la même manière dans toutes les séries de molécules que l'on peut imaginer entre les électrodes.

D'après cette explication, qui s'applique à tous les composés binaires, on voit qu'il n'y a pas réellement transport des éléments.

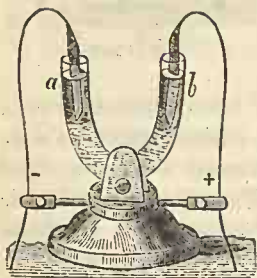


Fig. 1267.

**Décomposition des sels.** — La décomposition des sels a été réalisée, en 1803, par Berzélius et Hisinger. L'expérience se fait au moyen d'un tube en U (fig. 1267), dans lequel on met le sel en dissolution. Des lames de platine accrochées aux fils de la pile, plongent en  $a$  et  $b$ , et le sel est décomposé. S'il s'agit d'un sel à base alcaline, on trouve l'acide en  $b$ , au pôle positif avec de l'oxygène, et la base, en  $a$  au pôle négatif, avec de l'hydrogène. Si l'on emploie un sel neutre,

comme le sulfate de potasse, et si la dissolution est colorée en bleu par du sirop de violette, on la voit rougir en  $b$ , et devenir verte en  $a$ .

Si la base n'est pas alcaline, le métal de la base se dépose au pôle négatif, et son oxygène se porte au pôle positif, avec l'acide.

**Corps électro-positifs et électro-négatifs.** — Dans les décompositions produites par les courants, on donne le nom de corps électro-positifs à ceux qui se rendent au pôle négatif, et de corps électro-négatifs, à ceux qui se rendent

<sup>1</sup> Annales de chimie, 1<sup>re</sup> série, t. LVIII, p. 64.

au pôle *positif*. Ainsi, l'hydrogène de l'eau est *électro-positif*, et l'oxygène, *électro-négatif*. L'acide des sels est *électro-négatif*, et la base, *électro-positive*. Ces dénominations viennent de ce que les molécules qui se dégagent d'un composé se comportent comme si elles étaient électrisées d'une manière opposée à l'électrode sur laquelle elles se déposent. Du reste, une même substance peut être *électro-positive* ou *électro-négative*, suivant la nature de celle avec laquelle elle est combinée. Nous reviendrons sur ce sujet important, quand nous étudierons spécialement les effets chimiques des courants.

**1829. Effets magnétiques des courants.** — Si l'on place un fil métallique parcouru par un courant, parallèlement à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, elle quitte le méridien magnétique et se met en croix avec le courant. C'est là l'expérience célèbre d'Ærsted, qui la fit pour la première fois en 1819. Si l'aiguille est *astatique* (1507), elle se place perpendiculairement au courant; dans le cas contraire, comme elle est sollicitée par l'action terrestre, elle s'approche d'autant plus de la position perpendiculaire, que les éléments de la pile qui fournit le courant sont plus étendus. Ce phénomène donne le moyen de reconnaître si un fil de métal est parcouru par un courant, et permet d'en évaluer l'intensité.

Quand on change le sens du courant, l'aiguille se retourne bout pour bout. On obtient le même résultat, quand, sans changer le sens du courant, on fait passer au-dessous du centre de l'aiguille le courant, qui était au-dessus. Ces diverses expériences se font facilement au moyen de l'appareil (*fig. 1268*). L'aiguille aimantée est suspendue entre les deux fils  $ab$ ,  $a'b'$ , qui sont isolés l'un de l'autre par des colonnes de verre  $aa'$ ,  $bb'$ . En accrochant aux deux bouts d'un de ces fils, les électrodes de la pile, on peut faire passer le courant, dans les quatre conditions indiquées.

**Règle d'Ampère.** — Ampère a réuni les divers cas en un seul énoncé : il suppose un observateur couché le long du courant, regardant l'aiguille aimantée, et placé de manière que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête; et il nomme *droite* et *gauche du courant*, la droite et la gauche de l'observateur ainsi placé. Cela posé, l'expérience montre que, dans tous les cas, le pôle *nord* ou pôle *austral* (1504) de l'aiguille aimantée se tourne à la *gauche* du courant. Ainsi, dans le cas de la figure 1268, le courant passant en  $ab$ , on voit que le pôle nord de l'aiguille viendra en  $n$ ; car l'observateur étant couché sur le dos, les pieds du côté de  $a$ , sa gauche sera en avant.

**1830. Multiplicateur.** — Pour rendre plus efficace l'action du courant sur l'aiguille aimantée, Schweigger a eu l'idée de faire passer le fil plusieurs fois autour de cette aiguille, en ayant soin d'envelopper ce fil de soie ou de coton,

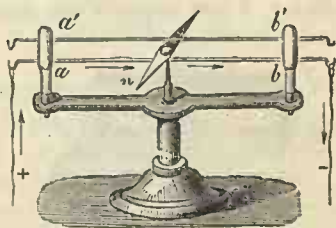


Fig. 1268.

pour que l'électricité ne puisse sauter d'un tour à l'autre. L'instrument se nomme alors *multiplicateur*. Le fil enveloppé de soie, dont les deux bouts sont en *a* et *b* (fig. 1269) est enroulé autour d'un cadre de bois, et l'aiguille aimantée *ns* est suspendue dans le cadre, qu'on a soin de placer dans le méridien magnétique. Chaque tour du fil produisant son effet, l'aiguille est plus déviée que s'il n'y avait qu'un tour, si toutefois les quatre parties de chaque tour *ab*, *bc*, *cd*, *da* (fig. 1270), concourent à pousser le pôle nord du même côté. Or, c'est ce qui a lieu; car si le courant marche dans le sens des flèches, on voit, en appliquant la règle d'Ampère à chaque côté du rectangle, que le pôle nord est poussé en *n'*, derrière le plan de la figure.

Du reste, il ne faut pas croire que la sensibilité de l'appareil augmente indéfiniment quand on multiplie le nombre des tours; car l'électricité éprouve à parcourir le circuit, une résistance qui augmente avec sa longueur. Ce n'est donc que lorsque l'électricité présente une assez forte tension, qu'on peut avec avantage augmenter beaucoup le nombre des tours.

**Multiplicateur à deux aiguilles.** — Pour rendre l'action du courant plus efficace, il faut employer une aiguille très-forte, et en même temps diminuer

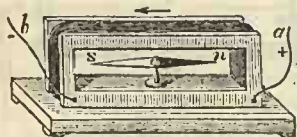


Fig. 1269.

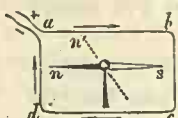


Fig. 1270.



Fig. 1271.

l'action magnétique du globe sur cette aiguille. On remplit ces deux conditions au moyen d'une aiguille presque astatique. Nobili emploie deux aiguilles parallèles *ns*, *n's'* (fig. 1271), fixées invariablement l'une à l'autre, de manière que les pôles contraires soient d'un même côté (1507). Ces aiguilles ont à peu près la même force, de manière que le magnétisme terrestre n'a sur leur ensemble qu'une faible action. Ce système est suspendu par un fil de soie sans torsion *f*, l'une des aiguilles dans l'intérieur du cadre, et l'autre en dessus. La tige *t*, qui les lie entre elles, passe librement dans un tube qui traverse le haut du cadre. Il est facile de voir que la partie *ab* du courant pousse du même côté, derrière le plan de la figure, les pôles *n* et *s'*. Quant aux parties *bc*, *cd*, *da*, elles tendent à amener *s'* en avant; mais l'expérience montre que leur action, à cause de la plus grande distance, est moindre sur *n's'* que l'action de la partie *ab* seule. La déviation est donc plus grande que s'il n'y avait qu'une seule aiguille *ns*; l'action de la terre étant très-faible, et celle du courant s'exerçant à la fois sur les deux aiguilles, et avec une grande intensité si elles sont individuellement très-fortes.

**1831. Rhéomètres ou galvanomètres.** — Ordinairement, on adapte au-dessous de l'aiguille supérieure, un cercle divisé qui permet d'en mesurer les déviations. Ce cadran est fixé au cadre de manière que le zéro soit placé sur

le diamètre parallèle au plan du cadre, plan que l'on place toujours dans le méridien magnétique. L'appareil porte alors le nom de *galvanomètre*, ou *rhéomètre* parce que l'intensité du courant peut se déduire de l'angle de déviation.

**Rhéomètre différentiel.** — Cet instrument sert à comparer les intensités de deux courants; il ne diffère des rhéomètres ordinaires qu'en ce qu'il y a deux fils enroulés autour du cadre. Ces deux fils sont aussi identiques que possible, et, pour qu'ils soient distribués de la même manière sur le cadre, on les tord bien régulièrement l'un avec l'autre, et on les enroule ensemble. Pour comparer deux courants, on les fait passer *en sens contraire* dans ces deux fils, qu'il est facile de reconnaître parce qu'ils sont garnis de soie de différente couleur. Le sens de la déviation de l'aiguille, indique quel est le courant le plus intense, et la grandeur de cette déviation sert à mesurer la différence.

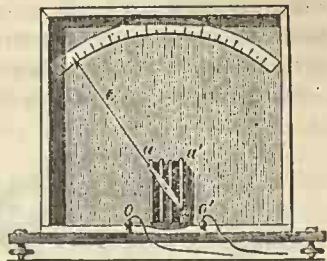


Fig. 1272.

**Galvanomètres de cours.** — Pour montrer de loin les mouvements de l'aiguille du rhéomètre, on peut employer la méthode de projection d'un pinceau de rayons lumineux réfléchis par un petit miroir fixé à l'aiguille supérieure (1677). On peut aussi employer des rhéomètres à très-longue aiguille verticale.

La figure 1272 représente un rhéomètre de cours imaginé par M. E. Becquerel. Le fil enveloppé de soie, dont les extrémités aboutissent en *o* et *o'*, est enroulé sur un double cadre vertical *aa'*. L'aiguille aimantée oscille sur un couteau de balance en bronze, et un brin de paille *e*, fixé sur son prolongement, parcourt les divisions d'un arc à grand rayon. Un contre-poids en forme d'écrou, qu'on enfonce plus ou moins, sert à équilibrer l'aiguille, de manière qu'elle se place d'elle-même dans la position verticale.

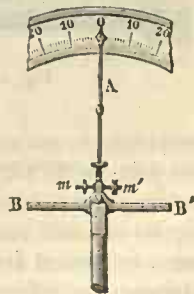


Fig. 1273.

**Galvanomètre à fléau.** — Dans cet ingénieux instrument, inventé par M. Bourbouze, l'aiguille est remplacée par un barreau aimanté *BB'* (fig. 1273) suspendu sur un couteau avec toute la mobilité d'un fléau de balance, et surmonté d'une longue aiguille *A* qui en marque les mouvements sur un arc divisé. Deux masses en forme d'écrous *m*, *m'*, servent à mettre le fléau en équilibre dans la position horizontale, malgré l'action terrestre, et quel que soit l'angle du plan *ABB'* avec le méridien magnétique. Une troisième masse placée au bas de l'aiguille *A*, sert à régler la position du centre de gravité du système. — L'aimant peut osciller dans un cadre de bois aplati *FF'* (fig. 1274), autour duquel s'enroulent horizontalement deux fils de cuivre enveloppés de soie se terminant,

l'un aux bornes  $a$ ,  $b$  l'autre en  $a'$ ,  $b'$ , de manière à former un rhéomètre différentiel. Si l'on réunit les bornes  $b$ ,  $a'$  par un arc métallique, les deux fils sont la continuation l'un de l'autre et l'on a un rhéomètre ordinaire, dont le fil aboutit en  $a$  et  $b'$ . Les pôles de l'aimant ne sortant pas du cadre  $FF'$ , ils se trouvent toujours en présence de quelques tours du fil, de sorte que la sensibilité du galvanomètre à fléau est supérieure à celle de beaucoup de rhéomètres à aiguilles légères. Un bouton porté par le pied de l'instrument et qui agit sur une crémaillère verticale, sert à soulever le fléau hors du cadre, pour régler la position des masses  $m$ ,  $m'$ .

Nous décrirons plus tard en détail les divers rhéomètres les plus usités; il nous suffit pour le moment de savoir comment on peut constater l'existence de faibles courants au moyen de ces instruments.

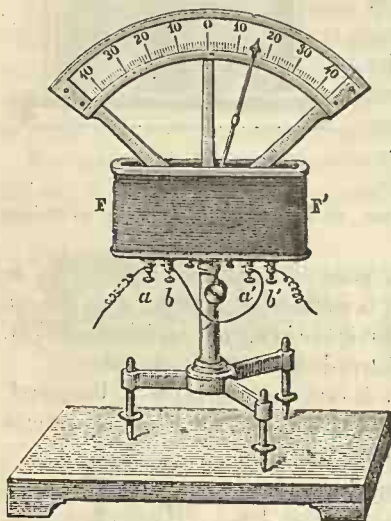


Fig. 1274.

propriétés du courant sont les mêmes dans tous les points du fil conjonctif; près des pôles de la pile comme à une très-grande distance, pourvu qu'il n'y ait aucune perte d'électricité aux divers points du circuit. Par exemple, une même aiguille aimantée soumise à l'action du courant, toujours dans les mêmes conditions, est partout déviée de la même quantité; plusieurs voltamètres identiques interposés aux différents points du circuit contiennent au bout du même temps des quantités égales d'hydrogène.

L'électricité des machines ordinaires peut produire des courants dans un fil communiquant avec le sol ou réunissant deux parties de la machine électrisées d'une manière opposée. Ces courants produisent les mêmes effets que ceux de la pile, mais leur intensité est tellement faible, qu'il faut, pour obtenir des résultats marqués, employer des machines puissantes, comme celle de Holtz, ou surtout les machines hydro-électriques. Celle de l'Institut polytechnique de Londres

#### 1832. ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

— L'électricité qui circule dans un fil conducteur doit à son état de mouvement, des propriétés particulières toutes différentes de celles de l'électricité statique ou en repos. C'est ainsi que celle-ci, quelque grande que soit sa tension, est impuissante à produire des décompositions et à dévier l'aiguille aimantée. On a donné le nom d'*électricité dynamique* à celle qui se meut dans un fil. Cette électricité ne se porte pas à la surface des conducteurs mais elle passe par tous les points de la section, comme nous le prouverons plus tard. De plus, l'intensité et les

fournit un courant qui décompose l'eau et les sels, et dévie de 25° l'aiguille aimantée d'un rhéomètre de 60 tours. Le fil rhéophore part de la chaudière, qui est électrisée négativement, et s'enfonce dans un puits. Nous savons aussi que l'électricité de l'atmosphère peut dévier l'aiguille du rhéomètre (1779).

Les piles donnent de très-grandes quantités d'électricité, mais leur tension est faible, à moins qu'on n'emploie un très-grand nombre d'éléments. Aussi peut-on, le plus souvent, tenir impunément avec les mains, les rhéophores de celles qui n'ont qu'une quinzaine de couples, l'épiderme sec isolant suffisamment pour les faibles tensions qu'elles produisent. Nous verrons aussi que, dans une foule d'appareils, le bois, l'ivoire, le carton, isolent assez pour empêcher l'électricité de passer.

**De la constitution du courant.** — L'identité de propriétés du courant dans toute sa longueur ne permet pas d'admettre, dans la théorie de Symmer, que les fluides accumulés aux pôles de la pile se transportent l'un vers l'autre dans le fil conjonctif; car il y aurait alors beaucoup de fluide positif ou négatif près des pôles, et l'état neutre, vers le milieu du fil; et les effets ne devraient pas être les mêmes dans tous les points du circuit. La polarité électrique permet de se rendre compte des résultats, en considérant le courant comme constitué par une série continue de décharges intermoléculaires, analogues à celles que nous montrent les tubes étincelants, et qui ont lieu de la même manière, dans toutes les sections du conducteur, et dans toute l'étendue d'une même section.

Dans la théorie d'une seule électricité, l'état du courant se conçoit facilement. C'est tout simplement l'écoulement du fluide unique marchant du pôle *électrisé en plus*, vers l'autre pôle *électrisé en moins*. La quantité de ce fluide qui passe dans chaque section étant la même, comme dans l'écoulement des fluides pondérables, on voit pourquoi les effets sont égaux dans tous les points d'un même courant. Nous reviendrons sur cette question importante quand nous étudierons à part la constitution des courants, et les lois de la propagation de l'électricité dans les fils conducteurs (chap. VI).

## II. Dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.

**1833. ÉLECTRICITÉ PRODUITE DANS LES COMBINAISONS.** — L'idée de rechercher de l'électricité dans les actions chimiques est antérieure à la découverte de Galvani. On y fut amené naturellement en remarquant que le frottement produit de la chaleur en même temps que de l'électricité, et que les actions chimiques forment la source de chaleur la plus abondante. Laplace et Lavoisier, en 1781, tirèrent des étincelles d'un condensateur de Volta (1671), mis en communication avec un vase dans lequel ils faisaient agir de l'acide sulfurique sur du fer ou de la craie. Mais on pouvait attribuer l'électricité dégagée aux frottements produits par l'effervescence. Plus tard, Volta chargea son électromètre condensateur avec de l'électricité dégagée dans la combustion du charbon. Après la découverte

de la pile, l'invention du multiplicateur fournit aux expérimentateurs un moyen nouveau, dont Ersted profita pour prouver qu'il se dégage de l'électricité dans l'action d'un acide sur un métal; et Becquerel, pour constater qu'il s'en dégage dans la combinaison des acides et des bases, et dans une foule d'autres réactions chimiques. Depuis, Faraday, A. de La Rive, Becquerel, Avogadro, Matteucci, Nobili..., ont rassemblé une masse de faits qui montrent que le phénomène est général.

Pour reconnaître le dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, on fait usage tantôt de l'électromètre condensateur, tantôt du multiplicateur; tantôt de membres frais de grenouille. Dans ces expériences, on se préoccupe surtout d'éviter tout contact entre deux métaux, auquel on pourrait attribuer l'électricité recueillie. Il faut aussi que les deux corps mis en présence soient bons conducteurs; autrement, le fluide reçu par le mauvais conducteur, ne trouvant pas d'écoulement, détruirait celui de l'autre corps. Du reste, on ne recueille souvent qu'une partie des fluides séparés, l'autre partie se recombinant aux surfaces mêmes où se produit l'action chimique. — Avant d'entrer dans le détail des expériences, nous allons énoncer les lois générales, telles qu'elles ont été résumées par Becquerel :

1° Dans les combinaisons, les corps qui s'unissent à l'oxygène ou ceux qui jouent le rôle de base s'électrisent négativement, tandis que l'oxygène ou les corps qui jouent le rôle d'acide s'électrisent positivement;

2° Dans les décompositions, l'électricité se distribue d'une manière inverse : les corps qui jouent le rôle de base emportent l'électricité positive, et ceux qui jouent le rôle d'acide, l'électricité négative.

Souvent, on indique la distribution de l'électricité en disant que la substance qui reçoit le fluide positif est négative, et que celle qui prend le fluide négatif est positive; mais cette manière de s'exprimer n'est pas nécessaire, et peut jeter de la confusion dans l'esprit.

Nous allons examiner les différentes sortes d'actions chimiques : *combustions, actions des dissolutions les unes sur les autres, actions des liquides sur les métaux.*

**1834. Combustion des solides.** — Volta, le premier, a reconnu qu'il se dégage de l'électricité dans la combustion; mais il n'obtenait que des résultats incertains. Pouillet est parvenu à en obtenir de constants par le moyen suivant<sup>1</sup> : un cylindre de charbon calciné *c* (fig. 1275), allumé seulement à sa partie supérieure, est posé sur une lame fixée à l'un des plateaux d'un électromètre condensateur, dont l'autre plateau communique avec le sol. On active la combustion par un jet d'air ou d'oxygène. Le charbon prend l'électricité négative, et l'acide carbonique emporte l'électricité positive. Quand on veut recueillir cette dernière, on fait communiquer le charbon, *c'*, avec le sol, et on le place au-dessous de la lame, qui dépasse le plateau collecteur; l'acide carbonique dégagé rencontre cette lame et y dépose son électricité. — M. Gaugain a remarqué que l'on

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXV, p. 401.



obtient instantanément le maximum de charge du condensateur. Il obtient aussi des résultats certains avec un fragment de charbon de forme quelconque et entièrement allumé, en l'enveloppant d'un grillage en platine, distant de 3 ou 4<sup>mm</sup>, par lequel l'électricité du gaz chaud est enlevée. C'est pour n'avoir pas employé cette précaution que Volta, qui mettait le charbon en fragments dans un petit réchaud, et que Davy et de Saussure n'obtinrent que des résultats incertains. Matteucci a pu réussir en projetant sur le charbon, un vif courant d'air, qui emportait l'acide carbonique.

Le soufre en combustion ne donne pas d'électricité, parce qu'il est mauvais conducteur. Il en est de même quand on fait brûler le charbon dans l'oxygène sec, après l'avoir attaché à un fil de platine communiquant avec le condensateur; et avec le zinc, le cuivre, l'étain, l'antimoine, brûlant dans le chlore sec. Matteucci avait cru pouvoir en conclure, ainsi que de beaucoup d'autres observations sur les réactions des dissolutions, qu'il n'y avait pas dégagement d'électricité dans la combinaison de deux molécules élémentaires; mais Becquerel a montré que, dans le cas de la combustion, l'absence de résultats est due à la mauvaise conductibilité des gaz secs<sup>1</sup>.

On reconnaît encore l'électricité dégagée par la combustion du charbon en plongeant l'extrémité d'un cylindre de plombagine dans du salpêtre en fusion contenu dans un creuset de platine isolé. Le charbon et le creuset étant mis en rapport avec le fil d'un multiplicateur, l'aiguille, fortement déviée, indique que le charbon, en brûlant, a reçu l'électricité négative.

#### 1835. Combustion des gaz. —

Pouillet a d'abord étudié la combustion du gaz hydrogène. Ce gaz sortait par un tube métallique non isolé, et la flamme était enveloppée d'une hélice de platine A (fig. 1276)

communiquant avec l'un des plateaux du condensateur. Ce plateau se chargeait de fluide positif. Quand l'hélice, très-étroite, était plongée dans le gaz hydrogène qui occupe l'intérieur de la flamme, comme en B, le plateau recevait le fluide négatif. Matteucci et M. Gaugain ont montré que, pour obtenir des résultats certains, il faut en même temps faire communiquer avec le sol la couche gazeuse qui enveloppe la flamme. On voit, d'après ce qui précède, que, dans la combustion de l'hydrogène, ce gaz prend le fluide négatif, et que la

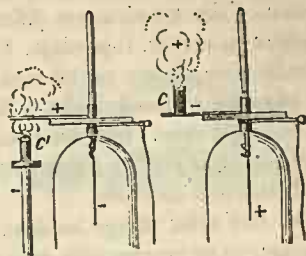


Fig. 1275.

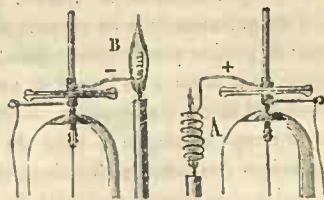


Fig. 1276.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XVI, 257; XVII, 26, et XLII, 385.

vapeur d'eau produite emporte l'électricité positive, qui peut être recueillie jusqu'à 10<sup>mm</sup> de la flamme. Quand le tube de métal est isolé, il se charge de fluide négatif. Pouillet a aussi expérimenté sur la flamme de l'alcool, de l'éther, de la cire, des huiles, des graisses et de plusieurs substances végétales.

Becquerel a constaté qu'il suffit de tenir dans la flamme deux spirales de platine à des températures différentes, pour obtenir un courant, ce qui peut induire en erreur. Cependant, l'origine chimique de l'électricité de la flamme semble bien prouvée par les expériences concordantes de Pouillet.

**Flamme d'alcool.** — On a fait beaucoup d'expériences sur l'électricité de la flamme d'alcool, mais les résultats sont peu d'accord et semblent indiquer que la chaleur peut être la principale cause, et même quelquefois l'unique cause, de l'électricité observée.

M. Buff ayant plongé les deux extrémités du fil d'un multiplicateur dans la flamme, vit un courant aller dans ce fil, de l'extrémité la plus chaude à l'autre. Mais, d'un autre côté, ayant mis un fil de platine dans la flamme, il chargea un condensateur, d'électricité positive quand le fil plongeait dans la partie extérieure, et d'électricité négative quand il plongeait dans l'intérieur. Or, ce fil aurait dû toujours prendre l'électricité positive, si l'effet était dû à la chaleur seule. — Grove ayant plongé deux spirales de platine dans une flamme d'alcool activée par le vent d'un chalumeau, l'une dans la partie la plus chaude de la flamme, et l'autre, dans la partie bleue près de l'orifice du chalumeau, obtint un faible courant allant de la première spirale à la seconde. Mais ayant éloigné la première, de manière qu'elle fût la plus froide, le sens du courant ne fut pas changé; il n'était donc pas dû à l'inégal échauffement des spirales.

Les expériences de M. Hankel ne sont pas aussi concordantes. Ayant mis le fil d'un galvanomètre en rapport avec une lampe métallique à alcool et avec une lame de platine placée obliquement au-dessus de la flamme, il obtint un courant allant de la lame à la lampe. Il put aussi remplacer la lame par un conducteur humide et même par la main. — Mais, dans d'autres expériences faites avec un électroscope analogue à celui de Bohnenberger (1826), il vit la différence algébrique des tensions des deux fils changer avec leur position, l'un d'eux étant au dedans, au-dessus ou à côté de la flamme, pendant que l'autre plongeait dans l'alcool. Si l'on abaissait peu à peu le premier fil, la différence de tension diminuait, devenait nulle puis changeait de signe pour augmenter jusqu'à ce que le fil touchât la mèche. Ces changements paraissent dépendre des différences de température qu'éprouve le fil, car si on le termine par un creuset de platine rempli de glace, ou si on le remplace par une veine liquide, les variations de tension disparaissent<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dans ces expériences, M. Hankel a constaté combien il est important d'opérer dans une atmosphère complètement dépourvue d'électricité. Si l'air a été électrisé, par exemple, par l'emploi antérieur d'une machine électrique, on le décharge en faisant communiquer intimement la flamme avec le sol, au moyen des tuyaux de conduite du gaz. (*Annales de la Société des sciences de Saxe*, t. VI, et *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIX, p. 481.)

**Flamme du gaz.** — M. J. Trowbridge a trouvé, sur un bec de gaz d'éclairage non isolé, une forte électricité négative dans la flamme, à 7<sup>cm</sup> de l'orifice; de l'électricité positive, à l'extrémité de cette flamme; et la même électricité, mais faible, à 5<sup>mm</sup> tout autour de la flamme. L'extrémité du bec était électrisée positivement. L'électricité était recueillie par une petite plaque mise en communication avec une paire de secteurs de l'électromètre de Thomson, dont l'autre paire communiquait avec le sol<sup>1</sup>.

**1836. Électricité dans les réactions des dissolutions.** — C'est à Becquerel qu'est due la découverte de l'électricité dégagée par les dissolutions qui agissent chimiquement les unes sur les autres<sup>2</sup>.

**1<sup>o</sup> Formation des sels.** — Quand un acide et une base se combinent, il y a production des deux électricités; l'acide prend l'électricité *positive*, et la base, la *négative*. Becquerel place l'acide et la base en dissolution, dans deux vases de verre, A et B (fig. 1277), et plonge dans les liquides, des lames de platine fixées aux deux bouts du fil, aussi en platine, d'un multiplicateur. Si les deux liquides sont réunis par une lame de platine, l'aiguille du multiplicateur ne bouge pas; mais si la communication est établie au moyen d'une mèche de coton ou d'amiant *m*, humectée avec de l'eau salée, l'acide et la base des vases A et B montent par capillarité dans cette mèche, se joignent, et aussitôt l'aiguille indique un courant allant de l'acide à la base, par le multiplicateur. Il n'y a ici qu'un seul métal; on ne peut donc invoquer l'effet du contact de deux métaux.

Indépendamment du courant qui parcourt le fil du multiplicateur, il s'en produit un autre en *m*, qui va de la base à l'acide, sur lequel se porte le fluide positif, et qui est comme la continuation du courant qui parcourt le fil. Dans ce qui suit, il s'agira toujours du courant dans le fil, à moins qu'on n'avertisse du contraire.

Becquerel opère encore en adaptant à l'un des bouts du fil du multiplicateur, une cuiller de platine *c* (fig. 1278) contenant l'acide, et à l'autre bout, une pince, aussi en platine, dans laquelle est fixé un morceau de potasse convenablement humectée; il plonge l'extrémité du morceau de potasse dans l'acide, en ayant soin de ne pas toucher la cuiller, et aussitôt le courant se manifeste. Ce courant est assez fort pour être observé sans multiplicateur, en le faisant passer

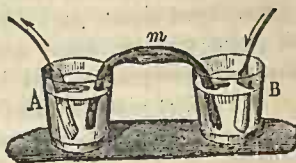


Fig. 1277.

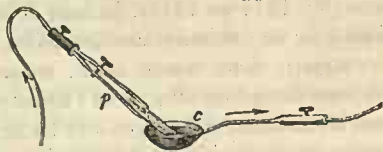


Fig. 1278.

<sup>1</sup> *Journal de physique*, de M. d'Almeida, t. I, p. 373.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXIII, p. 244; et t. XXVI, p. 476.

une seule fois près de l'aiguille aimantée. — Au lieu d'une pince, on peut employer une lame ou un morceau d'éponge de platine qu'on a trempés dans une dissolution de base; ou, comme l'a fait M. Mousson, fixer aux extrémités du fil du multiplicateur, des disques de platine sur lesquels on applique deux rondelles de papier trempées dans les dissolutions acide et basique. Dès qu'on appuie les deux rondelles l'une sur l'autre, le courant se manifeste.

Davy ayant objecté que l'électricité pouvait provenir de ce que l'une des lames de platine était en contact avec l'acide, tandis que l'autre l'était avec la base, Becquerel plongea les deux lames dans de l'acide nitrique placé en A et A' (fig. 1279), et réunit les deux vases par une mèche de coton mouillé, soutenue par une lame de platine, et assez longue pour que les acides ne pussent de longtemps arriver au milieu. Ayant ensuite déposé une goutte d'acide en *a*, et une goutte d'une solution de potasse en *c*, il y eut combinaison entre ces deux liquides, et le courant se produisit. — Nobili emploie une série de 4 vases : les lames de platine plongent dans les deux vases extrêmes qui contiennent une



Fig. 1279.

solution de salpêtre, et communiquent, par des mèches d'amiante ou des tubes en siphon pleins d'eau, avec les vases du milieu. Ceux-ci contiennent l'acide et la base, et sont réunis l'un avec l'autre par une mèche d'amiante à travers laquelle la combinaison s'effectue. Mais le courant est faible, à cause de l'imparfaite conductibilité de la solution de salpêtre.

**2<sup>o</sup> Eau avec les acides ou les bases.** — On opère au moyen des dispositions (fig. 1277 ou 1278). Le sens du courant montre que l'eau prend le fluide *négalif* en se combinant avec les *acides*, et le fluide *positif*, avec les *bases*. Elle se comporte donc comme acide, en présence des bases, et comme base en présence des acides ainsi qu'on l'admet en chimie. Le même accord se manifeste dans la combinaison des bases avec les alcalis, c'est-à-dire que la base se comporte comme un acide vis-à-vis de l'alcali. — Quand les sels neutres en dissolution concentrée s'unissent à l'eau, ce liquide se comporte comme base, c'est-à-dire qu'il prend le fluide *négalif*. Il résulte de ces faits, que l'eau de la mèche avec laquelle on réunit les dissolutions placées dans des vases différents, produit un courant en se combinant avec ces dissolutions; mais ce courant est généralement plus faible que celui que l'on veut observer.

**3<sup>o</sup> Acides entre eux.** — Becquerel a reconnu que, lorsque deux acides réagissent l'un sur l'autre, celui qui est le plus oxydant, c'est-à-dire qui cède le plus facilement son oxygène, prend l'électricité *négalive*. Par exemple, si l'on met dans un tube en U, d'un côté de l'acide sulfurique et de l'autre de l'acide azotique, et qu'on plonge les bouts du fil de platine du multiplicateur dans les deux branches, le courant va de l'acide sulfurique à l'acide azotique par le multiplicateur. Quand les acides sont engagés dans des composés salins, ils semblent conserver les mêmes tendances; ainsi, les sulfates prennent le fluide

positif en se combinant avec les azotates, les phosphates avec les sulfates, etc. De La Rive a formé la liste suivante, dans laquelle chaque substance prend l'électricité positive avec celle qui la suit, et l'électricité négative avec celle qui la précède :

(+) *Acide phosphorique, a. sulfurique, a. azotique, a. chlorhydrique, a. acétique, a. azoteux, dissolutions salines, dissolutions alcalines* (—).

Il se présente quelques exceptions : certaines dissolutions salines prennent le fluide positif avec certains acides, et le fluide négatif avec certaines bases; ce qui tient probablement à l'intervention de l'eau dans le phénomène, et à son affinité prépondérante pour l'une ou l'autre des substances en présence.

**1837. Polarisation des lames de platine.** — Quand on décompose l'eau par la pile, les électrodes de platine reçoivent de minces dépôts de matières gazeuses ou autres provenant de l'action exercée par le courant sur le liquide. De La Rive exprime cet effet en disant que ces électrodes sont *polarisées*, parce que cet effet se produit aux *pôles* de la pile. Ces dépôts produisent des actions chimiques qui donnent lieu à un courant, *inverse* de celui qui décompose l'eau, et vient en diminuer l'intensité; ce courant est nommé *courant secondaire*. Pour le mettre en évidence, après avoir décomposé l'eau dans un voltamètre, on le sépare de la pile, et l'on réunit les lames de platine par le fil d'un rhéomètre. On observe alors un courant de sens contraire à celui qui décomposait l'eau; ce courant s'affaiblit peu à peu et finit par disparaître quand les matières déposées sont épuisées.

Quand on produit un courant par des actions chimiques, ce courant en agissant sur le liquide qu'il traverse, produit aussi sur les lames qui le recueillent pour le conduire au rhéomètre, des dépôts gazeux ou autres, qui donnent lieu à un courant secondaire pouvant détruire, en tout ou en partie, celui que l'on veut observer, surtout s'il est faible.

Pour éviter cet inconvénient, Becquerel a imaginé de changer les lames de place à des intervalles très-rapprochés, en faisant en sorte que celle qui arrive à l'endroit où elle doit recevoir une certaine espèce d'électricité, communique toujours avec le bout du fil du multiplicateur qui doit recevoir cette électricité. Becquerel a construit, pour cet objet, deux appareils particuliers, qu'il nomme *dépolarisateurs*, et dans lesquels un mouvement de rotation détermine le changement mutuel de position des lames, assez rapidement pour que l'aiguille aimantée conserve sa déviation sans éprouver d'oscillations sensibles<sup>1</sup>.

Au moyen de ces appareils, on peut constater la production de l'électricité dans une foule d'actions chimiques très-faibles. Becquerel cite un cas curieux, où l'action de l'eau sur deux dissolutions donne un résultat inverse de celui qu'elles donneraient si elles étaient seules juxta posées : on dispose les unes à la suite des autres une suite de mèches *oa, ab, bc, cd* (fig. 1280), entre deux vases remplis d'eau distillée et accompagnés de l'appareil dépolarisateur. Les

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 389.

mèches *oa* et *cd* sont imbibées d'eau; *ab*, d'une dissolution de sous-carbonate de soude, et *bc* de bi-carbonate de soude. On trouve un courant, dirigé dans les mèches suivant la flèche supérieure; tandis que la réunion des deux sels donnerait un courant en sens opposé. C'est qu'il y a ici trois courants, le premier produit par l'action de l'eau de *oa* sur le sous-carbonate de *ab*; le second par l'action des deux sels; et le troisième par l'action du bi-carbonate sur l'eau de *cd*. Ces courants sont dirigés dans le sens des petites flèches, et le résultat montre que le courant en *a* est plus intense que la somme des deux autres.

**1838. ÉLECTRICITÉ DES DÉCOMPOSITIONS.** — Pouillet a constaté le dégagement de l'électricité par les décompositions chimiques dans lesquelles un des éléments se dégage, par la méthode suivante<sup>1</sup>. Un creuset incandescent en platine épais, est fixé à l'extrémité d'une tige de laiton soudée au plateau inférieur d'un électromètre condensateur, dont le plateau supérieur communique avec le sol. Si l'on projette dans ce creuset une dissolution de strontiane, chaux, baryte, soude, ou potasse, substances qui ont une grande affinité pour l'eau, le liquide prend la forme globulaire, l'eau se sépare de la substance dissoute, sous forme de vapeur, et le creuset s'électrise positivement tandis que la vapeur emporte

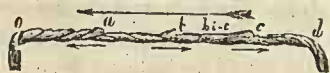


Fig. 1280.

l'électricité négative. Au moment où le liquide, par suite du refroidissement du creuset, se réduit subitement en vapeur en touchant les parois, la quantité d'électricité est telle que les feuilles d'or divergent sans condensateur. Peltier a même constaté que l'électricité ne se dégage réellement qu'à ce moment-là, lorsque la vapeur s'échappe vivement, de manière à soustraire les fluides séparés à une recombinaison immédiate<sup>2</sup>. — Pour recueillir l'électricité emportée par la vapeur, on met le creuset en communication avec le sol, et l'on plonge dans la vapeur qui s'en échappe, la tige fixée au condensateur.

L'électricité n'est pas produite par le changement d'état de l'eau, car les liquides qui s'évaporent sans se décomposer, comme l'eau distillée, l'acide acétique pur, les acides sulfurique et azotique purs et concentrés, ne donnent aucune électricité. Avec les dissolutions d'acides ou de sels neutres ou non, le creuset s'électrise *négativement* et la vapeur *positivement*. C'est le contraire de ce qui a lieu avec les alcalis. Le sel marin a été étudié tout particulièrement : une seule goutte d'eau salée dans un creuset rouge, suffit pour donner une quantité notable d'électricité. L'eau des mers, en s'évaporant, doit donc fournir à l'atmosphère de l'électricité *positive* (1407). L'eau commune, qui tient toujours des matières salines en dissolution, se comporte comme l'eau de mer; seulement, elle donne beaucoup moins d'électricité. — On voit que les résultats qui précèdent sont l'inverse de ceux qu'on obtient quand les mêmes substances se combinent

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 5.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. IV, p. 144.

avec l'eau. Les acides volatils et l'ammoniaque, qui se dégagent de l'eau sous forme de vapeur, emportent le fluide *positif*, et laissent au creuset le fluide *négalif*.

M. Reich, M. Riess et M. Gaugain, ont cru pouvoir attribuer l'électricité dégagée par les dissolutions projetées dans un creuset rouge, au frottement des gouttelettes d'eau lancées contre les parois, au moment où le liquide quitte la forme globulaire. Mais alors les effets devraient être différents dans un creuset profond et sur une plaque de platine à peine concave. De plus, l'eau distillée et les acides purs devraient produire de l'électricité dans les mêmes circonstances, ce qui n'est pas.

Pouillet a encore recueilli de l'électricité dans la décomposition par la chaleur, de substances sèches, telles que des oxydes et des sels. Il les plaçait sur une lame de platine communiquant avec l'électromètre, et concentrait sur elles les rayons solaires, au moyen d'une lentille à échelons.

M. Henrici obtient de l'électricité de décomposition, dans des conditions toutes différentes de ce que nous venons de voir. Il plonge dans une dissolution, les deux bouts garnis de platine, du fil d'un rhéomètre; d'un côté, le platine est froid, et de l'autre, il est porté au rouge. Aussitôt on a un courant qui va du platine chaud au platine froid par le rhéomètre, quand le liquide (acide sulfurique ou nitrique étendu ou concentré) n'attaque pas le platine chaud. Le courant provient alors de la décomposition de la dissolution, par la chaleur du métal. Quand le platine chaud est attaqué, par exemple quand on emploie l'acide chlorhydrique ou la potasse, le métal chaud prend le fluide *négalif*.

**Doubles décompositions.** — Dans les décompositions chimiques, les électricités se distribuent généralement d'une manière inverse à ce qui a lieu dans les combinaisons; il semble que chacun des éléments qui a abandonné une espèce d'électricité en se combinant, ait besoin de la reprendre pour se séparer du composé. Becquerel a reconnu que, dans les doubles décompositions des sels, c'est-à-dire quand deux sels font un échange mutuel de leur acide et de leur base, il n'y a pas dégagement d'électricité. On pouvait prévoir ce résultat; les décompositions qu'éprouvent d'abord les deux sels produisant des effets électriques opposés à ceux qui résultent des combinaisons qui s'effectuent immédiatement après. Il paraît cependant qu'il peut y avoir quelquefois des traces sensibles d'électricité.

**1839. ACTION DES LIQUIDES SUR LES MÉTAUX.** — Le dégagement de l'électricité dans ces sortes d'actions, s'observe soit avec l'électromètre condensateur, soit avec le rhéomètre.

**Expériences avec le condensateur.** — Voici comment opère Becquerel : dans une capsule de platine *c* (*fig.* 1281) en communication avec le plateau inférieur *a* d'un condensateur à feuilles d'or, et contenant un liquide qui ne l'attaque pas, on plonge l'extrémité *c* d'un gros fil de métal *m*, de manière à ne pas toucher le platine. L'autre extrémité de ce fil *m*, qui est isolé, s'appuie sur le plateau supérieur *b*. On trouve ce dernier plateau électrisé négativement, et

le plateau *a* positivement. Si la tige *m* est en zinc, il faut, pour éviter les objections, que le plateau *b* soit aussi en zinc. Il faut enfin que la capsule *c* s'appuie sur du papier mouillé. — Si la capsule est formée d'un métal attaquable par le liquide, le fluide  *négatif*  se porte sur elle quand elle est plus attaquée que le métal *m*, et *vice versa*.

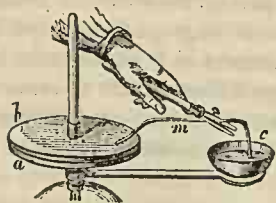


Fig. 1281.

Comme une partie des électricités séparées se recombine aussitôt, si bien que l'eau acidulée ne donne pas, avec le zinc, de meilleurs résultats que l'eau commune, la première conduisant mieux que l'autre, on opère en projetant dans une capsule très-chaude le liquide qui doit l'oxyder ; la vapeur emporte le fluide positif, et laisse au métal attaqué le fluide négatif. Par ce moyen, on peut voir diverger les feuilles d'or, sans condensateur. Matteucci a obtenu avec le potassium des résultats semblables, sans chauffer la capsule : il écrase sur le fond d'une capsule de platine un fragment de potassium, sur lequel il laisse tomber une goutte d'eau ; l'eau est décomposée avec une vive chaleur, l'hydrogène et la vapeur emportent le fluide  *positif* , et la capsule est électrisée  *négativement* .

Matteucci a aussi chargé un condensateur en n'employant qu'un seul métal<sup>1</sup>. Il se sert d'un condensateur à plateaux de cuivre munis de fils du même métal. L'un de ces fils communique avec le sol, et l'autre est terminé par une lame de cuivre soutenue par un fil de soie et plongée dans l'eau d'un puits. Cette lame s'oxyde, et le plateau avec lequel elle communique est électrisé  *négativement* . Le résultat est plus marqué quand on mêle un peu d'acide nitrique ou chlorhydrique à l'eau du puits.



Fig. 1282.

**Expériences avec le multiplicateur.** — On plonge dans l'acide nitrique, comme l'a fait Ersted, l'un des bouts *a* (fig. 1282) du fil de cuivre d'un multiplicateur, et, quelques instants après, l'autre bout *b*. L'acide nitrique agissant plus fortement sur le cuivre au moment de son immersion, le fil plongé en dernier lieu est plus attaqué que l'autre, et l'aiguille aimantée indique un courant allant, par le multiplicateur, de l'extrémité *a*, la moins attaquée, à l'extrémité *b*. Le fil attaqué *b* reçoit donc le fluide négatif, et le fluide positif chassé de sa surface dans le liquide, est reçu par le fil *a*. On voit qu'il y a aussi, à travers le liquide, un courant qui est comme la continuation de celui du multiplicateur. En réalité, il y a deux courants dans le fil métallique, puisque ses deux extrémités sont attaquées par l'acide ; mais l'un d'eux l'emporte sur l'autre, et détermine le sens

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XVI, pp. 265 et 280.



de la déviation de l'aiguille. Cette expérience se faisant avec un seul métal, on ne peut invoquer d'effet de contact entre métaux.

Si l'on plonge dans l'acide nitrique les deux bouts du fil de platine d'un multiplicateur, l'aiguille aimantée ne bouge pas. Mais, si l'on fait glisser une goutte d'acide chlorhydrique le long d'une des extrémités du fil, pour former de l'eau régale qui attaque le platine, on a un courant qui va de l'extrémité non attaquée à celle qui a reçu l'acide chlorhydrique. Comme l'action chimique dégage de la chaleur, on pourrait attribuer le courant à l'échauffement du fil attaqué; mais le courant dû à cette cause marcherait en sens contraire de celui que l'on observe ici. Dans cette dernière expérience, comme dans celle d'Ersted, on n'emploie qu'un seul métal.

Si l'on emploie deux métaux différents réunis par le fil du multiplicateur, on remarque toujours que le courant va du métal le moins attaqué à celui qui l'est le plus. Mais, dans ce cas, on ne peut éviter d'avoir au moins deux métaux en contact. Il faut alors reconnaître le courant par un autre moyen que le multiplicateur : par exemple, en réunissant les deux lames métalliques par des membres frais de grenouille, comme le faisait Nobili.

On peut encore constater le passage du courant par la décomposition d'un sel. Faraday plonge dans une dissolution une lame de platine *p* (fig. 1283) et une lame de zinc *z*; en *i* est posé un morceau de papier teint en bleu par le tournesol, et humecté d'une dissolution d'iode de potassium. Dès qu'on touche le morceau de papier avec le fil de platine *n*, le sel est décomposé en *i*. Rien n'empêche, du reste, de placer en *n* un multiplicateur à fil de platine, les deux métaux étant séparés en *i*. Faraday a opéré de cette façon sur un grand nombre de dissolutions, et en plongeant les lames *z* et *p* dans différents liquides.

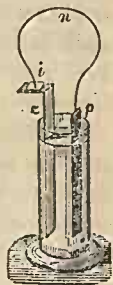


Fig. 1283.

**1840. Le métal le plus attaqué s'électrise négativement.** — Dans les expériences qui précèdent, le métal le plus attaqué prend toujours l'électricité négative, et le fluide positif, chassé dans le liquide, se porte sur l'autre métal. Cette loi est générale. Pour la faire bien ressortir, on expérimente avec deux lames du même métal plongées dans le même liquide, mais de manière que l'une soit plus attaquée que l'autre; ce qu'on obtient soit en plongeant une des lames après l'autre, comme dans l'expérience (fig. 1282), soit en l'agitant dans le liquide (E. Becquerel), soit en l'échauffant, comme l'a fait Faraday, soit enfin en mettant dans les deux branches d'un tube en U le même acide différemment concentré, ainsi que le faisait de La Rive. Par exemple, si les lames sont en zinc ou fer, et qu'on les plonge, l'une dans l'acide sulfurique concentré, et l'autre dans l'acide faible, qui attaque plus fortement le métal, le courant marche de l'acide concentré à l'acide étendu, par le rhéomètre. Marianini employait une lame oxydée, et l'autre décapée; la dernière, plus attaquée que l'autre, recevait le fluide négatif.

## III. Théorie chimique de la pile.

**1844. Origine chimique de l'électricité de la pile.** — Nous venons de voir que les actions chimiques sont une source abondante d'électricité. Or, comme les métaux de la pile sont attaqués chimiquement par le liquide placé entre les couples, on est porté à penser que l'électricité qui s'en dégage est due à cette action chimique. Fabroni, avant l'invention de la pile, attribuait déjà l'électricité qui produit la commotion de la grenouille, à l'action chimique exercée par les parties humides sur les métaux de l'arc de communication. Pepys, puis Biot et F. Cuvier constatèrent ensuite qu'une pile fonctionnant sous un récipient absorbe l'oxygène de l'air ; et que, dans le gaz oxygène pur, son action est plus vive, et dans l'azote, plus faible que dans l'air. L'électricité des actions chimiques ayant été ensuite constatée directement, on regarda l'action du liquide de la pile sur ses éléments comme la principale source de son électricité. Davy, après avoir voulu attribuer les effets observés par Becquerel au *contact* des liquides avec les métaux, adopta une théorie mixte, dans laquelle il regardait l'action chimique comme la source principale de l'électricité de la pile, mais en attribuant toujours une influence au contact, qui déterminerait l'espèce de fluide qui se porte sur chaque métal. Fabroni, puis Gautherot et Wollaston ont ensuite soutenu que l'action chimique était la *seule* cause de l'électricité de la pile ; mais le dernier, en voulant trop généraliser et en attribuant à l'action chimique, même l'électricité due au frottement (1804), jeta du discrédit sur l'opinion qu'il voulait faire prévaloir. Dès 1801, époque où Volta vint répéter ses expériences à Paris, M. Parrot rejetait l'hypothèse du contact et attribuait toute l'électricité de la pile à l'oxydation des éléments. Il développa même une théorie, dans laquelle on remarque beaucoup de choses qui ont été retrouvées et confirmées depuis<sup>1</sup>. En 1812, Davy montra que, dans un couple fer et cuivre, le plus oxydable des deux métaux prend l'électricité négative dans les liquides *oxydants*, et que celui qui a le plus d'affinité pour le soufre prend ce fluide dans les liquides *sulfurants*. Il construisit aussi une pile dans laquelle il n'y avait qu'un seul métal avec deux liquides différents. Ces faits auraient dû le faire renoncer à l'idée du contact ; mais on était alors ébloui de la merveilleuse fécondité qu'avait eue cette hypothèse entre les mains de Volta.

Après la découverte du multiplicateur, Avogadro et Michelotti<sup>2</sup> montrèrent de nouveau qu'un couple plongé successivement dans différents liquides présente son pôle positif tantôt d'un côté, tantôt de l'autre : fait capital et inconciliable avec les théories de Volta et de Davy. A partir de cette époque, beaucoup de physiciens travaillèrent à développer la théorie chimique de la pile, parmi les-

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 45.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXII.

quels Ersted, Becquerel, Ritchie, Pouillet, Despretz, Schönbein, Faraday..., et principalement A. de La Rive, qui, depuis 1827, au moyen d'expériences nombreuses poursuivies avec une grande persévérance et conduites avec une rare sagacité, a concouru surtout à ruiner l'hypothèse du contact et à faire triompher la théorie *électro-chimique* de la pile.

**18-12. Inversions produites par le changement de liquide.** — Si l'on forme un couple avec du *cuivre* et du *fer* ou *étain*, le pôle *négalif* se trouve du côté du *cuivre* dans de l'eau salée ou acidulée, ou dans une dissolution de potasse. Ce même pôle se trouve, au contraire, du côté de l'autre métal quand on plonge le couple dans l'ammoniaque, ce liquide attaquant le *cuivre* plus activement que le *fer* ou l'*étain*. Un couple formé de *plomb* et *cuivre* ou *fer* a son pôle *positif* du côté du *plomb* dans l'acide nitrique étendu, et du côté du *cuivre* dans le même acide concentré. De La Rive a observé beaucoup d'autres phénomènes de ce genre<sup>1</sup>.

Faraday, de son côté, a constaté de nombreux cas d'*inversion*<sup>2</sup>. Il a établi, de plus, qu'il n'y a d'action chimique, et par conséquent production de courant, qu'autant que le liquide est un *électrolyte*, c'est-à-dire qu'il est décomposable par l'électricité. La figure 1284 montre comment il opérerait. Deux vases de verre reçoivent le liquide sur lequel on veut opérer. Le couple est formé par des bandes *a* et *b* de métaux différents réunis en *n*; *e*, *e'* sont des fils de platine qui communiquent avec le rhéomètre. Un grand nombre d'essais, faits dans les conditions les plus variées, ont prouvé à Faraday qu'il n'y a jamais de courant quand il n'y a pas d'action chimique. L'absence de résultat ne pouvait être attribuée au défaut de conductibilité du liquide; car en chauffant la soudure *n*, il obtenait un courant *thermo-électrique*, qui, malgré sa faible intensité, traversait le liquide et déviait l'aiguille du rhéomètre.

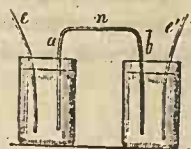


Fig. 1284.

Le tableau qui suit contient une partie des résultats obtenus par Faraday avec 10 métaux différents et divers liquides. Dans chaque colonne, le métal le *dernier* inscrit est *plus* attaqué que ceux qui le précèdent, et il prend le fluide *négalif*, qu'il cède au métal contigu le moins attaqué, d'où le fluide passe dans le liquide qui baigne ce dernier. Le pôle *positif* se trouve donc du côté du métal le plus attaqué, c'est-à-dire de celui qui se trouve inscrit le dernier. Chaque métal porte un numéro qui permet de reconnaître combien l'ordre est différent avec les divers liquides.

Avec l'*acide sulfurique étendu*, la série est celle de la première colonne, sauf que le *plomb* et l'*étain* changent de place. Avec le *sulphhydrate* de potasse *jaune*, la série diffère beaucoup de celle que donne le même sel incolore.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVII, p. 229.

<sup>2</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. I, p. 93.

ACIDE NITRIQUE étendu.	ACIDE NITRIQUE concentré.	ACIDE chlorhydrique.	POTASSE caustique.	SULFHYDRATE de pot. incolore.
1 Argent.	5 Nickel.	3 Antimoine.	4 Argent.	6 Fer.
2 Cuivre.	1 Argent.	1 Argent.	5 Nickel.	5 Nickel.
3 Antimoine.	3 Antimoine.	5 Nickel.	2 Cuivre.	4 Bismuth.
4 Bismuth.	2 Cuivre.	4 Bismuth.	6 Fer.	8 Plomb.
5 Nickel.	1 Bismuth.	2 Cuivre.	4 Bismuth.	1 Argent.
6 Fer.	6 Fer.	6 Fer.	8 Plomb.	3 Antimoine.
7 Étain.	7 Étain.	8 Plomb.	3 Antimoine.	7 Étain.
8 Plomb.	8 Plomb.	7 Étain.	9 Cadmium.	2 Cuivre.
9 Cadmium.	10 Zinc.	9 Cadmium.	7 Étain.	10 Zinc.
10 Zinc.	9 Cadmium.	10 Zinc.	10 Zinc.	9 Cadmium.

#### 1843. Origine chimique de l'électricité du couple voltaïque. —

L'absence de courant quand il n'y a pas d'action chimique, et les *inversions* dont nous venons de parler, prouvent que les électricités qui se portent de part et d'autre d'un couple, sont dues à l'action chimique exercée sur les métaux qui le composent. S'il est nécessaire de réunir deux métaux différents, c'est afin que l'action du liquide soit différente sur les deux parties du couple; sans cela, on aurait deux courants opposés qui s'entre-détruisaient.

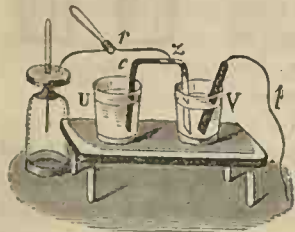


Fig. 1285.

L'expérience suivante, due à Peltier, prouve bien que ce n'est pas au point de contact que l'électricité prend naissance : un couple zinc-cuivre, *zc* (fig. 1285) est plongé dans deux vases isolés V, U contenant de l'eau mêlée d'acide sulfurique. Le vase V communiquant avec le sol par un fil de platine *p*, on fait communiquer, au moyen d'un autre fil de platine isolé *r*, le point *z* avec le plateau collecteur d'un électromètre condensateur. Le plateau s'électrise négativement, comme si la communication était établie avec le cuivre *c*, ou avec le liquide du vase U. — Nous avons vu, du reste, qu'on peut obtenir des courants avec un simple métal, en employant deux liquides agissant d'une manière différente sur deux parties distinctes de ce métal (1810); et même sans employer de métaux, au moyen de mèches imbibées de certaines dissolutions (1836). — Dans les *piles sèches* (1825), l'action chimique est due à l'humidité des disques de papier; quand cette humidité a été à la longue épuisée, et l'oxygène qu'elle contient absorbé, la pile sèche ne donne plus d'électricité.

**1811. Couple électrochimique.** — On voit, d'après ce qui précède, que le couple *électrochimique* est formé d'un zinc et d'un cuivre séparés par du liquide, et non d'un zinc et d'un cuivre juxtaposés, comme dans la théorie de Volta; le cuivre en contact avec le zinc ne faisant que recevoir l'électricité négative que chasse sur ce dernier l'action chimique exercée à sa surface.

Puisque l'action chimique est la source de l'électricité dégagée par un couple métallique, on doit chercher à associer deux métaux dont l'un soit attaqué fortement par le liquide, et l'autre le moins possible; et l'intensité du courant mesurée par le rhéomètre sera d'autant plus grande que la différence d'action chimique sera plus prononcée. Le zinc convient parfaitement pour métal attaqué; avec l'acide sulfurique dilué, l'action chimique est très-vive, et le sulfate formé, très-soluble dans l'eau, ne reste pas à la surface, qui se trouve ainsi toujours librement exposée à l'action de l'acide. Le fer ne donne pas d'aussi bons résultats, car il formerait le pôle négatif d'un couple de fer et zinc.

Pour la lame la moins attaquée, on substitue souvent au cuivre, le platine ou la plombagine, que l'eau acidulée n'attaque pas du tout. Voici, du reste, les effets électriques produits pendant les actions chimiques complexes qui ont lieu entre le liquide et le zinc. Il y a ici trois actions successives : décomposition de l'eau, oxydation du zinc, combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique. Dans la décomposition de l'eau, l'hydrogène reçoit le fluide *positif*, qu'il communique au liquide. L'oxygène prend le fluide *négatif*; mais en se combinant avec le zinc, il prend le fluide *positif*, et revient à l'état neutre, pendant que le zinc prend le fluide *négatif*. Quant à la combinaison de l'acide et de l'oxyde de zinc, les électricités qu'elle dégage se neutralisent dans la combinaison même qui se fait, tout l'oxyde étant absorbé par de l'acide; de sorte qu'en définitive, les électricités recueillies sont simplement celles qui représentent la décomposition de l'eau. Nous verrons plus tard des expériences qui confirment cette conclusion.

La quantité d'électricité que dégage un couple dépend de l'étendue de ses surfaces attaquée, et lui est sensiblement proportionnelle. Mais la *tension* à ses pôles quand le circuit est ouvert, ou son *intensité*, comme l'appelle Faraday, dépend aussi de la nature de l'action chimique; car il ne faut pas oublier qu'une portion des fluides dégagés peut se recombinaer immédiatement, et cette portion dépend, en même temps que de la conductibilité du liquide, de la manière dont les molécules se déplacent pendant l'action chimique, ainsi que nous venons d'en voir un exemple dans l'action de l'acide sulfurique sur le zinc. Dans ces différentes réactions, les électricités dégagées successivement et en divers sens donnent un effet résultant dépendant de la manière dont elles se succèdent, et la portion qui échappe à la récomposition immédiate dépend en partie de la route que suivent les molécules électrisées, dans les mouvements dont elles sont animées pendant la réaction.

D'un autre côté, les fluides qui se portent aux pôles d'un couple tendent à se recombinaer à travers le couple même, et d'autant plus que ces électricités ont une plus grande tension. Cette tension augmente d'abord, puis reste constante

quand la quantité de fluide produite par l'action chimique est égale à celle qui se recombine à travers la pile. On voit donc que la tension sera d'autant plus grande que l'action chimique fournira dans le même temps de plus grandes quantités d'électricités, et que les fluides accumulés aux pôles éprouveront plus de difficulté à traverser les matières qui composent le couple. Il y a, en effet, une certaine difficulté, qui forme ce qu'on appelle la *résistance* du couple, et dont l'imparfaite conductibilité du liquide est une des causes. Pouillet a trouvé, par exemple, comme nous le verrons plus loin, qu'une dissolution de *sulfate de cuivre* conduit, à égale section, 2 500 000 fois moins que le platine, qui est le moins conducteur des métaux.

**Force électromotrice.** — La différence algébrique de tension aux pôles représente ce qu'on nomme la *force électromotrice* du couple; on voit qu'elle dépend de l'activité et de la nature de l'action chimique, et qu'elle augmente avec la résistance intérieure du couple. Mais elle est indépendante de l'étendue de la surface attaquée par le liquide.

Si l'on réunit les pôles par des conducteurs, une partie des électricités accumulées passe par ces conducteurs, en formant le *courant*, et en quantité d'autant plus grande qu'ils offrent moins de résistance. Si ces conducteurs renfermaient des fils très-fins, des interruptions à franchir, des liquides peu conducteurs, si enfin le circuit présentait une très-grande longueur, la proportion d'électricité qui le traverserait serait moindre; une plus grande quantité se recombinaut à travers le couple même. Il faut donc, dans ce cas, augmenter la résistance de la pile à cette recombinaison, et

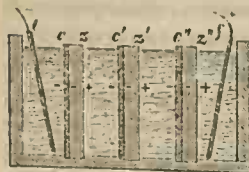


Fig. 1286.

c'est ce que l'on fait en réunissant plusieurs couples.

**1815. Pile à plusieurs couples.** — Si l'on réunit plusieurs couples en série, la résistance intérieure qui s'oppose à la réunion des fluides accumulés aux pôles est augmentée, et l'électricité peut acquérir à ces pôles une plus forte tension<sup>1</sup>.

Considérons, par exemple, trois couples égaux de zinc et cuivre  $cz, c'z', c''z''$  (fig. 1286), séparés par de l'eau acidulée qui agisse d'une manière identique sur tous les couples. L'action chimique exercée sur le zinc  $z$  produira les deux électricités; le fluide *positif* se répandra dans le liquide  $zc'$ , et le fluide *négalif* se portera sur le zinc  $z$ , passera dans le cuivre  $c$ , puis dans l'eau acidulée où plonge l'électrode  $c$ . De même, l'action exercée à la surface du zinc  $z'$ , donnera du fluide *positif* au liquide  $z'e''$ , et du fluide *négalif* à  $c'z'$ , et au liquide  $c'z'$ , où il neutralisera le fluide *positif* provenant du couple  $cz$ . Le fluide *positif* qui se rend dans le liquide  $z'e''$  est, de même, neutralisé par le fluide *négalif* provenant de l'action chimique exercée sur  $z''$ , et le fluide *positif* provenant de cette

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. LXII, p. 166.

dernière action se rend enfin sur l'électrode *f*, qui forme le pôle positif de la pile.

Il y a donc, à chaque extrémité de la pile, un excès d'électricité libre qui augmente très-rapidement par la continuité de l'action chimique, mais qui atteint bientôt un maximum de tension, même si l'on suppose les électrodes séparées. En effet, les électricités des pôles se rejoignent à travers la pile même, et avec d'autant plus d'énergie que leur tension est plus grande. Il arrivera donc un moment où cette tension sera telle que la quantité ainsi détruite sera égale à chaque instant à celle que fournit l'action chimique. Le maximum de tension sera d'autant plus élevé que l'action chimique sera plus active, et que les fluides trouveront plus de résistance à travers la pile. Or cette résistance s'accroît avec le nombre des couples, à cause de l'augmentation d'espace à parcourir, ce que Pouillet a reconnu directement par l'expérience.

Quand la conductibilité du liquide est faible, la tension aux pôles tend à augmenter. C'est ce qui a lieu dans les piles sèches; mais, d'un autre côté, le peu d'énergie de l'action chimique de ces sortes de piles fait qu'elles ne se rechargent que lentement quand on les a déchargées. Une pile zinc et cuivre montée avec de l'eau pure est dans le même cas; quoique l'action chimique soit faible, cette pile finit par présenter à ses pôles des tensions sensiblement aussi grandes que si elle était garnie avec de l'eau acidulée; seulement, il faut un temps assez long pour atteindre le maximum. De La Rive a fait des expériences à ce sujet, avec une pile de 600 couples. Il a reconnu que le temps nécessaire pour arriver au maximum de tension est d'autant plus court que l'action chimique est plus vive; et que, à égalité de résistance totale de la pile, il faut d'autant moins de couples pour obtenir une tension donnée, que l'action chimique est plus vive. M. Gassiot est arrivé aux mêmes résultats au moyen d'une pile cuivre et zinc de 3520 couples plongés dans de l'eau pure, dans des vases séparés bien isolés. Malgré la lenteur de l'action chimique, il pouvait obtenir une série continue de fortes étincelles.

Si nous supposons maintenant que le liquide ait une action sur le cuivre, mais plus faible que sur le zinc, le résultat sera dû à la différence d'action sur les deux métaux. Si les couples sont inégaux ou inégalement attaqués, l'effet sera au moins celui qu'on obtiendrait si tous les couples étaient égaux au plus petit ou au moins attaqué. Toute l'électricité qui s'échappe de part et d'autre du couple le plus fort n'étant pas neutralisée par les fluides des couples voisins, l'excédant se recombinera à travers ce couple même dont l'effet se trouvera ainsi ramené à celui du plus faible.

**18.16. Quantité, tension.** — Il résulte de la théorie qui précède qu'un seul couple doit donner la même *quantité* d'électricité (qu'il ne faut pas confondre avec la *tension*) que plusieurs couples égaux, quand les pôles sont réunis par un conducteur *ne présentant pas de résistance sensible*; car les pôles ne reçoivent que les électricités des couples extrêmes. C'est, en effet, ce que Pouillet a reconnu au moyen du galvanomètre. Si le courant traverse un

*électrolyte*, on constate aussi que la quantité décomposée reste la même, quel que soit le nombre de couples, pour un même poids de zinc dissous dans chacun d'eux.

La réunion de plusieurs couples a donc seulement pour effet, en augmentant la résistance de la pile, de rendre plus grande la proportion des électricités qui traversent le circuit extérieur. Et nous verrons que la force électro-motrice d'une pile, représentée par sa tension aux pôles, est proportionnelle au nombre des couples. Quand le circuit extérieur offre très-peu de résistance, il faut donc se contenter d'un petit nombre de couples. Cependant, deux ou trois couples peuvent donner un plus fort courant qu'un seul, les électricités qui sont en présence dans l'eau acidulée s'attirant et s'éloignant plus rapidement des surfaces attaquées, ce qui en préserve une plus grande proportion de la recombinaison immédiate. Nous verrons aussi plus loin (1848) comment le voisinage de plusieurs couples peut exalter sensiblement l'action chimique dans chacun d'eux.

**1817. Courants de la pile.** — La réunion des électricités des pôles à travers la pile forme un véritable courant allant du pôle positif au pôle négatif. Mais, indépendamment de ce courant, il y en a un autre, beaucoup plus intense, provenant de la neutralisation des électricités des couples voisins à travers le liquide interposé. Ce dernier courant marche du pôle négatif au pôle positif (fig. 1286) et forme la continuation de celui qui traverse le fil conjonctif. Il est assez intense, quand le circuit est fermé, pour dévier une aiguille aimantée placée sur une pile à auge, malgré le contre-courant des pôles, comme l'a constaté Ampère. De La Rive a reconnu que ce courant a la même intensité entre tous les couples, même quand ils sont inégaux et inégalement attaqués, comme cela résulte, du reste, de ce que nous avons vu plus haut (1845). *Quand le circuit est ouvert*, le contre-courant des pôles est produit à chaque instant par des quantités d'électricité égales à celles qui se réunissent entre les couples, et l'aiguille aimantée n'est pas déviée.

**1818. Piles qui ne fonctionnent qu'avec le circuit fermé.** — Il y a certaines piles qui présentent un phénomène singulier : c'est qu'il ne s'y produit pas d'action chimique, ni par conséquent d'électricité, tant que le circuit est ouvert. Telles sont, par exemple, les piles formées de zinc, platine et eau pure ou tenant en dissolution du sulfate de zinc ; de peroxyde de plomb, platine et eau... Ce phénomène, qui est en opposition avec la théorie du contact (car on ne trouve pas d'électricité aux pôles tant que le circuit reste ouvert), a été expliqué par M. Schœbein<sup>1</sup>, dans la théorie électrochimique, au moyen de la polarité moléculaire (1645) :

Considérons une lame de zinc (fig. 1287) plongée dans de l'eau pure. Les molécules du zinc et celles de l'oxygène de l'eau tendent les unes vers les autres par affinité chimique, tendance qui n'est pas suivie d'effet parce qu'elle ne peut

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), 1850, t. XIII, p. 192.



vaincre l'affinité de l'oxygène pour l'hydrogène, mais qui entraîne la rupture de l'équilibre électrique des molécules de l'eau et du zinc. Le zinc, qui est *électro-positif* comme tous les métaux, repousse l'hydrogène, qui est aussi *électro-positif* (1828), et attire l'oxygène, qui est *électro-négatif*; et les molécules de l'eau se trouvent *polarisées* (1645), de manière que l'oxygène est, dans toutes, tourné du côté de la lame de zinc, comme on le voit dans la série *ho*. De même, les molécules du zinc se trouvent polarisées de manière que l'électricité positive se trouve du côté de la surface mouillée, et l'électricité négative du côté opposé. Si nous plaçons en PP une lame inactive, de platine par exemple, ses molécules seront polarisées par celles de l'eau, et réagiront ensuite pour augmenter la polarisation de celles-ci. Tant que les lames resteront isolées, cet équilibre électrique subsistera; mais, si l'on vient à les réunir par un fil métallique *m*, ou à les faire communiquer avec le sol, l'électricité négative du zinc s'échappera par le fil conjonctif; son électricité positive étant alors libre agira plus vivement sur les électricités des éléments de l'eau et les séparera; l'oxygène viendra se combiner avec une molécule de zinc en neutralisant son fluide positif, et les deux atomes d'hydrogène s'uniront à l'atome d'oxygène de la molécule d'eau suivante, comme dans la théorie de Grotthuss (1828). L'hydrogène repoussé de celle-ci s'unira à l'oxygène de la troisième molécule, et ainsi de suite, comme en *o'h'*; et enfin deux molécules d'hydrogène seront mises en liberté sur la surface de la lame inactive et neutraliseront son électricité négative, pendant que l'électricité positive passera dans le fil conjonctif.

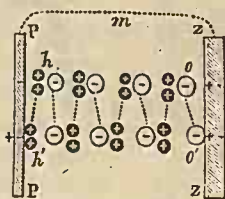


Fig. 1287.

Ces décharges successives se font simultanément entre toutes les molécules, comme dans les étincelles des tubes étincelants (1690). L'action chimique sera donc provoquée par la réunion des lames, et un courant en sera la conséquence.

Si la lame PP est électro-négative, comme le sont les peroxydes de manganèse ou de plomb, son action sur l'hydrogène se joindra à celle du zinc pour polariser les molécules d'eau; si cette lame est électro-positive, l'eau sera polarisée moins fortement et seulement par une différence d'action.

#### 1849. Influence de la réunion de plusieurs couples, sur la polarité.

— La polarité des molécules du liquide et des métaux se produit aussi dans les couples qui sont attaqués par le liquide avant la fermeture du circuit; d'où il résulte que l'action chimique doit être plus énergique quand le circuit est fermé. C'est, en effet, ce qui a lieu, et l'on voit l'hydrogène se dégager plus abondamment du couple quand le circuit est fermé.

De La Rive trouve dans cette polarité des molécules une des causes de l'augmentation de tension aux pôles quand on réunit plusieurs couples. Soit *pz* (fig. 1288) un couple zinc et platine; *z'* et *p'*, les lames de zinc et de platine des deux couples voisins. Si le zinc *z* n'exerçait pas d'action sur le liquide *v*, la

polarisation produite en  $v'$  par le zinc  $z'$  se transmettrait simplement à  $pz$ , puis à  $v$ , qui serait polarisé comme  $v'$ . Mais, comme  $z$  agit aussi pour polariser  $v$ , les deux actions s'ajoutent, et le liquide  $v$  est doublement polarisé. La polarité qu'il reçoit de  $z$  réagit à son tour sur  $z$ , se transmet à  $p$ , puis au liquide  $v'$ , qui se trouve aussi doublement polarisé comme  $v$ . Cette double polarité active l'action chimique et augmente, par conséquent, la tension aux pôles (1845). On verrait de même qu'en associant 3, 4... couples, on triple, on quadruple... la polarité du liquide de chacun d'eux.

**1850. Propriétés du zinc distillé.** — Cette théorie sert à expliquer divers faits importants pour la construction des piles.

De La Rive a découvert, en 1830, que le zinc distillé n'est qu'à peine attaqué par l'acide sulfurique étendu, tandis qu'il l'est vivement quand il fait partie d'un couple dont le circuit est fermé. M. d'Almeida a même reconnu que le zinc très-pur obtenu en décomposant un sel de zinc par un courant, résiste complètement à l'action de l'acide sulfurique mêlé avec  $\frac{1}{5}$  de son volume d'eau, et ne s'y dissout que très-lentement quand ce liquide est bouillant.

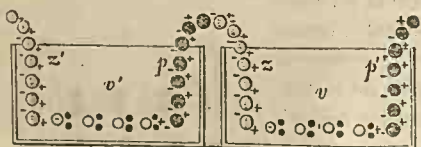


Fig. 1288.

Voici comment de La Rive explique cette absence d'action<sup>1</sup>. Le zinc est d'abord attaqué, mais presque aussitôt l'hydrogène dégagé à sa surface y reste adhérent et la préserve de l'action du liquide. Dans le vide, ce gaz se dégage et l'action chimique se produit activement.

Dès qu'on rétablit la pression atmosphérique, on voit les bulles de gaz s'aplatir et s'étendre sur la surface, et l'action chimique cesser presque totalement. Ces expériences ont été faites principalement sur du zinc amalgamé qui est inattaquable comme le zinc pur, dans les mêmes conditions, ainsi que nous allons le voir. Elles ont été reprises et développées par M. d'Almeida, qui a montré, en outre, comment les bulles de gaz adhèrent plus fortement sur une surface unie que sur une surface rugueuse, ce qui a été appliqué dans la pile de Smée (1822).

L'explication précédente, qui avait été donnée par Daniell, mais sans expériences à l'appui, est confirmée par les recherches de M. Cailletet<sup>2</sup>, qui a constaté que les actions chimiques accompagnées de dégagements de gaz, entre liquides et métaux, sont ralenties ou même arrêtées par de très-fortes pressions. Il opérait dans un tube capillaire où la pression pouvait être portée à 300 atmosphères, au moyen d'une presse hydraulique. La décomposition de l'eau paraissait ainsi complètement arrêtée, sous une pression de 150 atmosphères.

Il nous reste à expliquer comment le zinc impur du commerce est attaqué vivement sans faire partie d'un circuit fermé. Faraday, Grove, de La Rive,

<sup>1</sup> Arch. de l'électricité, t. III, p. 461, et Ann. de chim. et de phys., 4<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 427.

<sup>2</sup> Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, t. LXVIII.

attribuent ce résultat aux parcelles de fer et de cadmium que contient ce zinc<sup>1</sup>. Ainsi, des parcelles de fer *f, f, f* (fig. 1289) constitueront le métal inactif, ou le moins actif, d'une infinité de petits couples, dont le circuit sera fermé par la lame même. Il se formera alors, dans le liquide une foule de séries courbes, *a, b, c*, de molécules polarisées. L'hydrogène se dégagera sur les parcelles de fer, le zinc s'oxydera, les électricités reçues par le fer et le zinc se recombineront à travers la lame, et les mouvements confus du liquide empêcheront l'adhérence de l'hydrogène au zinc, à moins qu'une forte compression ne le retienne, comme dans les expériences de M. Cailletet. D'après de La Rive, la dissolution qui agit le plus vivement est celle qui conduit le mieux l'électricité; elle a pour densité 1,259, et renferme de 30 à 50 pour cent d'acide en poids. En examinant de près la surface du zinc, on remarque des points d'où partent les bulles d'hydrogène; ces points correspondent aux parcelles de fer. Comme celles-ci ne sont pas dissoutes par l'acide, la surface devient bientôt inégale et rugueuse. — Pour confirmer l'explication qui précède, de La Rive a mêlé à du zinc pur en fusion, du fer en poudre même très-fine, et lui a communiqué ainsi la propriété d'être vivement attaqué par l'acide sulfurique. Les métaux moins oxydables que le zinc, tels que le cuivre, le plomb, l'étain, le cadmium, agissent comme le fer, mais à un moindre degré. Des parcelles simplement implantées dans du zinc pur, un fil de platine enroulé tout autour, produisent le même effet. Pour comparer les résultats, de La Rive coulait le zinc, pur ou mélangé, en cylindres égaux qu'il introduisait successivement dans un flacon entièrement rempli de la dissolution acide. Le volume d'hydrogène dégagé dans un temps donné était déduit de la quantité dont le liquide montait dans un tube latéral communiquant avec le fond du flacon.



Fig. 1289.

Quand un couple est construit avec du zinc impur, ces *actions locales*, comme Faraday appelle les petits courants superficiels, affaiblissent le courant principal en troublant la distribution de l'électricité. Aussi, remarque-t-on que le zinc distillé donne un courant bien plus intense que le zinc du commerce, qui s'use plus vite, et se dissout, même quand le circuit est ouvert.

**1851. Piles à zinc amalgamé.** — Le zinc ordinaire, amalgamé à sa surface en le frottant avec du mercure, forme, comme le zinc distillé, des couches qui ne s'usent pas, tant que le circuit est ouvert, et qui donnent même *beaucoup plus* d'électricité pour une égale quantité de zinc dissous. Ainsi, une pile de *dix* couples amalgamés produit des effets qui exigeraient plusieurs centaines de couples ordinaires, et plus d'effet que *dix* couples à zinc distillé.

Pour amalgamer le zinc, on étend du mercure sur sa surface, et l'on frotte avec un tampon imbibé d'eau acidulée par l'acide sulfurique, pour décaper le zinc. Quand la plaque est épaisse, on répète plusieurs fois l'opération, afin que

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de ph., 2<sup>e</sup> s., t. XLIII, et *Traité d'élect.*, par de La Rive, t. II, p. 609.

le mercure pénètre profondément. Un moyen prompt et facile, imaginé en Angleterre, consiste à plonger simplement chaque lame de zinc dans une dissolution d'azotate de bioxyde de mercure mêlée d'acide chlorhydrique; deux ou trois immersions suffisent pour que le zinc soit fortement amalgamé.

Les propriétés du zinc amalgamé ont été signalées par Davy, en 1826; leur application aux piles, qui a été faite par Kemp, constitue un très-important perfectionnement. L'influence de l'amalgamation s'explique en partie par l'absence d'actions locales, le zinc amalgamé étant recouvert d'une couche homogène dont tous les points sont également oxydables. De plus, l'amalgamation rend l'action chimique beaucoup plus active, le zinc étant plus oxydable à cause de son état de division dans le mercure. Aussi le zinc distillé gagne-t-il beaucoup lui-même à être amalgamé. — Nous verrons plus tard comment M. J. Regnault rend compte d'une autre manière de l'influence de l'amalgamation sur la force électromotrice.

#### IV. Causes de l'affaiblissement de la pile. — Piles à deux liquides.

**1852. Diminution de la force de la pile.** — Quand on réunit les pôles d'une pile voltaïque, elle donne au premier moment beaucoup d'électricité; mais ensuite, elle s'affaiblit, d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement. On ne peut attribuer ce résultat à l'altération du liquide, dont une grande partie est intacte, car il y a beaucoup de liquide autour de chaque couple. De plus, la pile reprend de la force quand on agite le liquide près de la lame inactive, ou quand on passe un pinceau à sa surface; et elle retrouve peu à peu son énergie première quand on ouvre le circuit; fait remarqué par Ritter. Plus tard, Figliachi et Brugnatelli prescrivait de laisser reposer la pile pour qu'elle reprit son activité. Marianini, qui a étudié avec détail ce phénomène<sup>1</sup>, a vu une pile à couronne reprendre sa force quand on ouvrait le circuit, d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, comme pour l'affaiblissement. — Si l'on fait passer à travers une pile affaiblie, du pôle positif au pôle négatif, le courant d'une autre pile, la première reprend promptement sa force. On remarque, en outre, que l'affaiblissement est d'autant plus rapide que, le liquide agissant plus vivement, le courant est plus intense. — Marianini a obtenu des résultats analogues avec les piles sèches de Zamboni (1825). Ces sortes de piles s'affaiblissent rapidement quand les pôles sont réunis, et reprennent peu à peu leur force quand on isole ces pôles.

**1853. Polarisation secondaire des éléments.** — Faraday et Becquerel ont reconnu que l'affaiblissement de la pile est dû principalement aux dépôts qui se forment sur les lames métalliques, à la suite de la décomposition du liquide par les courants qui le traversent (1847). Nous avons déjà parlé de ces dépôts,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVIII, p. 337.

qui constituent la *polarisation secondaire* des lames (1837). Sur les plaques, comme celles de platine, vers lesquelles marche le courant *dans le liquide*, il se dépose des bases ou corps analogues; et sur les plaques d'où part ce courant, comme celles de zinc, il se dépose des acides ou matières analogues. Les corps déposés, réagissant les uns sur les autres à travers le liquide, dégagent de l'électricité. Le fluide positif se porte sur l'acide, et le fluide négatif sur la base, en donnant naissance à un *courant secondaire* inverse de celui de la pile, et neutralisant en partie ce dernier. On met en évidence cette production de courant par les couches déposées, en formant des couples avec les lames de cuivre ou de zinc d'une pile qui vient de fonctionner, et des lames neuves de même espèce. On voit les lames qui ont servi prendre le fluide négatif, et les neuves, le fluide positif.

Dans le cas où le liquide est une dissolution saline, les dépôts sont formés d'acide, et de base ou de métal; et l'on peut produire un courant en associant deux lames dont l'une a été plongée dans un acide, et l'autre dans un alcali. Mais quand le liquide est de l'eau pure ou acidulée, ce liquide est décomposé, et il se dépose du gaz hydrogène sur la lame inactive, et de l'oxygène sur l'autre.

Matteucci a prouvé directement l'existence de ces couches de gaz, sur des lames de platine qui avaient servi d'électrodes pour décomposer l'eau. Ces lames ayant été introduites dans deux éprouvettes remplies d'oxygène ou d'hydrogène, la lame qui avait servi d'électrode négative absorba de l'oxygène, et l'autre de l'hydrogène. Des lames neuves plongées, l'une dans ce dernier gaz, l'autre dans l'oxygène, donnent aussi un courant quand on les enfonce ensuite dans un liquide conducteur. Il suffit, du reste, qu'une seule des lames ait été plongée dans un des gaz pour qu'on obtienne un courant, et l'hydrogène donne alors un résultat beaucoup plus marqué que l'oxygène. M. Schœnbein a trouvé même qu'il suffit, pour obtenir un courant, qu'une des lames neuves plonge dans de l'eau contenant de l'oxygène, et l'autre dans de l'eau distillée; les deux liquides sont séparés dans un même vase, par une cloison poreuse. L'eau est hydrogénée, soit artificiellement, soit parce qu'elle a reçu de l'hydrogène dans la décomposition de l'eau, produite préalablement dans le même appareil. L'eau mêlée d'oxygène n'a pas donné de courant dans les mêmes circonstances.

Daniell a signalé, parmi les matières qui se déposent sur la lame inactive dans l'eau acidulée, du zinc métallique provenant de la décomposition du sulfate de zinc formé. Cette couche, qui peut être assez épaisse pour qu'on puisse la détacher par fragments, constitue une lame de zinc opposée à celle du couple, et donnant un courant opposé à celui que l'on veut obtenir.

Indépendamment de l'action chimique qu'ils produisent, les dépôts, *surtout quand ils sont gazeux*, ralentissent encore l'action chimique en s'interposant entre les lames métalliques et le liquide, et forment un obstacle au passage de l'électricité, du liquide dans le métal, ou *vice versâ*.

Il est facile de comprendre maintenant pourquoi l'affaiblissement se montre surtout quand le circuit est fermé sans résistance extérieure sensible; c'est que

le courant intérieur de la pile n'étant pas alors contrebalancé par le contre-courant des pôles (1847), les dépôts se forment rapidement. Quand on ouvre le circuit, ces dépôts se dissolvent, et la pile reprend son énergie. Un courant opposé d'une autre pile détruit les dépôts en en formant d'autres opposés qui neutralisent les premiers.

C'est surtout sur la lame inactive, que se forment les dépôts. Ceux qui tendent à recouvrir la lame attaquée sont généralement détruits par le fait même de l'action chimique qui s'y produit. Dans les piles à zinc et eau acidulée, le métal inactif reçoit, comme nous l'avons vu, une couche de gaz hydrogène, que l'on rend moindre en chaque point, en donnant au cuivre une grande étendue; ce qui explique les bons résultats qu'a obtenus Wollaston en repliant le cuivre autour du zinc.

#### 1854. Destruction de la couche d'hydrogène au moyen d'oxygène.

— Pour enlever l'hydrogène qui se dépose sur la lame inactive, on absorbe ce gaz au moyen d'oxygène, en ajoutant, comme nous l'avons vu, un peu d'acide azotique à l'eau acidulée : cet acide passe à l'état d'acide hypoazotique, en cédant de l'oxygène à l'hydrogène, qu'il absorbe en formant de l'eau. L'acide azotique attaquant le cuivre, le liquide prend alors une teinte bleue.



Fig. 1290.

#### Action de l'oxygène

de l'air sur la pile. — Nous avons vu que la pile absorbe

l'oxygène ambiant, ce qui augmente son activité (1841). M. Adie, puis Viard<sup>1</sup>, ont prouvé que cet oxygène se combine avec l'hydrogène de la lame inactive. Viard opérait en plongeant les métaux dans un liquide aéré ou purgé d'air par l'ébullition. Les deux lames métalliques *l*, *l'* (fig. 1290) étaient renfermées dans des tubes *t*, *t'* fermés en bas par des membranes. L'un d'eux était rempli de liquide aéré, l'autre, du même liquide privé d'air par l'ébullition, et ils communiquaient entre eux par du liquide de même espèce dans lequel ils plongeaient.

Dans un grand nombre d'expériences, faites sur divers métaux et sur une dizaine de dissolutions différentes, Viard vit la force du courant augmenter quand la lame la moins attaquée se trouvait dans le liquide aéré; ce qui montre bien que l'oxygène agit principalement en absorbant l'hydrogène de cette lame. Il procéda encore en comparant les intensités des courants, quand les deux lames plongeaient dans la même dissolution, successivement bouillie ou aérée.

Citons encore l'expérience suivante : les deux métaux *n*, *n'* (fig. 1291) sont engagés dans un gros tube *T*, qu'on a rempli de dissolution bouillie; par des

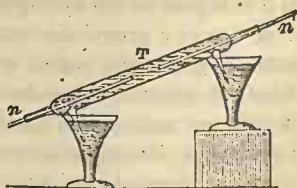


Fig. 1291.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 429, et XLII, p. 5.

pointes latérales qu'on a ensuite scellées à la lampe. Le courant produit ayant été observé, on casse les pointes, en plaçant le tube obliquement, de manière que la pointe la plus élevée plonge dans une dissolution aérée; le tube fonctionne comme un siphon, et le liquide qu'il renferme est remplacé par du liquide aéré. Aussitôt le courant devient au moins cent fois plus intense qu'auparavant. Grove avait déjà constaté qu'un couple de zinc et platine incapable de décomposer l'eau, la décomposait dès qu'on mettait la lame de platine en contact avec de l'oxygène gazeux. Viard a constaté encore, en mettant le liquide à l'abri du contact de l'air, et plaçant des cloches graduées remplies d'oxygène au-dessus des deux métaux du couple, que ce gaz est absorbé, et bien plus quand le circuit est fermé que lorsqu'il est ouvert, comme on pouvait le prévoir. Les expériences duraient de 20 à 25 jours avec l'eau pure, et de 15 à 16 heures seulement avec des liquides plus actifs.

M. Pulvermacher vient de construire une pile à un liquide, dans laquelle la dépolarisation du métal est produite par l'oxygène de l'air. Chaque couple est composé d'un vase poreux semblable à ceux que nous allons décrire (1858), laissant suinter le liquide intérieur dans lequel plonge du zinc amalgamé. Le métal inactif est formé d'un fil de platine enroulé à l'extérieur du vase en spires séparées, sur lesquelles l'oxygène de l'air détruit la polarisation produite par l'hydrogène.

**1855. PILES A DEUX LIQUIDES CLOISONNÉES.** — Il résulte de ce qui précède, que, pour obtenir une pile à courant constant, il faut : 1° conserver au liquide qui agit sur le zinc toujours le même degré de concentration; 2° éviter tout dépôt sur la lame inactive. Le moyen le plus sûr pour remplir cette dernière condition, consiste à plonger cette lame dans un liquide particulier qui soit capable d'absorber l'hydrogène. Le plus souvent, les deux liquides sont alors séparés par une cloison poreuse que l'électricité peut traverser, ce qui a fait donner à ces piles le nom de *piles cloisonnées*. Le premier couple à deux liquides a été imaginé, en 1829, par Becquerel, sous la forme suivante :

**Chaîne simple à oxygène<sup>1</sup>.** — Un flacon F (fig. 1292) contient de l'acide azotique, dans lequel plonge un gros tube T, fermé en bas par un tampon d'argile ou de kaolin. Ce tube est rempli d'une dissolution de potasse. Des lames de platine *b* et *a* reçoivent les électricités des deux liquides se combinant à travers le tampon d'argile. Le courant extérieur va de l'acide à la base (1836). Un autre courant traversant le liquide décompose l'eau de la potasse; l'oxygène se dégage sur la lame *b*, et l'hydrogène se porte sur la lame *a*; mais il est absorbé par l'acide azotique, qui lui cède de l'oxygène et passe à l'état d'acide hypo-azotique. Il ne se fait donc pas de dépôt gazeux en *a*. Ce même courant



Fig. 1292.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XII, p. 19, et 3<sup>e</sup> série, t. III, p. 436.

intérieur décompose l'azotate de potasse qui résulte de la combinaison de l'acide et de la potasse; l'acide se rend en *b*, et la base en *a* (1828); et ces substances sont absorbées, l'une par la potasse, l'autre par l'acide. Les lames *b* et *a* sont donc exemptes de dépôts, et le courant reste constant pendant plusieurs jours.

On augmente l'intensité de ce courant en mettant en *b* une lame de zinc amalgamé, qui s'électrise négativement en s'oxydant (1840), et forme un nouveau courant qui s'ajoute au premier. Un seul couple semblable peut décomposer l'eau.

Plus tard, Becquerel plaça l'acide et la potasse dans des vases séparés A et B (fig. 1293), communiquant par un tube *aVa'* rempli d'eau salée, dont la partie V est en verre, et les parties *a* et *a'*, en platine, et sont bouchées par de l'argile. Quand on fait communiquer les électrodes, on obtient un courant provenant de l'action de l'eau et du sel sur l'acide d'une part, et sur la potasse, de l'autre.

Matteucci a fait beaucoup d'expériences sur des piles construites avec deux liquides différents et un seul métal. Nous aurons, plus tard, occasion d'en citer quelques effets.

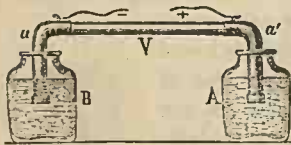


Fig. 1293.

**1856. Piles de Daniell.** — En 1836, Daniell, cherchant un moyen d'empêcher le dépôt de zinc qu'il avait remarqué sur le cuivre de certaines piles, eut l'idée de séparer les deux métaux par une cloison poreuse, et de plonger le métal inactif dans une dissolution

capable d'absorber l'hydrogène. Il imagina ainsi le couple qui porte son nom, et qui est un des plus constants et des plus fréquemment employés. On lui donne diverses formes. La figure 1294 représente un des plus anciens modèles. Un cylindre de cuivre C, lesté avec du sable, est fermé à sa partie supérieure par un cône qu'entoure un rebord *a* criblé de trous. Une vessie V, attachée à la partie supérieure du rebord, enveloppe le cylindre de cuivre et reçoit une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Des fragments du même sel sont placés sur le cône et maintiennent l'état de saturation. Un manchon de zinc amalgamé *z*, ouvert aux deux bouts et fendu suivant une arête, est plongé dans une dissolution de sulfate de zinc, de sel marin ou d'eau acidulée, qui baigne la vessie. Au zinc et au cuivre sont fixées les électrodes.

Dès que le circuit est fermé, l'action chimique a lieu : il se forme du sulfate de zinc; l'hydrogène de l'eau décomposée se porte vers le cuivre; mais, rencontrant le sulfate de cuivre, il s'unit à l'oxygène de l'oxyde de cuivre, et le métal se dépose sous forme pulvérulente sur la lame de cuivre, qui ne reçoit plus d'hydrogène, et dont la surface reste ainsi toujours de même nature. La dissolution de sulfate de cuivre est maintenue à l'état de saturation par les cristaux de sel qui s'y dissolvent en *a*.

Quand, au lieu d'eau acidulée, on emploie une dissolution de sel marin ou de sulfate de zinc, l'effet chimique ne se produit qu'avec circuit fermé; le zinc est



alors attaqué, et du cuivre se dépose sur le cylindre C. Pour expliquer la réaction, on peut dire que l'eau des dissolutions est d'abord polarisée, comme nous l'avons vu (1848); puis, dès que le circuit est fermé, l'eau est décomposée, l'oxygène s'unit au zinc, et l'hydrogène est absorbé par le sulfate de cuivre, dont il réduit l'oxyde en formant de l'eau, déposant le métal et mettant l'acide sulfurique en liberté. Cet acide est transporté par le courant intérieur jusqu'à l'oxyde de zinc, avec lequel il se combine. On ne voit pas comment peut se faire ce dernier transport; mais nous aurons, plus tard, à signaler une foule de cas où des transports semblables ont lieu d'une manière évidente.

La figure 1295 représente deux couples de Daniell dans lesquels le zinc est à l'intérieur : des vases de cuivre *c*, *c* contiennent la dissolution de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un sac en toile à voile contenant la solution de sulfate de zinc et la plaque de zinc *z*, *z*. Chaque plaque communique avec le

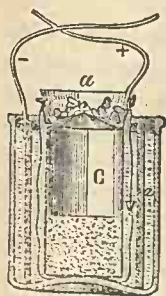


Fig. 1294.

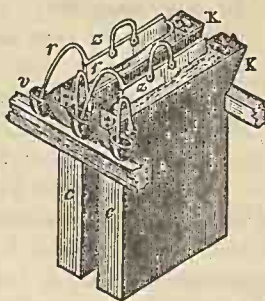


Fig. 1295.



Fig. 1296.

vase de cuivre du couple voisin, au moyen de crochets *r*, *r*... qui plongent dans des capsules de fer *v*... contenant du mercure. Des morceaux de sulfate de cuivre sont placés dans des appendices KK où pénètre la dissolution.

**Pile de Daniell à longue durée.** — Quand on a besoin d'une pile fonctionnant longtemps sans qu'on ait à s'en occuper, par exemple, dans les télégraphes, les horloges électriques, on emploie souvent le couple de la figure 1296. Les deux liquides sont séparés par un vase en terre poreuse *v*, muni d'un entonnoir criblé de trous, contenant des morceaux de sulfate de cuivre baignés par une dissolution du même sel. Cet entonnoir est traversé par un fil de cuivre *c*, qui plonge dans la dissolution, et forme l'électrode positive. La case zinc renferme de l'eau, à laquelle on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique pour commencer l'action. Cette action est faible, mais peut durer pendant plusieurs mois, pourvu qu'on ajoute tous les huit ou dix jours quelques morceaux de sulfate. Le cuivre se dépose en *c* autour du fil, en formant une houppe qu'on enlève au bout de quelques mois. — Souvent on supprime l'entonnoir, et l'on termine le fil de cuivre *c* par un disque du même métal plongé dans le liquide, et qui supporte

les cristaux de sulfate. Le cuivre se dépose sous ce disque, d'où on l'enlève facilement. Il faut éviter qu'il ne vienne toucher le vase poreux auquel il adhérerait fortement, de manière qu'il serait ensuite très-difficile de l'en séparer.

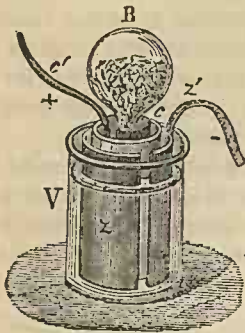


Fig. 1297.

**Pile à ballon.** — Dans cette pile, désignée quelquefois sous le nom de pile de M. Vérité, les cristaux de sulfate de cuivre sont placés dans un ballon B (fig. 1297) dont le col plonge dans la dissolution que contient le vase poreux. Un bouchon échantonné retient les cristaux.

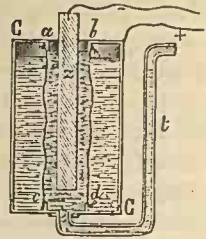


Fig. 1298.

Le zinc amalgamé, *z*, plonge dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. — L'eau acidulée perd peu à peu son acide qui forme du sulfate de zinc. Quand la pile doit servir longtemps, on y fait arriver de l'acide sulfurique goutte à goutte; la solution de sulfate de zinc, que sa densité entraîne au fond, est enlevée de temps en temps au moyen d'un siphon. Dans les premières piles imaginées par Daniell, elle sortait par un tube latéral *t* (fig. 1298). La cloison poreuse était formée d'un morceau d'intestin de bœuf lié en *ab* et *cd* à des rebords du vase de cuivre CC qui contenait la dissolution de sulfate de cuivre.

**1857. Piles de Wheatstone.** — Dans cette pile, le zinc est réduit en un amalgame pâteux qui remplit le vase poreux *v* (fig. 1299), dans lequel plonge un gros fil de cuivre, qui reçoit l'électricité négative. Une dissolution de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un manchon de cuivre, entoure le vase poreux. Quand le circuit est fermé, l'eau se décompose, le zinc s'oxyde, l'hydrogène décompose l'oxyde de cuivre du sulfate, dont le métal se dépose, et l'acide sulfurique s'unit à l'oxyde de zinc pour former du sulfate de zinc qui vient au-dessus de l'amalgame. Il y a donc un équivalent de cuivre revivifié, pour un équivalent de zinc dissous. Cette pile, peu énergique, marche avec une intensité sensiblement constante quand la dissolution de sulfate de cuivre reste saturée.



Fig. 1299.

Quand le circuit est ouvert, le zinc de l'amalgame est encore attaqué, mais très-faiblement.

**Pile à amalgame de potassium.** — Au lieu d'amalgame de zinc, on en a employé d'autres, par exemple l'amalgame de potassium. M. Goodmann place le métal, dans lequel s'enfonce un fil de cuivre, au fond d'un tube fermé par une membrane. Une goutte de mercure posée sur la membrane tient amalgamée la

surface du potassium, qui est recouvert d'huile de naphte pour le préserver du contact de l'air. Le tube s'enfonce dans de l'eau acidulée, ou dans une dissolution de sulfate de cuivre recevant une lame de platine. Avec le dernier liquide, le courant est plus faible, mais plus constant.

**1858. Des diaphragmes.** — Les diaphragmes sont de nature organique ou inorganique. Parmi les premiers, nous citerons les membranes de baudruche ou de vessie, qui laissent facilement passer l'électricité, mais qui permettent l'endosmose des liquides et s'altèrent promptement. Le cuir tanné sans corps gras dure plus longtemps; il faut avoir soin de le tenir dans l'eau quand il a été plongé dans des dissolutions salines, sans quoi il durcit et arrête l'électricité. — La toile à voile, le carton goudronné sont d'un bon usage. Il en est de même des bois de sapin ou de tilleul en lames minces, débarrassés des matières résineuses par l'ébullition dans une eau alcaline; mais il faut les laisser dans de l'eau légèrement acidulée, quand on ne s'en sert pas, pour les empêcher de se déformer et de se fendre en séchant.

Les diaphragmes inorganiques sont des vases perméables aux liquides, en argile demi-cuite, terre de pipe, porcelaine dégourdie. Ces diaphragmes, employés d'abord par Grove, durent très-longtemps quand on a soin de les plonger dans l'eau après qu'ils ont servi, pour éviter que les sels, en cristallisant dans leurs pores, ne les fassent fendre. Mais ils résistent notablement au passage de l'électricité, surtout ceux en porcelaine; aussi s'applique-t-on à leur donner le moins d'épaisseur possible. Malgré ce défaut, on les adopte habituellement. Il peut arriver qu'ils s'incrustent de cuivre, et alors, comme l'a constaté M. du Moncel, la résistance au passage de l'électricité est diminuée, et la pile devient plus énergique, pourvu toutefois que les incrustations n'altèrent pas la perméabilité.



Fig. 1300.

**1859. Piles à acide azotique autour de l'élément inactif.** — Ces piles donnent un courant constant très-énergique; les premières ont été imaginées par Grove.

**Pile de Grove.** — Une lame de zinc amalgamé, recourbée en U, *zz* (fig. 1300), est plongée dans un vase *V*, et enveloppe de deux côtés un vase poreux *vv*, dans lequel s'enfonce une lame de platine *p*. Le vase poreux est rempli d'acide nitrique, et le zinc plonge dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Quand le circuit est fermé, le zinc est attaqué et le gaz hydrogène dégagé est absorbé par de l'acide nitrique, qui passe à l'état d'acide hypoazotique. L'électricité produite par la combinaison de l'hydrogène avec l'oxygène de cet acide, et la bonne conductibilité des liquides, rendent cette pile très-énergique; mais elle n'est pas aussi constante que celle de Daniell, à cause de l'affaiblissement de l'acide azotique. De plus, quand elle fonctionne pendant quelque

temps, cet acide s'échauffe et répand des vapeurs d'acide hypoazotique qui sont incommodes. On atténue cet inconvénient en mêlant un peu d'acide sulfurique à l'acide azotique, et le courant reste alors constant pendant plus longtemps. D'un autre côté, le platine devient cassant sous l'influence de l'électricité. Grove eut l'idée, dès 1839, de le remplacer par un charbon conducteur, et l'on construisit, à Londres, des piles présentant cette modification.

**Couples à tête de pipe.** — Dans les premières piles de Grove, le diaphragme est formé d'une tête de pipe à lumière bouchée (fig. 1301). L'acide sulfurique est remplacé par de l'acide chlorhydrique, dont le chlore s'unit au zinc, pendant que l'hydrogène est absorbé par l'acide azotique. Ces petits couples produisent des effets étonnants, eu égard à leurs dimensions; ce qui tient en partie à la grande perméabilité de la terre de pipe.

**Pile de Schœnbein.** — Schœnbein a reconnu que le *fer passif*, ou rendu inattaquable à l'acide nitrique, par des moyens que nous indiquerons plus tard, peut remplacer le platine de la pile de Grove. Il construisit alors le couple suivant<sup>1</sup> : un vase cylindrique de fonte passive forme l'élément inactif, et reçoit un mélange de 3 parties d'acide azotique et de 1 partie d'acide sulfurique du commerce. Le vase poreux est plongé dans ce liquide; il est rempli d'eau acidulée, dans laquelle s'enfonce un cylindre de fonte ordinaire qui forme le pôle négatif. Ce couple très-énergique est peu coûteux; de plus, le sulfate de fer formé ayant plusieurs usages dans l'industrie, sa valeur vient en déduction des frais d'entretien de la pile.



Fig. 1301.

Cette pile, comme celles de Grove et les piles à charbon que nous allons décrire, perd peu à peu de son intensité par l'altération des liquides, surtout de l'eau acidulée, qu'il faut renouveler de temps en temps. L'acide azotique s'affaiblit aussi par la formation de l'acide hypoazotique, ce qui a moins d'inconvénients; on peut, du reste, lui rendre toute sa force en y versant, comme l'a imaginé M. Leroux, un peu d'acide sulfurique concentré, qui s'empare de l'excès d'eau de l'acide azotique.

**1860. Piles à charbon.** — Les essais de Grove pour remplacer le platine de sa pile par du charbon, étaient passés presque inaperçus, lorsque M. Bunsen, en 1843, eut aussi l'idée d'employer du charbon, pour substance inactive de la pile à acide azotique, et imagina une espèce de charbon pouvant se mouler facilement<sup>2</sup>. Le couple qu'il construisit, nommé *couple de Bunsen*, consiste (fig. 1302) en un vase poreux rempli d'eau acidulée par l'acide sulfurique, et dans laquelle plonge un cylindre de zinc amalgamé z. Un manchon en

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de de La Rive, t. II, p. 286.

<sup>2</sup> Pour préparer ce charbon, on introduit dans un moule en tôle, du coke en poudre fine, mélangé de moitié de son poids de houille, et l'on chauffe au rouge, jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de gaz. Le charbon est alors assez compacte pour se travailler à la lime et au tour.

charbon *cc* enveloppe ce vase et plonge dans l'acide nitrique; le bord supérieur de ce manchon est imbibé de cire, pour empêcher l'acide d'atteindre, par capillarité, le collier de cuivre *mv* serré par une vis *v*, auquel est soudée l'électrode positive.

M. Bunsen a ensuite mis le zinc en dehors, pour augmenter l'étendue de la surface attaquée, revenant ainsi à la disposition adoptée primitivement par Grove, et M. Archereau a employé la plombagine artificielle des cornues à gaz (1823). La figure 1303 représente 6 couples de la pile ainsi modifiée. En V est une section faite par un plan passant par l'axe d'un des couples; *c* est le charbon. — Pour faire communiquer les couples entre eux, M. Archereau entoure le charbon, d'un collier serré par une vis et muni d'une bande de cuivre, qu'on réunit, au moyen d'une pince à vis, à une bande semblable soudée au zinc du couple suivant. Deleuil, qui forme le cylindre intérieur au moyen du charbon

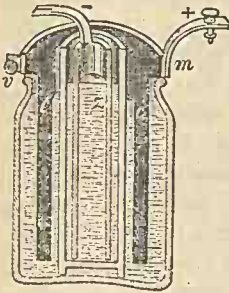


Fig. 1302.

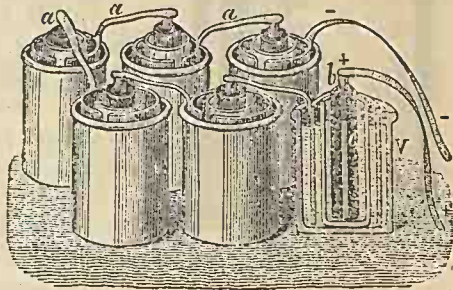


Fig. 1303.

préparé de Bunsen, termine les bandes *a, a, a...* soudées au zinc (*fig. 1303*), par des bouchons coniques en cuivre *b* qu'on enfonce dans des trous pratiqués dans les cylindres de charbon. M. du Moncel creuse simplement une cavité dans la base de chaque cylindre, y met du mercure, et y plonge l'extrémité de la bande de cuivre soudée au zinc du couple suivant.

Les couples à charbon intérieur, nommés souvent *couples d'Archereau*, sont plus puissants que les couples à charbon extérieur. Un seul des premiers équivaut généralement à deux des derniers. On a adopté, en France, deux formats principaux : l'un de 20 à 22<sup>cm</sup> de hauteur, l'autre de 13 à 14. Un seul couple du grand modèle fait rougir un fil de platine, et deux décomposent rapidement l'eau.

**1861. Piles dont tous les couples s'amorcent en même temps.** —

Les piles à charbon sont très-énergiques, mais elles sont longues à monter et à démonter. On a donc cherché le moyen de mettre les couples en contact avec les liquides ou de les en séparer tous à la fois. — M. du Moncel fixe par le haut le charbon et les vases poreux contenant l'acide azotique, dans des ouvertures d'une

planche mobile, au moyen de laquelle on les plonge dans une série de vases de verre disposés à côté de la pile, et renfermant de l'acide azotique, qui empêche l'acide intérieur de suinter à travers les parois des diaphragmes. Un petit trou, pratiqué dans le haut des vases poreux, permet au liquide de prendre le même niveau en dedans et en dehors de ces vases. La planche est enduite de cire à bouteilles ou de gutta-percha, pour la préserver de l'action des vapeurs acides. Les lames de zinc sont fixées sous un cadre de bois au moyen d'oreilles; on peut, après avoir enlevé les vases poreux, faire sortir simultanément toutes ces lames, de l'eau acidulée. La manœuvre inverse permet de mettre, en deux mou-

vements, la pile en état de fonctionner. La communication entre les couples est établie au moyen de fils de cuivre enveloppés de gutta-percha, assez longs pour se prêter aux déplacements.

Pour les piles qui ont un grand nombre de couples, M. Archereau emploie deux pompes, qui injectent, l'une de l'acide azotique, l'autre de l'eau acidulée, dans deux tubes en gutta-percha, envoyant des embranchements jusqu'au fond des vases de la pile, qui reste toujours montée, de manière à former deux systèmes de siphons qui établissent un même niveau dans tous les vases recevant le même liquide. Quand on veut vider ces vases, les tubes deviennent tubes aspirateurs des pompes, au moyen d'un artifice particulier. M. Archereau a encore employé une autre méthode, qui exige, comme celle-ci, la mise en mouvement de grandes quantités d'acide.

Nous avons cherché à éviter cet inconvénient par la disposition suivante, qui peut s'appliquer aux piles d'un grand nombre de couples. Les vases poreux et les cylindres de zinc  $z$  sont fixés à un même châssis, vu en dessus en  $c'c'$ , par bout en  $cc$ , et en coupe en  $c''c''$  (fig. 1304). Les couples sont réunis deux à deux au moyen des tiges de cuivre  $r, r, \dots, r'$ . On peut donc enlever tous ces couples en même temps; on les transporte dans une auge unique  $aa$ , parallèle à la rangée de couples, et dans laquelle sont disposés en série des vases cylindriques de verre  $V$  contenant de l'acide nitrique. Les vases poreux s'enfoncent dans les vases de verre, que les lames de zinc enveloppent en plongeant dans de l'eau que contient l'auge.

Pour transporter les couples, quand ils sont nombreux, on emploie un système d'engrenage et de chaînes disposé comme celui de la pile de Wollaston (fig. 1252), avec cette différence que la barre qui supporte le treuil  $T$  (fig. 1304) porte à ses

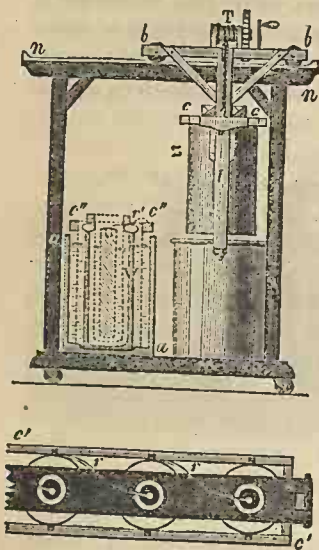


Fig. 1304.

deux extrémités, des pièces transversales à galets *bb*, pouvant rouler sur deux rails fixes *nn*. Après avoir soulevé les couples, on pousse tout le système latéralement, pour le transporter au-dessus de l'auge *aa*, dans laquelle on peut ensuite les faire descendre. La barre *t*, qui se déplace avec la traverse *bb*, guide le châssis *cc* pendant qu'on le monte ou qu'on le descend. Les vases poreux sont fermés par des couvercles qui empêchent l'acide azotique de s'évaporer, et ils sont entourés de bourrelets de caoutchouc qui ferment les vases de verre. On peut disposer ainsi plusieurs rangées de couples, dont chacune a son auge.

**1862. Modifications des piles à charbon.** — On a fait beaucoup d'efforts pour rendre les piles à charbon plus énergiques et plus économiques. MM. E. Liais et L. Fleury, en 1852, ont supprimé le vase poreux et versé l'acide azotique dans une cavité ménagée dans l'axe d'un cylindre de charbon poreux laissant suinter cet acide. La puissance du couple est alors celle d'un couple ordinaire cinq fois plus grand. — Les mêmes inventeurs ont encore employé un charbon, extérieur au zinc, plongeant dans de l'acide sulfurique concentré, et portant une rigole circulaire creusée dans son bord et remplie d'acide azotique; le zinc plonge dans un vase poreux contenant de l'acide sulfurique à 12°. La tension de ce couple est à peu près double de celle d'un couple ordinaire de Bunsen.

Le haut prix de l'acide azotique, les vapeurs qu'il répand, ont fait essayer d'autres absorbants de l'hydrogène. M. Leroux entoure le charbon d'*acide chlorhydrique* et de *peroxyde de manganèse*, dégageant du chlore. En chauffant à 35°, il augmente beaucoup l'intensité du courant. — M. Guignet emploie du *sulfate de peroxyde de fer*, que l'hydrogène réduit facilement; ou bien un mélange d'*acide sulfurique* et de *peroxyde de manganèse*, qui fournit de l'oxygène. — M. Lavenarde remplace l'eau acidulée, par une dissolution de sel marin ou d'hypochlorite de chaux, et l'acide azotique par de l'acide sulfurique étendu ou par une dissolution de carbonate de potasse ou de soude. La pile est alors plus faible, mais plus constante que celle de Bunsen.

M. Buff obtient les mêmes résultats en mettant autour du charbon une dissolution de *perchlorure de fer* contenant 4 ou 5 centièmes d'acide chlorhydrique. — M. Poggenдорff, en remplaçant l'acide azotique par une dissolution de *bichromate de potasse* dans l'acide sulfurique (1823), forme la *pile à bichromate à deux liquides*, et obtient l'électricité à un prix deux fois moindre.

**Pile à iodure de potassium.** — M. Doat remplace le zinc de la pile de Bunsen par du mercure en contact avec une dissolution saturée d'*iodure de potassium*, et l'acide azotique par une dissolution d'*iode* dans l'*iodure de potassium*. Quand le circuit est fermé, l'iode forme avec le mercure du *proto-iodure de mercure*. Mais ce corps, en contact avec l'*iodure de potassium*, abandonne la moitié de son mercure et passe à l'état de *periodure*, qui agit fortement sur le mercure pour se changer en *proto-iodure*, ce qui augmente encore la quantité d'électricité. Cela continue ainsi jusqu'à ce que le liquide soit saturé de *periodure de mercure* dissous dans l'*iodure de potassium*. On retire alors le liquide

au moyen d'un siphon, on en sépare le périodure de mercure par distillation, et l'on régénère le mercure par la baryte. — Les couples de cette pile, en forme de parallépipèdes aplatis, sont posés sur une planche qui peut s'incliner, de manière qu'on peut accumuler le mercure vers un des angles, pour modifier la quantité d'électricité produite.

**Pile Leclanché.** — La figure 1305 représente un couple de cette pile, aujourd'hui très-répandue. Dans le vase poreux *v* s'enfonce un prisme de charbon *c* entouré d'un mélange en parties égales de grains de peroxyde de manganèse et de charbon, imbibés d'une dissolution de sel ammoniac. Le vase poreux plonge dans une dissolution semblable, et reçoit une baguette de zinc amalgamé *z*. D'après l'inventeur, 24 de ces couples sont équivalents à 40 couples de Daniell; cette pile est très-économique et ne répand pas de gaz incommodes.

**1863. Piles à dépolarisant solide.** — On a cherché à absorber l'hydrogène par des solides, de manière à n'avoir pas besoin de vase poreux. Ainsi, M. de

La Rive remplace le charbon par du peroxyde de manganèse ou de plomb; Becquerel et M. Marié-Davy, par du sulfate de plomb, qui, réduit en pâte avec de l'eau salée, se moule et durcit comme le plâtre, et agit comme le sulfate de cuivre de la pile de Daniell.

**Pile à sulfate de mercure.** — Cette pile, due à M. Marié-Davy, est disposée comme celle de Bunsen; l'acide azotique est remplacé par une pâte de sulfate de protoxyde de mercure insoluble; et l'eau acidulée, par de l'eau pure ou salée. Quand le circuit est fermé, l'hydrogène de l'eau décomposée par le zinc, est absorbé par le sulfate, et le mercure se dépose.

Malgré le danger du maniement d'un sel très-toxique, cette pile a été adoptée sur diverses lignes télégraphiques. 38 couples équivalent à 60 couples de Daniell. MM. Gaugain, Beaufrils, GaiFFE lui ont apporté diverses modifications.

**Pile à chlorure d'argent.** — Cette pile présente, entre autres, l'avantage de se prêter facilement à l'accumulation d'un grand nombre de couples, quand on a besoin d'une forte tension aux pôles. MM. Warren de La Rue et H. Müller, qui l'ont imaginée, en ont fait usage dans de nombreuses expériences. Chaque couple de cette pile se compose d'un vase formé d'un gros tube vertical contenant une dissolution de 3 à 5 pour cent de sel marin. Dans ce liquide plonge un bâton de zinc, qui peut être amalgamé, et un cylindre de chlorure d'argent qui a été coulé dans un moule autour d'un fil d'argent qui le traverse de part en part. Le chlorure absorbe l'hydrogène en déposant de l'argent en poudre. Chaque couple équivaut à peu près à deux couples de Daniell de mêmes dimensions.

**1864. Piles à deux liquides sans cloison.** — Le vase poreux résistant au passage de l'électricité, on a cherché à le supprimer dans les piles à deux liquides,

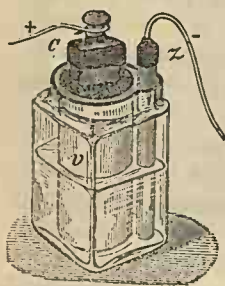


Fig. 1305.



**Piles Callaud; Minotto.** — Ces deux piles ont été adoptées sur un grand nombre de lignes télégraphiques. Celle de M. Callaud est une pile de Daniell, dans laquelle les liquides restent séparés par leur différence de densité. La figure 1306 en représente un couple modifié par M. R. Houdin. Le sulfate de cuivre est déposé en petits fragments au fond du vase V et recouvre une lame de cuivre *c* d'où part un fil, *sc*, entouré de gutta-percha. On verse sur le sulfate de l'eau dans laquelle plonge une lame de zinc *z*, soutenue par des crochets K. Un vase conique dont le rebord forme couvercle, contient des cristaux de sulfate de cuivre. — La figure 1307 représente une pile de 3 couples disposée par M. Planté pour des expériences que nous décrirons plus tard. On y distingue le mode de jonction des couples deux à deux; le zinc est en masses prismatiques. — La pile Callaud est d'une constance remarquable, qui se soutient pendant des mois, quand on a soin d'y remplacer de temps en temps l'eau qui s'évapore.



Fig. 1306.

M. Minotto, pour rendre la séparation des liquides plus stable, étend sur le sulfate, finement pulvérisé, une toile, une feuille de papier buvard, ou enfin une couche de gros sable ou de sciure de bois. La pile est alors un peu plus faible.

**Pile humide.** — Citons enfin la pile suivante de M. Trouvé, dans laquelle la mobilité du liquide est supprimée. Chaque couple se compose d'un disque de cuivre, sur lequel sont empilées des rondelles de papier buvard imprégnées de sulfate de cuivre. Au-dessus, on empile un même nombre de rondelles imprégnées de sulfate de zinc, sur lesquelles on pose un disque de zinc. Une tige de cuivre enveloppée d'une gaine d'ébonite traverse, suivant son axe, le cylindre ainsi formé, et le cylindre ainsi formé, et représente l'électrode positive. Tant que le système reste sec, il ne se produit ni action chimique, ni électricité; mais si l'on imbibe d'eau les rondelles, le couple fonctionne avec une grande régularité. Le cylindre est suspendu dans un vase de verre par un plateau d'ébonite, qui sert de couvercle pour empêcher l'évaporation. Quand on ne veut plus se servir de la pile, on fait sécher les couples, au soleil ou dans un courant d'air.

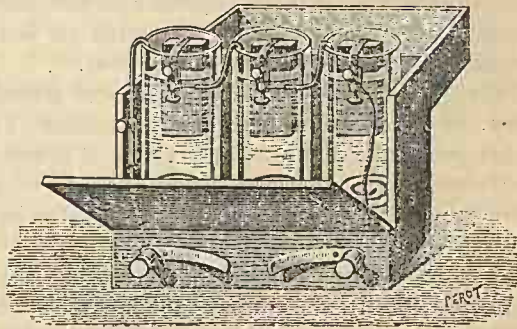


Fig. 1307.

On a imaginé beaucoup d'autres espèces de piles, et l'on en propose chaque jour de nouvelles, surtout en vue des applications aux télégraphes électriques. Mais elles ne sont, pour la plupart, que des modifications de celles que nous avons décrites et ne présentent pas de principe nouveau<sup>1</sup>. Il nous reste à faire connaître deux systèmes de piles donnant des *courants secondaires* après polarisation préalable de lames métalliques par un courant ordinaire, ou donnant des courants par un mode d'action chimique analogue à celui qui produit ces courants secondaires.

#### V. Piles secondaires. — Batteries à gaz.

**1865. Piles secondaires de Ritter.** — Nous avons vu comment l'affaiblissement des piles à un liquide s'explique par la polarisation secondaire des éléments. Ce même phénomène rend également compte des effets des *piles secondaires*, inventées par Ritter, vers 1803. Ces piles sont faites comme les piles à un liquide, avec cette différence essentielle, qu'il n'y a qu'un seul métal associé à un seul liquide. Ce système ne produit aucun effet par lui-même; mais si l'on fait communiquer ses extrémités pendant quelque temps, avec les pôles d'une pile, il acquiert momentanément toutes les propriétés d'une pile ordinaire dont le pôle positif serait à l'extrémité par laquelle entrait le courant. La puissance de cette *pile secondaire* diminue peu à peu, et finit par disparaître. — Ritter expliquait ces résultats par la pénétration de l'électricité de la pile auxiliaire, dans les parties extrêmes de la pile secondaire, formant un conducteur imparfait, qui laissait ensuite sortir peu à peu cette électricité. Mais l'expérience prouve que la pile secondaire est traversée de part en part par le courant de la pile auxiliaire, ce qui n'aurait pas lieu s'il y avait seulement transmission de la tension des pôles de celle-ci.

Volta, dès le principe, admit que le liquide, ordinairement une dissolution saline, est décomposé dans chaque compartiment, l'acide se portant sur la surface par laquelle arrive le fluide positif, et la base sur celle qui amène le fluide négatif; les couches déposées formeraient alors, par leur contact avec les lames, des couples électromoteurs. Marianini a fait un long travail pour confirmer cette explication<sup>2</sup>.

Les dépôts admis par Volta ne sont autre chose que ceux qui constituent la *polarisation secondaire* des lames (1837); l'action chimique que produisent ensuite ces dépôts en réagissant les uns sur les autres, donne lieu au *courant secondaire*. L'électricité positive se portant sur l'acide (1836), on voit que le pôle positif de la pile secondaire sera à l'extrémité par laquelle est entré le *courant polariseur* qui l'a traversée.

<sup>1</sup> Voir *Annales télégraphiques*, et *Traité élémentaire de la pile*, par A. Niaudet, Paris, 1878.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXV, p. 401.

Une pile secondaire ne peut donner un courant plus intense que le *courant polariseur* qui l'a chargée. Mais si l'on charge séparément ses divers éléments, pour les associer ensuite en série, on obtient une pile donnant d'abord une tension bien supérieure à celle de la pile polarisante. On peut de même obtenir, pendant le même temps, un écoulement plus grand d'électricité, si les couples de la pile secondaire présentent une surface supérieure à ceux de la pile polarisante.

On voit que les piles secondaires ont pour point de départ la polarisation des électrodes dans les décompositions électrochimiques. Le courant qui résulte de cette polarisation a été découvert, en 1801, par Gautherot, et peu de temps après par Ritter. Mais les piles secondaires n'ont eu pendant longtemps qu'une importance théorique; elles ont été cependant l'objet des études suivies de plusieurs physiciens. Jacobi les a ensuite utilisées dans la télégraphie électrique pour combattre, comme nous le verrons, certains inconvénients. Enfin, M. Gaston Planté, après avoir substitué le plomb au platine qu'employait Jacobi, a imaginé les piles secondaires remarquables dont nous allons nous occuper<sup>1</sup>.

#### 1866. Piles secondaires de M. Planté.

— M. Planté, dès 1859, avait reconnu l'aptitude spéciale du *plomb* à se polariser quand il est employé comme électrode dans les décompositions électrochimiques, par exemple dans la décomposition de l'eau acidulée. Dans ce cas, l'électrode positive, sur laquelle se rend l'oxygène, se recouvre d'une couche brune de peroxyde de plomb, et l'électrode négative où se rend l'hydrogène, d'une poussière de plomb d'un gris bleuâtre. Quand ensuite, après avoir supprimé le courant polariseur, on réunit les électrodes par un fil métallique, l'oxyde de plomb tend à se réduire en s'emparant de l'hydrogène et en s'électrisant *positivement*, pendant que l'autre électrode s'oxyde en s'électrisant *négativement*. Il se produit ainsi deux courants secondaires de même sens, qui s'ajoutent et vont en s'affaiblissant peu à peu. C'est en s'appuyant sur ces résultats étudiés avec soin que M. Planté, en 1860, a construit ses piles secondaires, dont l'utilité scientifique et pratique s'affirme chaque jour davantage.

La figure 1308 représente un couple secondaire isolé destiné à produire des effets de quantité, tel que M. Planté l'a disposé en dernier lieu. Deux longues lames de plomb roulées en spirale, comme dans la pile en hélice (1821) et

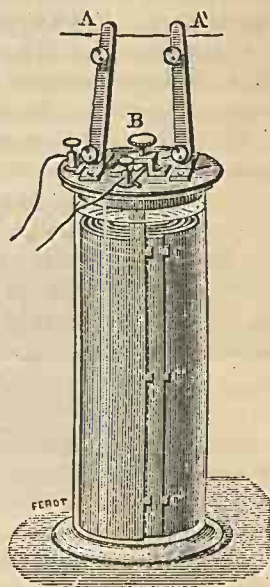


Fig. 1308. — 1/5.

<sup>1</sup> Annales de chim. et de phys., 4<sup>e</sup> série, t. XV, et Mondes, t. XXX (1872), p. 425, 469.

séparées par de minces lanières en caoutchouc  $c$ ,  $c'$ , sont plongées dans une solution d'acide sulfurique au dixième, contenue dans un vase cylindrique de verre. Les lames de plomb, qui présentent une surface de 40 décimètres carrés, communiquent respectivement avec deux bornes fixées à un couvercle d'ébonite, par lesquelles on fait passer le courant polariseur, fourni par 2 ou 3 couples de Bunsen. Les lames de plomb prennent peu à peu les teintes indiquées ci-dessus, et dès qu'on aperçoit de petites bulles gazeuses se dégageant à leur surface, on supprime le courant polariseur; le couple étant alors polarisé à peu près au maximum.

Ainsi chargé, le couple équivaut à un et demi de ceux de Bunsen; il fait rougir un fil de platine AA', de 1<sup>mm</sup> de diamètre tendu entre deux pinces, dont une A communique avec la borne de gauche, et l'autre, A', avec l'autre borne,

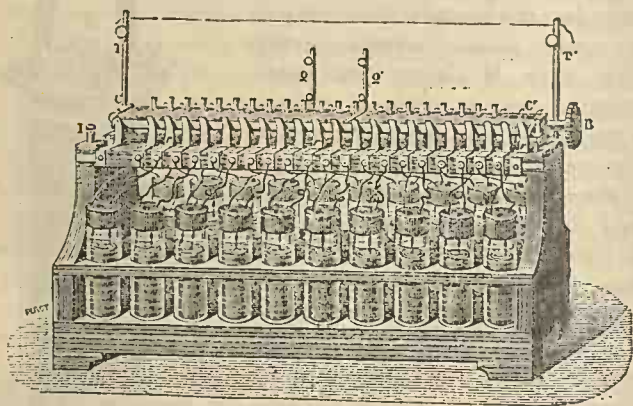


Fig. 4309. — 1/12.

mais seulement quand on enfonce la vis B, de manière à faire appuyer sur une bande métallique dépendant de cette borne un ressort partant du pied de la pince. Pendant la charge, la vis B doit évidemment être relevée; le courant polariseur passe alors à travers le couple, dans lequel s'accumule, pour ainsi dire, à l'état latent, le travail produit pendant un certain temps par la pile polarisante, pour être restitué avec énergie, mais pendant un temps plus court, quand on réunit ensuite les deux lames de plomb. Un travail chimique, successivement en sens inverse, sert d'intermédiaire aux deux mouvements électriques. On peut comparer la pile secondaire à lames de plomb à un condensateur, qui accumule dans ses armatures de grandes quantités d'électricité, pour les restituer ensuite en peu de temps, en produisant des effets intenses que la machine électrique seule n'aurait pu produire.

**Batterie secondaire - Planté.** — Quand on réunit plusieurs couples en série, on peut obtenir des effets de tension prodigieux. La figure 1309 repré-

senté une batterie secondaire de 20 éléments disposés en deux rangées. Chaque lame de plomb communique avec un ressort vertical s'appuyant sur un commutateur *cc'*, barre en ébonite mise en rapport avec deux bornes I, I, placées aux extrémités de l'appareil. Ce commutateur est destiné, soit à réunir tous les couples en un seul, ou en *quantité*, soit à les réunir *en série*, ou en *tension*. Pour cela, chaque ressort de la rangée antérieure communique par un fil métallique avec la lame de plomb extérieure du couple voisin antérieur ou postérieur, et chaque ressort de la rangée postérieure, avec la lame de plomb intérieure. Si l'on tourne le commutateur *c'e* comme dans la figure, chaque rangée de ressorts s'appuie sur l'une de deux bandes métalliques formant deux arêtes opposées de la règle, et toutes les lames intérieures communiquent entre elles, et il en est de même des lames extérieures. La batterie représente alors un seul couple à surface égale à 20 fois celle d'un des éléments. On voit (*fig. 1310*), la coupe transversale du commutateur dans la position correspondante, où les bandes de métal *g, g'* sont en contact avec les rangées de ressorts *r, r'*. Si, au moyen du bouton B, on tourne le commutateur de 90°, des chevilles métalliques relevées verticalement (*fig. 1309 et 1310*) se placent horizontalement, comme en *h, h'* (*fig. 1311*), et font communiquer

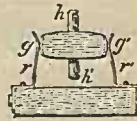


Fig. 1310.



Fig. 1311.

deux à deux les ressorts appartenant aux deux séries, de manière qu'une lame extérieure d'un couple communique avec la lame intérieure du couple suivant; la batterie est alors disposée en tension. C'est quand elle est en quantité qu'on fait passer le courant polarisant, par les bornes I, I qui peuvent communiquer, en outre, avec les pinces Q, Q', pour faire rougir des fils métalliques gros et courts. Les pinces T, T' servent, quand la pile est disposée en tension, à faire rougir des fils longs et fins.

**1867. Préparation des couples.** — Un couple neuf, c'est-à-dire qui n'a jamais subi de polarisation, est rapidement chargé au maximum et ne donne un courant intense que pendant quelques instants. Pour qu'il donne des résultats plus durables, il faut qu'il ait été *formé, vieilli*. Pour cela, on y fait passer le courant polarisant plusieurs fois, en en changeant alternativement le sens, et laissant l'appareil se reposer plusieurs heures entre ces diverses opérations. Les surfaces des lames sont alors recouvertes de minces couches de protoxyde, de métal réduit, ou de sel, qui favorisent ensuite la polarisation, et la rendent plus abondante et plus profonde; de sorte que le courant secondaire peut durer et conserver une grande intensité pendant plus d'une heure.

Quand un couple a été bien *formé*, il peut, après avoir été chargé, conserver presque toute sa charge pendant quinze jours et plus, le circuit restant ouvert. Au premier moment, la couche superficielle de peroxyde est réduite à l'état de protoxyde, qui préserve le peroxyde sous-jacent de toute transformation.

Une fois la pile bien formée, on a soin d'y faire toujours passer le courant polariseur dans le même sens; et quand elle n'a pas servi depuis longtemps, on

la ravive en la faisant traverser pendant une heure par le courant polariseur. Il suffit ensuite de moins d'un quart d'heure pour la charger au maximum.

**1868. Effets des piles secondaires-Planté.** — Les piles secondaires à lames de plomb se prêtent à de nombreuses applications, et l'inventeur les a employées dans une foule d'expériences remarquables dont nous parlerons en temps et lieu et dont nous avons déjà cité quelques-unes (1745). Toujours montés et prêts à servir, ces appareils peuvent, en outre, se transporter tout chargés, ce qui est précieux dans bien des cas, par exemple dans les applications de l'électricité à la médecine<sup>1</sup>. Ils permettent surtout d'obtenir avec facilité des courants à grande tension, qui exigeraient de nombreux couples à charbon, dont l'installation est si longue, si pénible et si encombrante. Par exemple, les 20 couples de la batterie (fig. 1309) donnent, au commencement, un courant

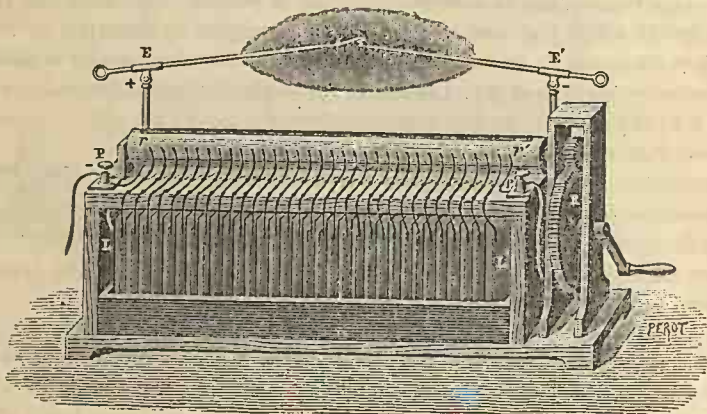


Fig. 1312.

de décharge équivalent à celui de 60 couples à acide nitrique. On a pu même obtenir, au moyen de ces piles secondaires, des courants à tension énorme que l'on croyait impossibles à réaliser. Ainsi, M. Planté, en réunissant en série 20 batteries de 40 couples chacune, en tout 800 couples, a pu produire pendant quelques minutes les effets d'une pile de Bunsen de 1200 couples, c'est-à-dire d'une accumulation d'éléments à peu près impraticable. Il suffisait, pour charger les 800 couples secondaires, de les réunir *en quantité*, et d'y faire passer, pendant 4 à 5 heures, le courant de 3 ou 4 couples à acide nitrique.

**1869. Machine rhéostatique.** — Au moyen de sa puissante batterie de 800 couples, M. Planté a pu étudier les effets *statiques* de la décharge secon-

<sup>1</sup> Chaque couple est fermé par un tampon mastiqué ne présentant qu'une petite ouverture pour le dégagement des gaz et pour l'introduction, une fois pour toutes, du liquide acidulé.

taire<sup>1</sup>. Ayant reconnu que cette décharge pouvait charger fortement et en un instant, un condensateur à lame isolante suffisamment mince, il construisit la machine (fig. 1312). Cette machine, qu'il nomme *machine rhéostatique*, se compose d'un certain nombre de condensateurs à lame de mica LL', placés dans un châssis dont ils sont soigneusement isolés, et pouvant, au moyen d'un commutateur rr' disposé comme celui de la batterie (fig. 1309), être chargés en *quantité* et déchargés en *tension*. Pour utiliser l'appareil, on fait passer le courant secondaire par les bornes P, P', et l'on fait tourner le cylindre d'ébonite rr' au moyen de l'engrenage R. Les condensateurs se chargent en un instant, quand deux règles métalliques opposées placées sur le cylindre, viennent toucher deux séries de ressorts maintenus par des règles d'ébonite non représentées sur la figure. Les ressorts d'une de ces séries communiquent avec les armatures de gauche, et ceux de l'autre série avec les armatures de droite des condensateurs. Quand ensuite le cylindre a tourné de 90°, des chevilles de cuivre qui le traversent, touchent les ressorts de manière à faire communiquer l'armature de gauche de chaque condensateur avec celle de droite du condensateur suivant, et la décharge éclate entre les branches de l'excitateur E, E', écartées de 4 à 5<sup>cm</sup> quand il y a 30 à 40 condensateurs, et elles se reproduisent deux fois par tour du cylindre.

Ces décharges peuvent être répétées un nombre considérable de fois sans que la batterie secondaire paraisse sensiblement affaiblie; le circuit n'étant jamais fermé et la quantité d'électricité qui se répand sur les armatures du condensateur n'étant qu'une fraction insensible de celle que fournit l'action chimique. Par exemple, l'électricité d'une batterie de 40 couples, chargée pendant 15 secondes au moyen de deux couples de Bunsen, n'a pu être épuisée qu'après plus d'un quart d'heure de rotation du commutateur.

La distance explosive paraît proportionnelle au nombre des condensateurs, et les étincelles, quand on tourne rapidement, présentent une forme assez constante. On y distingue (fig. 1312), quand les branches de l'excitateur sont un peu inclinées l'une sur l'autre, d'abord un trait rectiligne dirigé suivant le prolongement de l'électrode positive E, puis une partie très-sinueuse aboutissant à l'électrode négative; apparence qui semble indiquer une fois de plus, le mouvement de l'électricité du corps électrisé *en plus* à celui qui l'est *en moins*. Quand la distance des électrodes est un peu plus grande, une forte aigrette s'élance de la pointe positive vers la négative qui n'en présente qu'une très-petite. Quand on tourne vite, on obtient, dans l'œuf électrique et dans les tubes de Geisler, les mêmes lueurs qu'avec les machines électriques, et plus brillantes; seulement, il n'y a pas de stratification, et l'on ne voit pas la gaine violette autour de l'électrode négative (1693). L'absence de ces deux derniers effets paraît provenir d'une trop grande tension, car ils se montrent quand on emploie une batterie secondaire de 40 à 50 couples seulement. — Du reste, comme le remarque M. Planté, on peut charger la machine rhéostatique au moyen d'une pile à acide nitrique

<sup>1</sup> Journal de physique de M. d'Almeida, t. VII, p. 20.

de 50 à 60 couples, ou de toute autre source électrique de force équivalente.

**1870. BATTERIE VOLTAÏQUE A GAZ.** — L'oxygène et l'hydrogène adhérant à des lames de platine, produisent un courant, quand ces lames, plongées dans un liquide, sont réunies par un fil conjonctif (1837). Ce courant s'affaiblit rapidement et disparaît bientôt. Grove le rend permanent, au moyen des mêmes gaz, dans une pile très-remarquable quoiqu'elle n'offre qu'un intérêt théorique, et dont la figure 1313 représente un couple<sup>1</sup>. Deux tubes fixes *o, h*, renferment des lames de platine communiquant au dehors en *a* et *a'*. Ces tubes et le vase fermé dans lequel ils plongent contiennent de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Le tube *o* contient de l'oxygène, et le tube *h*, de l'hydrogène, en quantités telles que les lames de platine plongent en partie dans le liquide. Ces gaz ont été introduits directement, ou en décomposant l'eau au moyen d'une pile, les lames servant

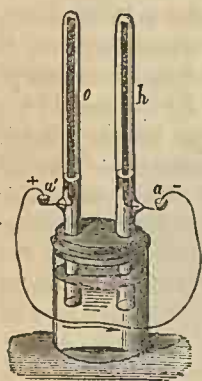


Fig. 1313.

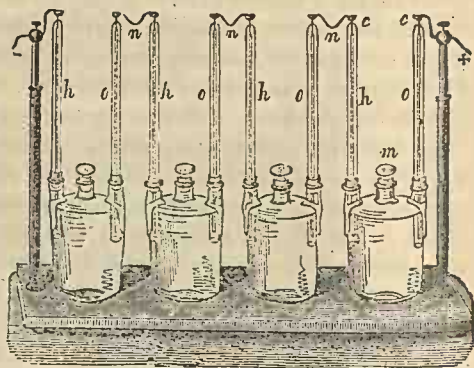


Fig. 1314.

d'électrodes. Quand ensuite on réunit les deux appendices *a, a'* par un fil métallique, on obtient un courant qui va de l'oxygène à l'hydrogène, et l'eau monte dans les tubes, indiquant une absorption d'hydrogène double de celle de l'oxygène.

Pour réunir plusieurs couples semblables, Grove s'est arrêté à la disposition suivante (fig. 1314). Les tubes *o, h* de chaque couple sont ajustés au moyen d'un renflement conique de verre usé à l'émeri, dans deux tubulures d'un flacon. Des lames de platine *platiné* (1822) sont suspendues dans ces tubes par un fort fil de platine scellé à leur partie supérieure, qu'il traverse. Pour garnir un couple, on verse de l'eau acidulée dans le flacon, par la tubulure *m*, que l'on ferme ensuite, on renverse le flacon pour remplir les tubes de liquide, puis on fait passer par la tubulure *m*, le tube recourbé par lequel on fait arriver l'oxygène

<sup>1</sup> Arch. de l'électr., t. III, p. 489, et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. VIII et IX.



ou l'hydrogène. On met ensuite du mercure dans les coupes, *c*, et on les joint deux à deux par des fils de platine *n, n, n*, de manière qu'un tube à oxygène soit toujours uni à un tube à hydrogène.

Avec 30 couples, on obtient des étincelles et des commotions assez fortes pour être désagréables. Un couple suffit pour décomposer l'iodure de potassium, et deux ou trois, pour décomposer l'eau. Un résultat remarquable, qui n'est qu'un cas particulier d'une loi que nous développerons plus tard, c'est que les quantités d'hydrogène et d'oxygène dégagées dans la décomposition sont égales à celles qui disparaissent dans *chaque* couple de la pile, pendant le même temps. La formation d'un équivalent d'eau dégage donc la quantité d'électricité nécessaire pour en décomposer un équivalent.

**1871. Origine de l'électricité du couple à gaz.** — L'électricité du couple à gaz s'explique par la polarité des molécules. Celles du liquide sont polarisées par la couche d'hydrogène qui adhère à la surface du platine, de manière que l'oxygène de ces molécules se tourne du côté de l'hydrogène, et la polarité est augmentée par l'action de la couche d'oxygène adhérente au platine de l'autre tube. Vient-on à fermer le circuit, l'action polarisante est exaltée (1849), l'eau est décomposée, et l'oxygène qui se dégage à la surface du platine plongé dans l'hydrogène, absorbe de ce gaz en formant de l'eau. De même, l'hydrogène qui se dégage dans le tube à oxygène absorbe de ce dernier gaz.

Il résulte de cette explication, que le volume d'hydrogène absorbé, doit être double de celui de l'oxygène, comme le montre l'expérience. Cependant, il disparaît quelquefois un peu plus d'hydrogène qu'il ne faudrait; ce qui tient à une absorption par l'oxygène de l'air dissous dans le liquide. En effet, de La Rive n'ayant laissé que peu de liquide dans le flacon, a vu l'hydrogène être absorbé en partie, *quoique le circuit restât ouvert*; et au bout d'une quinzaine de jours, il trouva que l'air du flacon était remplacé par de l'azote, l'oxygène ayant été dissous par le liquide à mesure que celui-ci perdait l'oxygène qu'il contenait d'abord. Ayant opéré, au contraire, dans un appareil complètement rempli de liquide privé d'air, et dans lequel il avait introduit de l'hydrogène et de l'oxygène en décomposant l'eau, il reconnut que l'hydrogène n'était plus qu'à peine absorbé.

Grove a déduit de là un moyen original d'*analyser l'air*: deux tubes, l'un rempli d'air, l'autre d'hydrogène, contiennent des lames de platine communiquant par l'eau acidulée. L'oxygène de l'air est peu à peu absorbé, et l'on compare le volume de l'azote restant à celui de l'air primitif. Comme le liquide dissout un peu d'air, on a un troisième tube plein de ce gaz, qui fait connaître la quantité dissoute. Par exemple, dans une expérience, le volume d'air, qui occupait 100 divisions, ayant diminué de 22 divisions en deux jours dans le premier tube à air, et de 1 dans le dernier, la diminution produite par l'hydrogène était de 21 divisions; cet air contenait donc 0,21 d'oxygène.

L'absorption des gaz dans le couple de Grove explique le phénomène suivant. Quand après avoir décomposé l'eau dans un voltamètre, on fait communiquer les

fil de platine entre eux, on voit les gaz disparaître peu à peu. Jacobi, puis Poggendorff, ont observé ce phénomène, même quand les fils de platine étaient entièrement recouverts de liquide; d'où l'on conclut que l'action chimique n'a pas lieu seulement à la surface de niveau du liquide dans les tubes, comme l'avait pensé Grove. En outre, d'après M. Gaugain, cette action ne s'exerce que par les gaz dissous; de sorte que la pile s'affaiblit à mesure qu'ils diminuent dans le liquide.

Grove a remplacé l'oxygène et l'hydrogène de ses couples par un grand nombre d'autres gaz. L'oxygène, associé aux gaz pour lesquels il a de l'affinité, comme le bioxyde d'azote, le gaz oléfiant, l'oxyde de carbone, donne un courant plus ou moins faible et s'électrise positivement; avec l'oxyde de carbone, il faut dix couples pour décomposer l'iodure de potassium. — L'oxygène avec l'azote ou le protoxyde d'azote ne donne aucun résultat, comme on pouvait le prévoir. L'hydrogène donne un courant très-énergique avec le chlore, plus faible avec le protoxyde et le bioxyde d'azote; l'hydrogène s'électrise toujours négativement et les oxydes gazeux sont remplacés par de l'azote. Enfin le chlore et l'oxyde de carbone donnent un courant assez énergique, allant du chlore à l'oxyde.

Grove a aussi employé les vapeurs de soufre et de phosphore dans l'azote, qui, comme nous l'avons vu, est par lui-même inactif<sup>1</sup>. Un des tubes étant rempli d'oxygène et l'autre d'azote, il introduisait dans ce dernier un morceau de phosphore ou de soufre, au moyen d'une tige de verre terminée en haut par une petite coupe. Le soufre était fondu au moyen d'un anneau de fer rouge qu'on faisait descendre autour du tube sans le toucher. L'oxygène s'électrisait toujours positivement. Si les couples, assez nombreux, décomposent l'eau, pour un équivalent d'oxygène dégagé, le tube à gaz perd un équivalent d'oxygène, et le poids du soufre, ou du phosphore, est diminué d'une quantité égale à leur équivalent.

Enfin, Grove a remplacé l'un des gaz par un liquide pouvant agir chimiquement sur l'autre gaz. Ainsi, l'un des tubes contenant de l'oxygène, et l'autre une solution de sulfate de protoxyde de fer, celle-ci absorba l'oxygène en s'électrisant *négativement*. — L'un des tubes ayant reçu de l'hydrogène et l'autre de l'acide azotique, le gaz fut absorbé par l'acide, qui prit l'électricité *positive*.

**Action de l'hydrogène sur le chlorure d'or.** — M. E. Becquerel a découvert le résultat suivant dont il est facile de saisir l'analogie avec les faits qui précèdent. On remplit d'hydrogène une petite éprouvette plongée dans une dissolution de chlorure d'or, et dans laquelle on introduit un fil de platine, qui traverse à la fois le gaz et la dissolution. Le chlorure est décomposé, l'hydrogène peu à peu absorbé, et l'or se dépose sur le fil de platine. Cependant le gaz et le platine, pris isolément, sont incapables de décomposer le chlorure d'or. Ces effets ont encore lieu quand on évite le contact de l'air.

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. II, p. 354.

## VI. Du contact comme source d'électricité.

1872. Il est incontestable que le courant de la pile est dû aux actions chimiques. Le contact des métaux n'intervient pas, même pour déterminer le sens du courant, comme le prouvent les inversions, et comme il résulte des expériences de Faraday (1842). Cependant on s'est demandé si, tout en reconnaissant que l'action chimique est la source de l'électricité de la pile, on ne doit pas admettre que le contact des métaux peut aussi dégager de l'électricité, en quantité excessivement petite, il est vrai, mais qu'il faut considérer néanmoins, ne serait-ce que sous le rapport théorique. Certains physiciens, Plaff, Marianini, Fechner, Zamboni, Ohm, Pecelet....., ont soutenu, après Volta, que le contact seul des métaux suffit pour dégager de l'électricité; d'autres, abandonnant le contact des solides, ont déplacé la question et tenté de prouver que l'activité de la pile serait due au contact des liquides et des métaux, et que l'action chimique ne serait que la conséquence, et non la cause de l'électricité dégagée. Nous allons examiner successivement ces deux opinions, que de La Rive surtout a combattues au moyen d'expériences multipliées, et par des arguments nombreux et concluants.

1873. **Du contact des solides.** — La première expérience à considérer est celle de Volta, dans laquelle on tient entre les doigts le zinc de la double lame cuivre-zinc (1815). Or le zinc est oxydé par l'humidité des doigts, qui le ternissent aux points touchés, et cette oxydation suffit pour expliquer l'électricité observée, qui est négative sur le zinc et se transmet par le cuivre au condensateur.

On pourrait penser que, l'oxydation est tellement faible, que la quantité d'électricité dégagée devrait être insensible; mais nous verrons qu'il suffit d'oxyder 1 milligramme de zinc pour fournir une quantité d'électricité capable de charger 100,000 fois un condensateur de 5<sup>es</sup> de surface, chaque charge donnant une étincelle de 1<sup>cm</sup> de longueur. On peut admettre que la quantité d'électricité nécessaire pour charger le condensateur à feuilles d'or, n'est que  $\frac{1}{10000}$  de la quantité qui donne cette étincelle; l'oxydation de  $\frac{1}{10000}$  milligramme de zinc suffira donc pour fournir 100,000 fois la charge capable de faire diverger les feuilles d'or; ce qui correspond à un *billionième* de milligramme, pour une seule charge!

On peut encore charger le condensateur formé d'un plateau de zinc et d'un plateau de cuivre, en faisant communiquer ces plateaux par un fil métallique isolé. Dans ce cas, le plateau de zinc est oxydé par l'air humide, comme le prouve la rapidité avec laquelle il se ternit, et si l'on éloigne cette cause d'oxydation, le condensateur ne se charge pas. De La Rive ayant recouvert les plateaux d'une couche de vernis, très-épaisse excepté sur les faces en présence, n'obtint aucune charge; des tiges de platine fixées aux plateaux et sortant à travers le vernis, servaient à établir la communication. Pecelet a cependant obtenu de

l'électricité avec des plateaux vernis ; mais de La Rive attribue ce résultat à ce que la couche préservatrice était trop mince. Il reconnut, en effet, que la charge est d'autant plus faible que cette couche est plus épaisse. Plaff et M. Fechner ont bien obtenu des charges, en mettant le condensateur dans le vide ou dans l'air desséché ; mais on sait combien il est difficile d'enlever toute humidité d'un récipient en verre, et nous venons de voir combien il se dégage d'électricité dans l'oxydation de quantités imperceptibles de zinc.

Il se présente ici une anomalie sur laquelle il est nécessaire de s'arrêter : on trouve que le plateau de zinc s'électrise positivement, tandis que l'oxydation devrait l'électriser négativement (1840). De La Rive explique cette contradiction, par la polarité électrique et le jeu des électricités dissimulées<sup>1</sup> : le plateau de zinc polarise les molécules de vapeur d'eau qui le touchent. Dès qu'on fait communiquer les deux plateaux, le fluide négatif, repoussé du zinc, passe dans le cuivre, et le zinc se combine avec l'oxygène de l'eau décomposée, avec neutralisation de son électricité par celle de l'oxygène. Quant à l'électricité positive de l'hydrogène, comme elle ne peut s'écouler par l'air mauvais conducteur, elle se porte sur le zinc, où elle est dissimulée par le fluide négatif du plateau de cuivre ; le zinc se trouve donc, en définitive, chargé positivement.

Considérons maintenant le premier procédé qu'avait employé Volta en appliquant l'un sur l'autre deux disques de zinc et de cuivre, avec lesquels il chargeait l'électromètre condensateur. Après chaque contact, le disque de zinc est chargé de fluide positif, provenant de l'action de l'air humide ; mais, ici, le résultat n'est pas aussi facile à expliquer. Cependant de La Rive le rattache au cas précédent, en remarquant que les deux disques se comportent comme un condensateur dont la lame isolante serait formée d'une très-mince couche d'air. M. Fechner a, en effet, remarqué qu'un disque de zinc, remplaçant le bouton d'un électroscope, et sur lequel était appliqué un disque de cuivre, ne produisait d'abord aucune divergence des feuilles d'or ; mais que cette divergence se manifestait, quand ensuite on enlevait le disque de cuivre. Plaff et Pecelet ont aussi constaté qu'un pareil système se comporte comme un condensateur, les deux lames ne se touchant que par quelques points, et Pecelet a trouvé que, si les surfaces sont parfaitement polies de manière qu'il y ait adhérence, le système ne se charge plus. M. Fechner a cru remarquer, au contraire, que l'effet est plus prononcé quand les surfaces sont polies. Enfin, Grove a montré que l'électricité des disques ne peut être due à leur contact, et qu'ils se comportent comme s'ils formaient un condensateur, quand on les sépare par une bande annulaire de papier. Il a pu ainsi répéter l'expérience de Volta, et charger le condensateur ; seulement, il lui fallait répéter plus souvent l'opération, à cause de la plus grande distance entre les disques.

Il nous reste à parler de deux faits qu'on a tout particulièrement invoqués en faveur de l'hypothèse du contact :

<sup>1</sup> *Traité d'électricité théorique et appliquée*, t. II, p. 776.

1<sup>o</sup> Peltier, a vu un condensateur dont les plateaux, l'un d'or, l'autre de platine, étaient réunis par un fil de platine isolé, se charger d'électricité, le platine prenant le fluide négatif. De La Rive attribue cette électricité à l'action de l'air sur le platine. En effet, ayant recouvert ce métal d'une couche de vernis de plus en plus épaisse, il vit la charge aller en diminuant. M. E. Becquerel a confirmé l'existence de cette action de l'air, par l'expérience suivante<sup>1</sup>. Il prit un condensateur formé de deux plateaux de platine, qui ne donnaient aucun signe d'électricité quand on les réunissait par un fil du même métal; ayant ensuite plongé l'un des plateaux dans de l'hydrogène, et l'ayant replacé sur l'autre, l'appareil se chargea, et le plateau qui était resté dans l'air prit le fluide négatif. De La Rive admet que le platine condense l'oxygène à sa surface, et qu'il se combine lentement avec lui; il remarque, pour confirmer l'existence de cette action, qui peut être rapprochée du rôle du platine dans la pile à gaz, que, s'il a été plongé alternativement et plusieurs fois dans l'air et dans l'hydrogène, sa surface devient rugueuse.

2<sup>o</sup> Si, les plateaux du condensateur étant en zinc et en platine, on les fait communiquer par un fil métallique, le platine prend le fluide négatif; mais si l'on établit la communication, avec les doigts mouillés, il prend le fluide positif. Dans le premier cas, l'air agit sur le platine, qui reçoit le fluide négatif, et en même temps sur le zinc, qui prend le fluide positif, comme nous l'avons dit ci-dessus. Dans le second, le zinc oxydé par l'humidité des doigts éprouve une action chimique, qui l'emporte sur l'action exercée par l'air sur le platine, et il reste chargé d'électricité négative.

#### 1874. Expériences au moyen d'électroscopes d'induction. —

M. W. Thomson, M. Tœpler, puis M. A. Righi, ont imaginé de petites machines d'induction, dans lesquelles la faible électricité d'un corps qu'on approche d'une partie mobile développe dans celle-ci une grande quantité d'électricité d'induction, par un artifice semblable à celui qu'on observe dans la machine de Bertsch (1617)<sup>2</sup>. Ces appareils constituent des électroscopes décelant la plus faible quantité d'électricité dans le corps approché, et pouvant servir à rechercher les effets du contact.

Un de ces instruments, dû à M. Thomson, consiste en un cylindre *inducteur* creux chargé de l'électricité que l'on veut rendre sensible, et qui électrise par influence une veine liquide sortant d'un tube métallique placé dans l'axe du cylindre. Le liquide tombe dans un entonnoir isolé, d'où il sort à l'état neutre après avoir transmis son électricité à un second cylindre, dit *récepteur*, enveloppant l'entonnoir et communiquant avec un électroscope à feuilles d'or. — Si l'on réunit par un fil métallique le tube d'écoulement au cylindre inducteur, formé d'un métal différent de celui du tube, le cylindre récepteur se charge

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXII, p. 677.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 446; et t. XIV, p. 488; et *Journal de physique*, de M. d'Almeida, t. III, p. 49.

de plus en plus. Il en est de même quand on remplace l'eau par une limaille métallique.

Mais, dans cette expérience, comme dans celles que l'on fait avec les autres électroscopes d'induction, on peut toujours soupçonner une action chimique de l'oxygène ou de l'humidité de l'air sur le cylindre inducteur. Il peut aussi exister dans l'air environnant de l'électricité, qui suffit à produire l'induction qui charge l'appareil (1835).

**1875. Du contact des liquides et des métaux.** — On voit, par ce qui précède, que, toutes les fois que le contact des métaux est accompagné d'un dégagement d'électricité, il y a quelque action chimique qui rend compte de la présence de ce fluide. Si parfois il y a quelque chose d'obscur dans la manière dont se fait la distribution des fluides, ou dans la nature de l'action chimique, du moins l'existence de cette dernière peut toujours être prouvée. Les partisans du contact ont alors invoqué le contact des métaux avec les liquides; mais, dans ce cas encore, on a pu constater l'absence d'électricité toutes les fois qu'il n'y avait pas d'action chimique. De nombreuses expériences, la plupart pour soutenir l'influence du contact, ont été faites à ce sujet par MM. Becquerel, Karsten, Buff. Les plus importantes sont dues à Pecelet<sup>1</sup>; il chargeait l'électromètre condensateur, ou son appareil à trois plateaux (1674), au moyen de fragments de différents métaux qu'il tenait entre ses doigts, mouillés avec divers liquides. Le métal recevait presque toujours le fluide négatif, ce qui indique une action chimique. Les métaux non oxydables, or, platine, argent, et le charbon prenaient avec les liquides acides le fluide positif, mais en quantité excessivement faible. De La Rive attribue ce résultat à l'action chimique exercée par l'acide sur les doigts. Le peroxyde de manganèse prend aussi le fluide positif, mais il se désoxyde au lieu de s'oxyder. L'huile d'olive, l'huile de naphte, donnent l'électricité négative aux métaux comme s'ils étaient oxydés; mais la couche liquide est trop mince pour empêcher l'humidité des doigts d'arriver jusqu'au métal; autrement, ces liquides étant mauvais conducteurs, il n'y aurait pas communication avec le sol, et le condensateur ne se chargerait pas. — Nous rappellerons encore les expériences de Faraday (1842) : tant que les liquides des deux vases n'attaquent pas un des métaux de l'arc, il n'y a aucun signe d'électricité. Si l'on sépare les deux métaux à leur point de jonction, et si l'on interpose du papier mouillé avec un liquide qui attaque l'un d'eux, il se produit aussitôt un courant.

On a dit, il est vrai, que, s'il y a toujours action chimique quand il y a dégagement d'électricité dans le contact, cette action est la conséquence, et non la cause de la présence de l'électricité. La question, ramenée à ces termes, ne peut plus être décidée par les expériences faites jusqu'à ce jour. Il nous semble cependant qu'il n'y a pas lieu d'hésiter. D'abord, comment expliquer que toujours le contact dégagerait assez d'électricité pour décomposer les dissolu-

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 233.

tions en présence, *quelles qu'elles fussent*, quand nous voyons que les courants doivent avoir une certaine intensité minimum pour décomposer la plupart de ces dissolutions? D'un autre côté, l'étude des différentes sources prouve que, pendant le dégagement de l'électricité, les molécules des corps sont toujours dérangées de leur position d'équilibre, et que tout dégagement cesse dès que ces molécules sont revenues à l'état de repos. C'est ce qui a lieu dans le frottement, les actions chimiques, et, comme nous allons le voir, dans l'action de la chaleur. Or, dans le simple contact, les molécules en présence, une fois le contact effectué, restent en repos. Au premier moment, il peut bien y avoir un déplacement moléculaire, suivi d'un changement dans l'équilibre électrique, mais il ne pourrait en résulter tout au plus qu'un dégagement momentané d'électricité se rapportant à une des causes étudiées plus haut (1795), et non un courant persistant pendant toute la durée du contact; ce qui serait, en effet, la réalisation du mouvement perpétuel, c'est-à-dire d'un mouvement électrique, sans dépense préalable d'un travail quelconque. Le contact ne constitue pas par lui-même une cause active, mais il est une condition de la manifestation des causes d'électricité; car il est clair que, sans contact, il ne peut y avoir action chimique, frottement, pression... Il n'est donc que la cause occasionnelle du dégagement d'électricité; on peut le comparer au déplacement d'une vanne qui détermine la mise en marche d'une roue hydraulique, mais qui ne fait que permettre à l'eau de donner l'impulsion. Il n'y a donc aucune raison de croire que le *contact* soit par lui-même une source d'électricité; et même on peut dire que si, à l'époque de Galvani, il eût été bien établi que les actions chimiques dégagent de l'électricité, il ne serait venu à la pensée de personne de rechercher si le simple contact était plus capable de dégager de l'électricité que de produire de la chaleur ou de la lumière.

### § 3. — ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LA CHALEUR

#### I. Pyro-électricité des cristaux.

**1876.** La chaleur, en dilatant les corps, détruit l'équilibre de leurs molécules. Il en résulte un dérangement de l'équilibre électrique. Cet équilibre tend à se rétablir aussitôt; mais, si quelque cause porte l'électricité à se rendre en un point du corps échauffé, on pourra en constater la présence. C'est ce qui a lieu dans les corps non homogènes, comme certains cristaux, ou quand la chaleur se distribue inégalement. Nous allons examiner successivement le dégagement de l'électricité dans les mauvais conducteurs cristallisés, puis dans les bons conducteurs.

**1877. Électricité de la tourmaline.** — Certains cristaux ont la propriété de s'électriser pendant que leur température varie entre certaines limites. Ce

phénomène, désigné par Brewster sous le nom de *pyro-électricité*, a d'abord été constaté sur la *tourmaline*. Depuis un temps immémorial, les naturels de l'île de Ceylan avaient remarqué que certaines pierres vertes de forme prismatique, placées sur les cendres chaudes, en attiraient les parcelles, et ils donnèrent à ces pierres le nom de *tourmal* (*tire-cendres*), d'où l'on a fait *tourmaline*. Les Hollandais firent connaître ce phénomène aux Européens vers la fin du dix-septième siècle, et apportèrent quelques tourmalines, désignées d'abord sous le nom d'*aimants de Ceylan*. Lemery, en 1717, en montra une à l'Académie de Paris. Epinus fit de nombreuses expériences

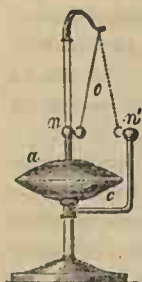


Fig. 1315.

avec deux plaques taillées transversalement à l'axe du cristal, et travaillées pour être montées en bague. Il put en tirer des étincelles, et constata que les faces opposées étaient toujours électrisées d'une manière contraire, ce qu'il montrait au moyen du petit appareil (fig. 1315); *ac* est la tourmaline, dont les faces sont armées de plaques métalliques communiquant avec des boutons *nn'*, entre lesquelles oscille un petit pendule isolé *o*, quand la tourmaline a été chauffée. — Les tourmalines étaient alors fort rares en Europe, et l'on vit la même pierre passer successivement entre les mains d'Epinus, Canton, Priestley.

Il y a plusieurs manières d'observer les propriétés de la tourmaline : Haüy posait le cristal préalablement chauffé, *ab* (fig. 1316) sur un support lesté convenablement, et muni d'une chape en agate reposant sur une pointe. Becquerel le suspendait à un fil de soie sans torsion, dans un cylindre de verre fermé en bas par une plaque métallique, dont il élevait la température (fig. 1317); la tourmaline s'échauffait peu à peu et devenait électrique.



Fig. 1316.

Quand les cristaux n'ont pas la forme de prisme allongé, MM. G. Rose et P. Riess emploient, pour les étudier, un électroscope de Bohnenberger (1826), dont ils remplacent le bouton par un petit plateau sur lequel ils posent, en ayant soin de ne pas frotter la face, le cristal dont ils veulent connaître l'état électrique. M. W. Thomson emploie un de ses électroscopes d'induction (1874).

**1878. Résultats.** — 1° La tourmaline n'est électrique que pendant que sa température varie; dès que la température est stationnaire, tout signe d'électricité disparaît.

2° Quand une tourmaline est échauffée régulièrement, elle prend l'électricité polaire, c'est-à-dire qu'une moitié est électrisée positivement, et l'autre négativement. On peut s'assurer avec un petit *plan d'épreuve*, que la charge diminue, des extrémités au milieu, où se trouve un espace neutre.

3° Pendant le refroidissement, l'état électrique est inverse. Le renversement



de pôles se fait à l'instant où la température reste stationnaire avant de décroître. Ces faits ont été découverts par Canton, qui put dès lors expliquer une foule d'anomalies observées d'abord.

4° La tourmaline présente ordinairement la forme d'un prisme à 6 pans, terminé à une extrémité par trois facettes obliques, et à l'autre par six. Haüy a remarqué que c'est à la première extrémité que se trouve le fluide positif pendant l'échauffement. M. Riess l'a nommé *pôle homologue*, parce qu'elle prend le fluide représenté par le même signe que la variation de température. L'autre se nomme *pôle antilogue*; il prend l'électricité de signe opposé à celui qui indique le sens du changement de la température.

5° Si une moitié seulement du prisme est échauffée ou refroidie, elle présente seule l'électricité qui lui correspond; l'autre restant neutre. — Il semble donc qu'il ne se produit ici qu'une seule espèce d'électricité, contrairement à ce que nous avons vu jusqu'ici. Mais il est probable que l'autre se cache dans l'intérieur du cristal.

6° Quand une des moitiés s'échauffe, pendant que l'autre se refroidit, elles reçoivent toutes deux la même espèce d'électricité. Ce résultat, constaté par Bergmann, découle de ceux qui précèdent.

7° Il y a de grandes différences entre les tourmalines; on en trouve qui ne s'électrisent que par un changement rapide de température, d'autres qui ne peuvent s'électriser. Les plus électriques sont les plus grosses et les plus transparentes, particulièrement les tourmalines vertes ou bleues du Brésil. Enfin ces propriétés ne se manifestent qu'entre certaines limites de température, comprises généralement entre 10° et 150°. M. Gaugain a trouvé l'explication de la limite supérieure: à 150°, la tourmaline est un très-bon conducteur; si donc les électricités se séparent, on ne peut les observer, car elles se recombinent aussitôt.

8° Canton a découvert que, si l'on brise en deux parties une tourmaline qui se refroidit, chaque fragment présente deux pôles opposés, comme ceux d'un aimant brisé. Les plus petites parcelles ont la faculté de s'électriser: Brewster ayant pulvérisé une tourmaline, vit les parcelles adhérer à une lame de verre chaude, et se grouper en obéissant à leurs attractions mutuelles, quand il imprimait de petites secousses à la lame. La propriété électrique appartient donc aux particules des cristaux, et non à leur ensemble; ce qui explique pourquoi la scolézite, qui est très-électrique, l'est tout autant, après que la chaleur l'a transformée en une masse opaque et friable.

**1879. État de l'électricité dans la tourmaline.** — Les fragments de tourmaline conservant les propriétés du cristal entier, on peut comparer ce cristal en voie d'échauffement ou de refroidissement, aux aimants, ou aux piles sèches. On peut encore rapprocher l'état électrique des tourmalines de celui des corps isolants dans lesquels on a développé l'électricité polaire en en approchant un corps électrisé (1645); seulement, ici, l'état polaire est dû à la chaleur. Becquerel attribue l'électricité polaire à l'écartement produit par la chaleur entre ses couches transversales, écartement qui les électrise d'une manière différente

sur les deux faces, comme cela a lieu dans le clivage. Cette explication convient surtout à la topaze, qui se clive perpendiculairement à son axe.

M. Gaugain regarde les cristaux pyro-électriques comme des *piles thermo-électriques* (1890) d'une très-grande résistance. En effet, l'électricité de la tourmaline peut se répandre au dehors et charger un électroscope. En enveloppant les extrémités d'une grosse tourmaline chauffée par une lampe à alcool, de feuilles de platine communiquant avec un rhéomètre très-sensible, M. du Bois-Reymond obtint un courant partant du pôle *homologue* pendant l'échauffement, et du pôle *antilogue*, pendant le refroidissement. M. Friedel a aussi obtenu des courants au moyen de cristaux de cuivre pyriteux et de cuivre gris, qui sont un peu conducteurs. Cependant Becquerel n'avait pu charger le condensateur d'un électromètre, au moyen d'une tourmaline isolée en voie de refroidissement; c'est que les électricités opposées des deux pôles du cristal se retenaient

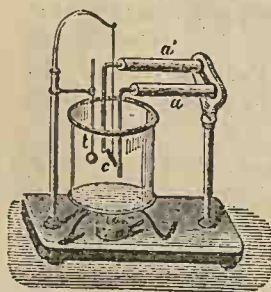


Fig. 1317.

mutuellement par attraction. M. Gaugain, ayant eu soin de faire passer dans le sol une de ces électricités, a pu facilement charger, avec l'autre, un électroscope ordinaire à feuilles d'or<sup>1</sup>. Il suspendait la tourmaline à un support isolant, par deux fils de platine enroulés autour de ses extrémités. Le cristal ayant été échauffé, l'un de ces fils était mis en communication avec le bouton de l'électroscope, et l'autre avec le sol; et il est à remarquer que l'électricité de l'extrémité isolée s'étendait alors jusque dans la partie moyenne. M. Gaugain a pu mesurer avec son électroscope de décharge (1662) les quantités d'électricité

fournies dans un temps donné. Il a reconnu ainsi que les plus grosses tourmalines donnent le plus d'électricité.

**Piles de tourmalines.** — En réunissant plusieurs tourmalines par les pôles de même nom, M. Gaugain obtint un accroissement d'effet considérable. Au moyen de 15 cristaux, il put charger un condensateur de manière à obtenir des étincelles. Ayant réuni plusieurs tourmalines bout à bout par les pôles opposés, il trouva que cette pile ne donnait pas plus d'électricité que chacune de ses parties. Cependant, tous les fragments d'une même tourmaline ne donnent pas les mêmes quantités d'électricité : les plus courts en donnent toujours moins que les plus longs.

**1880. Relation entre les quantités d'électricité et les vitesses de variation de température.** — Becquerel s'est, le premier, occupé de cette question<sup>2</sup>. Le cristal *c* (fig. 1317) était suspendu par un fil de cocon, dans un vase de verre dont le fond métallique était chauffé par une lampe à alcool;

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XLII, p. 4264.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVII, p. 5.

il pouvait osciller entre deux tiges métalliques verticales formant les pôles opposés d'une pile sèche *aa'*, et l'on observait le nombre d'oscillations accomplies en 30<sup>s</sup> aux diverses époques du refroidissement ou de l'échauffement. La température du cristal était donnée par le thermomètre *t*. Cette méthode n'a conduit à aucune loi simple.

M. Gaugain a repris la question sous une forme différente<sup>1</sup>. Il fait remarquer d'abord que, dans la méthode de Becquerel, la tourmaline étant isolée, la tension irait continuellement en augmentant, s'il n'y avait aucune perte ou recomposition des fluides. Il a alors déduit les quantités d'électricité, des décharges de son électroscope (1662). La rapidité du dégagement électrique était en raison inverse de celle des décharges. Voici les lois constatées par ce moyen :

1<sup>o</sup> La quantité d'électricité que produit une tourmaline qui se refroidit est proportionnelle à la vitesse du refroidissement. On remarque, en effet, que l'électroscope donne des décharges plus rapprochées quand on agite l'air autour de la tourmaline. L'expérience montre, en outre, que la quantité d'électricité dégagée pour un abaissement de *t*<sup>o</sup> est constante, quel que soit le temps employé pour obtenir cet abaissement. Or la quantité moyenne d'électricité dégagée en 1<sup>s</sup> est en raison inverse de ce temps; il en est de même de l'abaissement de température en 1<sup>s</sup> ou vitesse moyenne du refroidissement. Les dégagements d'électricité sont donc bien proportionnels aux vitesses du refroidissement.

Pour vérifier la loi précédente, il faut éviter avec soin les déperditions, ne pas dépasser 150<sup>o</sup> (1878), et éviter que la tourmaline ne soit trop grosse, auquel cas le refroidissement ne serait pas le même dans toute l'épaisseur.

2<sup>o</sup> L'échauffement développe autant d'électricité qu'un refroidissement égal de même vitesse. M. Gaugain a reconnu que les différences observées antérieurement provenaient de l'humidité des tourmalines froides et de la conductibilité de l'air chaud dans lequel on les échauffait. Quand, au contraire, on refroidit la tourmaline, elle est sèche et entourée d'air froid. M. Gaugain desséchait la tourmaline avant de l'échauffer, et ne dépassait pas 100<sup>o</sup>, pour que l'air chaud fût à peine conducteur. Il disposait aussi l'électroscope de manière à obtenir des décharges rapprochées. Il reconnut ainsi qu'il faut sensiblement le même temps pour obtenir une décharge pendant le réchauffement et pendant le refroidissement, dans les mêmes conditions.

3<sup>o</sup> M. Gaugain considère les cristaux pyro-électriques comme des *piles thermo-électriques*, analogues à celles que nous décrirons bientôt, et douées d'une grande résistance. Nous verrons comment il appuie cette opinion (1890).

**1881. Substances pyro-électriques.** — La tourmaline n'est pas le seul cristal qui soit pyro-électrique. Canton a constaté la même propriété dans la topaze du Brésil; Brard, dans l'axinite, et Haüy, dans plusieurs autres

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LVII, p. 5; et 4<sup>e</sup> série, t. VI, p. 51.

substances. Ce dernier a reconnu que la *pyro-électricité* ne se rencontre que dans les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie (I, 486). L'extrémité la plus chargée de facettes forme le pôle *antilogue*, comme chez la tourmaline. Brewster a beaucoup augmenté la liste des cristaux pyro-électriques. MM. Rose et Reiss, qui ont fait un travail étendu sur ce sujet<sup>1</sup>, n'ont pas obtenu d'électricité avec toutes les substances qu'il a signalées ; mais, de même que certaines tourmalines ne sont pas électriques, certains cristaux peuvent former une exception parmi ceux de même espèce.

Les principaux cristaux pyro-électriques sont : la *tourmaline*, la *topaze* et l'*axinite*, déjà citées ; le *silicate de zinc*, la *scolézite*, la *boracite*, la *rhodizite*, la *prehnite*. La *titanite*, le *spath pesant* et le *crystal de roche* donnent quelquefois des signes d'électricité quand on les chauffe vivement. Parmi les cristaux artificiels, Brewster cite le *sucre*, les deux *acides racémiques*, et surtout l'*acide urique*. Dans ces divers cristaux, l'axe électrique qui joint les pôles électriques ne se confond pas toujours avec l'axe cristallographique, et quelquefois il y a plusieurs axes électriques.

## II. Courants thermo-électriques.

**1822. I. CIRCUITS DE PLUSIEURS MÉTAUX.** — Si l'on compose un circuit fermé d'un barreau de bismuth et d'une lame de cuivre soudés l'un à l'autre, et qu'on fasse chauffer l'une des deux soudures, le circuit est parcouru par un courant électrique capable de dévier l'aiguille aimantée. Ce courant va de la soudure chaude à la soudure froide par le cuivre. Ce fait important a été découvert, en 1821, par Seebeck. La figure 1318 représente un appareil qui sert à le vérifier. Une règle de bismuth *ac* soutient le pivot de l'aiguille aimantée, et la lame de cuivre soudée en *a* et *c* passe par-dessus cette aiguille. Au lieu de chauffer la soudure *a*, on peut la refroidir ; alors, le courant change de sens. Ørsted, en annonçant la découverte de Seebeck, proposa

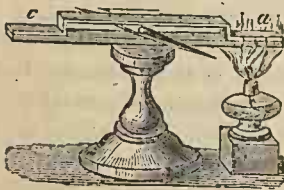


Fig. 1318.

de nommer le courant ainsi produit *courant thermo-électrique*, et d'appeler *courants hydro-électriques* ceux que produisent les piles ordinaires ; dénominations généralement adoptées.

Tous les métaux peuvent, à différents degrés, donner des courants thermo-électriques. Pour les observer quand ils sont faibles, on introduit un rhéomètre dans le circuit. Mais, les électricités n'ayant qu'une faible tension et n'éprouvant que très-peu de difficulté à se recomposer à travers la soudure, la résistance

<sup>1</sup> Archives de l'électricité de A. de La Rive, t. III, p. 585.

extérieure doit être aussi très-faible ; le fil du rhéomètre devra donc être gros et ne faire qu'un petit nombre de tours.

Le sens du courant dépend des métaux associés. Dans la liste suivante, dressée par M. Cumning, chaque métal prend, près de la soudure chaude, le fluide positif avec ceux qui le suivent, et le fluide négatif avec ceux qui le précèdent : (+) *Antimoine, Arsenic, Fer, Zinc, Or, Cuivre, Laiton, Rhodium, Plomb, Étain, Argent, Manganèse, Cobalt, Palladium, Platine, Nickel, Mercure, Bismuth* (—).

L'antimoine et le bismuth sont aux extrémités de la série ; c'est pourquoi on les a employés dans la construction du thermo-multiplicateur (II, 841). La liste qui précède diffère, pour quelques métaux, de celles qui ont été trouvées par M. Yelin, par Nobili, et par Becquerel qui a donné la liste suivante :

(+) 6 *Antimoine, 1 Fer, 2 Zinc, 4 Argent, 7 Or, 3 Cuivre, 5 Étain, 9 Plomb, 8 Platine, 10 Bismuth* (—).

Cette liste ressemble à celle des mêmes métaux s'électrisant par le frottement (1798) et à celle de ces métaux rangés par ordre de *capacités calorifiques* ; les premiers ayant la plus grande capacité. Le chiffre qui précède le nom de chaque métal donne l'ordre des chaleurs spécifiques déterminées par Regnault (II, 1074). La conductibilité et la structure cristalline de certains métaux ont une influence qui explique les différences ; nous verrons, en effet, que tout ce qui modifie la propagation régulière de la chaleur détruit l'équilibre électrique, et détermine un courant.

**1883. Courants thermo-électriques avec des substances non métalliques.** — On peut produire des courants thermo-électriques avec des corps conducteurs autres que les métaux, comme le peroxyde de manganèse, le persulfure de fer, la plombagine. Avec le platine, les deux premiers prennent l'état *négatif*, et la plombagine l'état *positif*. — Les liquides en contact avec les métaux donnent aussi des courants par la chaleur. Si l'on plonge dans de l'eau pure ou alcaline deux lames de platine réunies par un rhéomètre, l'une chaude et l'autre froide, la lame chaude prend le fluide *négatif*. C'est le contraire dans les acides. M. Mazoli a obtenu un courant avec une colonne de mercure placée entre deux fils de platine dans un tube capillaire oblique, dont il chauffait l'extrémité supérieure. — On obtient encore des courants en chauffant la surface de jonction de *deux liquides*, comme l'ont montré MM. Wild et E. Becquerel. Ce dernier place les deux liquides dans un tube en U, dont il chauffe la partie où se trouve la surface de jonction. Le courant est recueilli par deux fils de platine plongeant dans les branches du tube.

**1884. Lois relatives à la température.** — L'intensité des courants thermo-électriques, mesurée par le rhéomètre, augmente avec la différence de température des points de jonction. Becquerel a cherché les lois de ce phénomène<sup>1</sup>. Il soudait deux fils métalliques l'un à l'autre par une de leurs extrémités,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XII, p. 358.

et les joignait, par l'autre, avec le fil d'un rhéomètre, les points de jonction étant plongés dans la glace fondante. Il élevait ensuite graduellement la température de la soudure, et observait les déviations de l'aiguille du rhéomètre. De ces déviations, il déduisait les intensités successives du courant. Les expériences ont été faites sur les combinaisons métalliques suivantes : *fer-argent, fer-cuivre, cuivre-platine, argent-étain, cuivre-argent*. Becquerel a trouvé, pour ces métaux, que l'une des soudures étant à  $0^{\circ}$ , l'intensité du courant est proportionnelle à la température de l'autre, jusqu'à  $40^{\circ}$  à  $50^{\circ}$ . Cette loi donne le moyen de construire facilement des tables analogues à celles dont s'est servi Becquerel pour l'établir, quand les déviations ne dépassent pas  $50^{\circ}$ .

Si aucune des soudures n'est à  $0^{\circ}$ , l'intensité du courant n'est plus proportionnelle à la différence de leur température; mais, si l'on représente les températures par  $t$  et  $t'$ , l'intensité est égale à la différence entre les intensités qu'on obtiendrait si, l'une des soudures étant à  $0^{\circ}$ , l'autre était successivement aux températures  $t$  et  $t'$ .

Si l'on dépasse  $50^{\circ}$ , les lois qui précèdent ne se vérifient plus, et l'intensité du courant croit de moins en moins. L'accroissement est à peine sensible vers  $300^{\circ}$  pour un couple *cuivre-fer*, puis l'intensité du courant diminue, et devient

nulle au rouge sombre; au delà, le courant change de sens. Dans un couple *zinc-argent*, le changement de sens a lieu à  $225^{\circ}$ , et dans le couple *or-zinc*, un peu au delà de  $150^{\circ}$ . Pouillet n'a pas remarqué de changement de sens dans le courant d'un couple *fer-platine* pour les plus hautes températures. Il a constaté en outre que l'intensité d'un couple *bismuth et cuivre*



Fig. 1319.

est proportionnelle à la température d'une des soudures, l'autre étant à  $0^{\circ}$ , depuis  $-78^{\circ}$  jusqu'à  $100^{\circ}$ .

Les résultats trouvés par Becquerel sont les mêmes quand les métaux, au lieu d'être en contact, sont séparés par de la soudure, ou même par une série de un ou plusieurs métaux, pourvu que les extrémités, tournées l'une vers l'autre, des métaux considérés, soient élevées à la même température que leur surface de jonction quand ils se touchent. Pour le prouver, Becquerel forma un circuit de plusieurs métaux soudés les uns à la suite des autres (fig. 1319) : cuivre C, fer F, platine P, étain E, zinc Z, argent A, or O. Les extrémités de la série sont mises en rapport avec le fil d'un rhéomètre, et l'on trouve que la déviation est la même quand, toutes les autres soudures étant à  $0^{\circ}$ , on chauffe à  $40^{\circ}$  seulement la soudure  $a$  qui joint du fer à du cuivre; ou simultanément les soudures  $b$  et  $c$ , ou  $d$  et  $e$ , entre lesquelles le fer et le cuivre sont séparés par du platine ou de l'étain; ou encore les soudures  $b$ ,  $g$ , entre lesquelles le fer et le cuivre sont séparés par des fils de platine, cuivre, étain, fer, zinc.

**1885. Comparaison des pouvoirs thermo-électriques.** — On appelle *pouvoirs thermo-électriques relatifs* des couples de métaux réunis deux à deux, les intensités relatives des courants qu'ils donnent quand on élève leur soudure à une température donnée, tous les autres points de jonction compris dans le circuit étant maintenus à 0°. Pour comparer les pouvoirs des divers métaux, il faut évidemment que le circuit reste le même dans toutes les expériences. Becquerel employait le circuit (*fig.* 1319); la soudure qui unissait les métaux considérés étant portée à 20°, et toutes les autres à 0°. Le tableau qui suit contient les résultats obtenus; les deux métaux associés sont placés l'un au-dessus de l'autre, celui qui prend le fluide positif, en dessus.

	+	Fer	cuivre	fer	argent	fer	fer	cuivre	zinc	argent.
	-	Étain	platine	cuivre	cuivre	argent	platine	étain	cuivre	or.
Déviation... ..		36°,50	16	34,50	4	33	39	7	2	1
Intensités... ..		31,24	8,55	27,96	2	26,20	36,07	3,50	1,0	0,50.

Nous verrons que si l'on forme un circuit avec un seul métal dont on rapproche les extrémités différemment échauffées, on obtient un courant dont l'intensité varie suivant ce qu'on nomme le *pouvoir thermo-électrique* particulier de ce métal. Cela posé, Becquerel a trouvé que l'intensité magnétique des courants produits en chauffant à 1° le point de réunion de deux métaux, est égale à la différence des intensités des courants qu'ils donneraient séparément, si leurs deux extrémités étaient, l'une à 0°, l'autre à 1°. Ainsi, en désignant le pouvoir thermo-électrique particulier de chaque métal par l'initiale de son nom, on aurait, d'après le tableau qui précède,  $F - C = 27,96$ , et  $F - P = 36,07$ . Or, en retranchant ces deux égalités l'une de l'autre, on trouve  $C - P = 8,11$ , qui diffère peu du nombre 8,55 que donne l'expérience. De même, on a  $F - E = 31,24$ , et  $C - E = 3,50$ ; d'où  $F - C = 27,74$ , et l'expérience donne 27,96. Donc « l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions produites dans chaque métal par le même échauffement. »

On peut, en combinant ainsi les intensités données par le tableau, trouver le pouvoir thermo-électrique particulier des métaux qu'il contient, quand on connaît celui de l'un d'eux. Par exemple, en désignant toujours par F le pouvoir du fer à 20°, on a  $F - A = 26,20$ , ou  $A = F - 26,20$ .

Malheureusement la détermination de F est très-incertaine. Becquerel ayant remarqué que les pouvoirs thermo-électriques de l'argent, de l'or, du zinc et du cuivre sont à peu près égaux, et que le pouvoir émissif est la seule propriété calorifique de ces métaux qui soit aussi la même, a supposé que le rayonnement à la surface de jonction avait lieu de la même manière que dans l'air, et que la différence des pouvoirs émissifs déterminait le sens et l'intensité du courant. On aurait alors, en prenant pour les pouvoirs du fer et de l'or, les nombres 15 et 12 donnés par Leslie,  $F : F - 26,70 = 15 : 12$ ; d'où  $F = 133,50$ . Il est alors facile de trouver, pour les autres métaux :  $A = 107,3$ ;  $O = 106,8$ ;  $Z = 106,54$ ;  $C = 105,54$ ;  $E = 102,26$ ;  $P = 97,5$ .

Les nombres ainsi obtenus correspondent à la température de 20° et supposent un circuit d'une conductibilité déterminée ; mais leurs rapports sont indépendants de ces deux circonstances. En effet, nous avons vu que l'intensité du courant donné par deux métaux, ou la différence d'action  $F - C$ , est proportionnelle à la température, jusqu'à 50°. De plus, l'expérience prouve que  $F - C$  est aussi proportionnel au pouvoir conducteur du circuit. Si donc on désigne par  $\delta$  l'intensité pour une température de 1°, et pour une conductibilité du circuit représentée par 1, on aura, pour  $t^\circ$  et la conductibilité  $c$ ,  $F - C = \delta \times ct$ . De même pour deux autres métaux, on aurait  $F - P = \delta' \times ct$ ; d'où  $(F - C) : (F - P) = \delta : \delta'$ . Les rapports entre les pouvoirs thermo-électriques sont donc les mêmes quels que soient le circuit et la température, pourvu que celle-ci ne dépasse pas 50°. Ce résultat a été vérifié sur des circuits différents, dont les soudures étaient portées à 20°.

Pour vérifier les principes d'où il est parti, Becquerel a fait le calcul suivant : on sait que lorsque la température est partout la même dans un circuit de plusieurs métaux, le courant définitif est nul. On doit donc trouver une somme algébrique nulle en ajoutant les nombres qui représentent les intensités des courants positifs ou négatifs produits à chaque soudure. Si, par exemple, on prend un circuit formé de fer, platine, argent, cuivre, fer, on trouve, pour 20° :

$$\begin{array}{l|l} F - P = 133,5 - 97,5 = + 36 & P - A = 97,5 - 107,3 = - 9,80 \\ A - C = 107,3 - 105,54 = + 1,76 & C - F = 105,54 - 133,55 = - 27,96 \end{array}$$

nombres dont la somme algébrique est nulle.

**1886. Causes qui modifient les pouvoirs thermo-électriques.** — Les séries thermo-électriques publiées par divers physiciens diffèrent notablement. Ces discordances proviennent de plusieurs causes ; d'abord de différences dans la pureté, ensuite d'inégalités de structure dépendant de l'état cristallin, ou des actions mécaniques qu'ont pu subir les corps. Ces circonstances peuvent avoir plus d'influence que la substance, et même entraîner le renversement du courant, surtout quand les pouvoirs des corps associés diffèrent peu. L'acier et le fer sont plus positifs quand ils sont recuits que lorsqu'ils sont trempés ou écrouis. — L'état de fusion ne paraît pas modifier le pouvoir thermo-électrique. M. Obermeyer ayant chauffé des couples *fer-zinc*, *fer-plomb*, etc., à une température supérieure au point de fusion du métal le plus fusible, n'a pas observé de variation brusque du courant au moment du passage..

M. Gauguain a découvert une autre cause de modification de l'intensité des courants thermo-électriques<sup>1</sup>. Ayant fixé deux fils métalliques égaux, aux extrémités du fil d'un rhéomètre, il les appuya en croix l'un sur l'autre et chauffa l'un d'eux près du point de jonction et non en ce point, et il reconnut que la direction du courant peut dépendre d'un peu d'oxyde formé à la surface de

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XXXVI, pp. 642 et 645.



contact, ou même d'une couche imperceptible déposée sur les métaux quand on les plonge dans la partie bleue d'une flamme d'alcool, effet qu'il indique en disant que le métal a été *carburé*. Ainsi, des couples formés d'un fil de zinc décapé, appuyé légèrement sur un fil d'or, d'argent ou de cuivre, donnent un courant qui va du fil froid au fil chaud par le rhéomètre, et ne dépend pas du point où l'on applique la chaleur. Mais quand la surface de contact, fortement chauffée, s'est recouverte d'un peu d'oxyde, le courant marche en sens inverse.

Quand les deux fils bien décapés, sont fortement pressés l'un contre l'autre, de manière que l'oxydation ne puisse avoir lieu à la surface de jonction, le sens du courant, toujours indépendant du point échauffé, peut varier avec l'élevation de la température. Ainsi, dans les couples formés d'argent uni à l'or, et de fer uni à l'or, à l'argent ou au cuivre, le courant va de l'or à l'argent, ou du fer à l'autre métal par le rhéomètre, tant qu'on n'atteint pas le rouge sombre. Au-delà, le sens du courant change. M. Gaugain n'a pas trouvé comme Becquerel, de changement de sens dans les couples or-zinc, et, argent-zinc, quoiqu'il eût chauffé jusqu'à la fusion du zinc. Il a opéré sur les métaux les plus purs du commerce; de très-faibles différences dans la pureté pouvant, comme nous l'avons vu, faire changer le sens du courant.

**1887. Pouvoirs thermo-électriques des combinaisons.** — Seebeck a publié, en 1822, de nombreuses expériences sur l'énergie des couples formés de divers alliages associés à différents métaux. Il a reconnu qu'un métal allié à un autre ne lui communique pas toujours son propre caractère, positif ou négatif. Ainsi, le zinc, moins positif que l'antimoine, peut le rendre plus positif; par exemple, si les métaux sont unis en quantités égales, ou s'il n'y a que  $\frac{1}{3}$  de zinc. — D'autres fois, le métal introduit communique son caractère à l'alliage, dont le pouvoir est alors peu différent de celui de ce métal. Par exemple, le *nickel* uni au cuivre, ou au cuivre et au zinc (*mailechort*) donne des alliages presque aussi négatifs que le nickel.

Une très-petite quantité de matière peut modifier sensiblement le pouvoir d'un métal. Par exemple, M. Joule a trouvé que l'acier et la fonte sont moins positifs que le fer. La fonte est même *négative* par rapport au cuivre, et donne avec ce métal, un courant de sens contraire à celui d'un couple *fer-cuivre*.

M. E. Becquerel a publié en 1866<sup>1</sup> les résultats d'expériences commencées en 1827, sur les pouvoirs thermo-électriques de nombreuses combinaisons de métaux entre eux et avec des métalloïdes. La substance à étudier était moulée sous la forme d'un barreau droit, aux extrémités duquel était fixé le fil de cuivre d'un rhéomètre. Ces extrémités étaient entourées d'un tube de verre engagé dans des tubes de fer-blanc s'enfonçant latéralement dans des vases cubiques, l'un traversé par de la vapeur d'eau, et l'autre rempli de glace fondante. Pour éliminer l'influence des différences de conductibilité, on introduisait dans le circuit un couple normal *bismuth et cuivre*, dont les soudures étaient auss

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 389.

portées à 0° et à 100°, et auquel on comparait tous les autres; et l'on admettait que les pouvoirs thermo-électriques étaient proportionnels aux intensités données par le rhéomètre. On observait deux intensités successives I, I', les deux couples donnant des courants  $x$  et  $n$  de même sens puis de sens contraire, et l'on avait  $I = x + n$ ,  $I' = x - n$ ; d'où  $x = \frac{1}{2}(I + I')$  et  $n = \frac{1}{2}(I - I')$ . — Voici quelques-uns des résultats trouvés par M. E. Becquerel :

1° Il ne paraît pas y avoir de relation entre les pouvoirs thermo-électriques des corps, et leurs propriétés physiques ou chimiques. On remarque cependant que les métaux les plus positifs sont ceux qui, comme l'*antimoine*, l'*arsenic*, le *tellure*, forment les acides les plus énergiques. Le *nickel*, le *cobalt* et le *bismuth* sont les métaux les plus négatifs.

2° Les alliages entre métaux très-voisins dans la série des pouvoirs thermo-électriques ont des pouvoirs, en général, très-peu différents de ceux des métaux alliés, tandis que les alliages de métaux très-éloignés dans la liste donnent des effets plus marqués.

Le cadmium allié à l'antimoine, en augmente le pouvoir positif, qui est maximum quand ces métaux sont unis à équivalents égaux. Le couple formé de l'alliage associé au cuivre donne alors un pouvoir égal à + 21,41, en prenant pour terme de comparaison l'effet, représenté par 1000, d'un couple de Daniell. Le zinc agit comme le cadmium, mais d'une manière moins prononcée; à équivalents égaux, l'alliage a, avec le cuivre, son maximum, qui est représenté par + 9,02. Si l'on change les proportions, le pouvoir s'affaiblit notablement.

Citons encore l'alliage de 10 d'*antimoine* et 1 de *bismuth*, le plus négatif de ceux qu'a examinés M. E. Becquerel, et dont le pouvoir par rapport au cuivre est presque double de celui du bismuth. Cet alliage est à grains fins, et un recuit prolongé ne modifie pas son pouvoir, qui est représenté par — 6,2.

3° En associant les alliages ou métaux entre eux, au lieu de les associer au cuivre, M. E. Becquerel a formé des couples de force variée, dont nous citerons les plus énergiques, en les comparant toujours au couple de Daniell. La seconde colonne donne les nombres de couples thermo-électriques qu'il faudrait rassembler pour obtenir une tension égale à celle que donne ce dernier. Le corps positif est nommé le premier.

	Rapports.	Nombre de coupl.		Rapports.	Nombre de coupl.
+ Tellure .....	51,21	25,2	Antimoine, Zinc (équivalents égaux) .....	10,28	97,2
— Maillechort .....					
Sulfure de cuivre .....	35,02	29,5	Maillechort .....	5,32	188
Maillechort .....					
Antimoine, cadmium (équivalents égaux) .....	27,61	36,2	Bismuth .....	0,95	1053
10 Bismuth, 1 Antimoine.					
Antimoine, cadmium (équivalents égaux) .....	22,67	45,1	Cuivre .....	0,73	1370
Maillechort .....					
			Platine .....		
			Palladium .....		

1888. PILES THERMO-ÉLECTRIQUES. — Peu de temps après la découverte de Seebeck, Fourier et Ersted réunirent plusieurs alternatives de barreaux de deux métaux différents, pour obtenir une plus forte tension, comme dans les piles voltaïques quand on réunit plusieurs couples. La figure 1320 représente une des dispositions qu'ils ont adoptées. Chaque barreau de *bismuth* soudé à un barreau d'antimoine se recourbe et plonge dans de la glace, et les soudures intermédiaires sont chauffées par des lampes à alcool.



Fig. 1320.

Pouillet a imaginé la disposition (fig. 1321). Chaque couple est composé d'un barreau de *bismuth* en forme de fer à cheval B, aux extrémités duquel sont soudées des bandes de cuivre *c*, *c'*, qui se relèvent et vont se souder alternativement de l'eau chaude et de la glace, et pouvant s'en retirer au moyen de la barre de bois *ab* à laquelle sont fixés les couples.

Ersted et Fourier ont reconnu que l'intensité du courant, donnée par le rhéomètre, est proportionnelle au nombre des couples en activité ou dont une

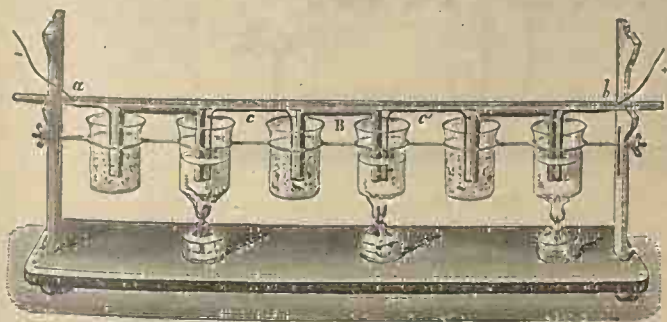


Fig. 1321.

dès soudures est chauffée. Cette loi suppose que le circuit total reste toujours le même; elle a été vérifiée par Pouillet, qui l'a rattachée à d'autres lois remarquables dont nous parlerons plus tard (ch. vi).

Ces piles thermo-électriques, qui dévient si facilement l'aiguille aimantée quand le circuit extérieur n'offre pas de résistance, ne peuvent produire d'effets physiques et chimiques que lorsqu'elles sont composées d'un très-grand nombre de couples. M. Botto a décomposé l'eau au moyen d'une pile formée de 120 brins de platine et de fil de fer de  $\frac{2}{3}$  mm de diamètre, soudés alternativement<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Sciences et arts), 1832, t. II, p. 337.

Le système était enroulé en hélice autour d'une règle, de manière que toutes les soudures paires, disposées en ligne droite, pouvaient être chauffées au moyen d'une flamme d'alcool de même étendue. Poggendorff a composé des piles aussi fortes, en substituant au platine le *packfong* ou *maillehort*.

Becquerel a pu décomposer des sels avec un seul couple formé de fer et cuivre, en prenant pour électrodes des lames du métal même du sel. L'action moléculaire exercée par le métal sur les molécules de même nature contenues dans le sel, favorisait la décomposition. Un couple *platine et fer* ne peut donner les mêmes résultats, quoiqu'il dévie davantage l'aiguille aimantée ; ce qui tient, sans doute, à ce que sa résistance intérieure est moindre.

M. E. Becquerel a construit, au moyen de *sulfure de cuivre* et de *packfong*, une pile qui, avec 30 couples, décompose l'eau, rougit un fil de métal, fait fonctionner un télégraphe électrique<sup>1</sup>. On en voit l'ensemble (fig. 1322) : en *cc'* a sont deux séries de barreaux de sulfure de cuivre à structure fibreuse, obtenus en les coulant à une température peu supérieure au point de fusion (1030° environ). Ces barreaux, fixés verticalement aux bords d'une table, sont serrés

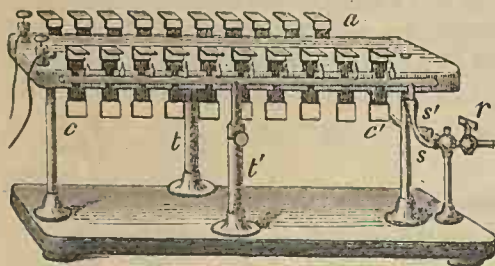


Fig. 1322.

à leurs extrémités par des lames de *packfong*, dont celles du haut sont chauffées par des flammes du gaz arrivant en *rss'*. Des fils métalliques allant d'une plaque chauffée à une plaque froide réunissent les couples deux à deux.

La pile de M. E. Becquerel donne peu d'électricité, à cause de la mau-

vaise conductibilité du sulfure. M. Marcus, en employant l'alliage de 2 d'antimoine et 1 de zinc, en a obtenu de plus grandes quantités, mais avec une moindre tension. Ces diverses piles constituaient déjà un grand progrès, en permettant de produire, au moyen de la chaleur, tous les effets des piles hydro-électriques. Depuis, on est parvenu à réaliser des piles thermo-électriques assez puissantes pour être appliquées aux usages industriels. Les premiers essais dans ce genre ont été faits, vers 1866, par M. Farmer.

**1889. Générateur thermo-électrique de M. Clamond<sup>2</sup>.** — MM. Clamond et Mure, en 1869, ont construit une pile thermo-électrique pratique, dont les éléments, composés de lames de *fer* et de *galène*, étaient disposés en cercle, les soudures paires en dedans et les soudures impaires à l'extérieur. Mais le fer s'oxydait aux points de jonction, et la galène se fendillait perpendicu-

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 389.

<sup>2</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. III, p. 249.

lairement à la longueur des barreaux, ce qui diminuait leur conductibilité. M. Clamond a remédié à ces inconvénients : pour le premier, en engageant le bord des lames de fer dans les barreaux pendant leur fusion ; pour le second, en coulant ces barreaux à une température peu supérieure au point de fusion dans des moules chauffés un peu au-dessous de cette température. Enfin, il a substitué à la galène, un alliage de zinc et antimoine-moulé avec les mêmes précautions.

La figure 1323 représente une couronne de 10 couples. Chaque barreau, B, est soudé, en *s*, à une lame de fer, *snc*, pliée à angle aigu pour faciliter sa dilatation, et vient se joindre en *c* au barreau du couple suivant. Les deux extrémités de la série des couples aboutissent aux bornes *b*, *b'*. On voit (fig. 1324) la coupe verticale d'une pile de 5 couronnes superposées et séparées par des couches d'amiante. En *b* et *b'* sont figurées à part les cinq paires de bornes

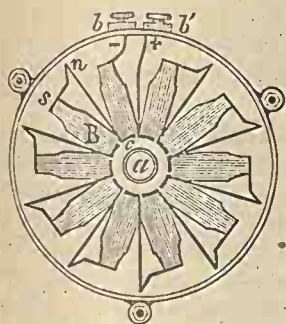


Fig. 1323.

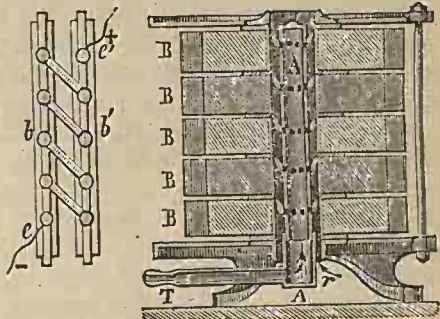


Fig. 1324.

isolées qui leur correspondent. Si l'on réunit entre elles les 5 bornes d'un même côté, la pile est disposée *en quantité*, et constitue une pile de 10 couples de dimensions quintuples. Si l'on réunit ces bornes deux à deux, comme sur la figure, les couples des 5 couronnes sont réunis les uns à la suite des autres, et l'on a une pile composée de 50 couples disposés *en tension*. On peut aussi n'employer qu'une partie des 5 couronnes.

Voici comment on fait agir la chaleur. L'ensemble de la pile forme un cylindre creux dont l'intérieur, luté avec de l'amiante, contient un tube en terre réfractaire AA, percé de petits trous. Dans ce tube arrive, par le tube T, du gaz d'éclairage, dont la dépense est réglée par un régulateur. Ce gaz sort par les trous, où il est allumé, et chauffe fortement les soudures intérieures. L'air arrive en *r* tout autour du tube AA, appelé par le tirage d'une cheminée qu'on adapte au haut de l'appareil. — On a aussi construit des appareils chauffés au coke, au moyen d'une disposition intérieure appropriée.

Le générateur Clamond est d'une constance remarquable, et peut fonctionner

pendant des mois sans qu'il y ait à s'en occuper ; aussi, l'a-t-on adopté dans plusieurs industries, notamment pour la galvanoplastie. Un appareil dont chacune des 5 couronnes ne recouvre que 7 décimètres carrés fournit un courant capable de déposer, par décomposition (1828), 20<sup>gr</sup> de cuivre par heure, en ne dépendant que pour 5 centimes de gaz.

La quantité d'électricité produite, et par conséquent le poids de cuivre déposé, est proportionnelle à la grosseur des barreaux. Leur poids varie de 50<sup>gr</sup> à 4<sup>kil</sup>. Une pile de 30 couples de 200<sup>gr</sup>, équivaut à un couple d'Archereau de 18<sup>cm</sup> de hauteur.

La composition de l'alliage a une grande importance. Le couple donne la plus grande *tension* quand il contient le même nombre d'équivalents de zinc et d'antimoine ; mais, si l'on modifie les proportions, on peut obtenir une plus grande *quantité* d'électricité au détriment de la tension ; et, comme l'expérience prouve que la conductibilité du barreau augmente plus rapidement que son pouvoir thermo-électrique ne diminue, il y a avantage à changer un peu les proportions. Par exemple, la pile qui dépose 20<sup>gr</sup> de cuivre par heure, avec les proportions adoptées par M. Clamond, n'en déposerait que 12<sup>gr</sup>, si l'alliage était composé d'un nombre égal d'équivalents.

**1890. Assimilation des cristaux pyro-électriques aux piles thermo-électriques.** — On peut obtenir un courant en chauffant également, dans des conditions spéciales, les deux soudures qui réunissent deux métaux. M. Gaugain<sup>1</sup> place dans le circuit d'un rhéomètre un cône de bismuth soudé par sa base à la base d'un cône de cuivre, et par son sommet à celui d'un second cône de cuivre. Ces trois cônes étant plongés dans une étuve, il se produit un courant, la soudure des sommets s'échauffant plus vite que celle des bases. Ce courant disparaît quand la température devient uniforme, et se reproduit, en sens contraire, pendant le refroidissement. Le système des trois cônes se comporte donc comme un cristal pyro-électrique.

M. Gaugain a fait cette expérience pour confirmer l'assimilation qu'il a établie, de la manière suivante, entre les cristaux pyro-électriques et les piles thermo-électriques (1880). Considérons, dans une file de molécules du cristal, deux molécules composées chacune de deux éléments, l'un *positif*, l'autre *négatif*. Il y aura entre les divers éléments, deux modes de jonction différents ; l'un dans la molécule même, l'autre entre un élément positif et l'élément négatif de la molécule suivante, et il suffira, pour obtenir un courant, que l'échauffement soit inégalement rapide aux deux jonctions différentes.

Cette manière de voir est confirmée par les faits suivants. M. Marbach avait observé dans des cristaux de pyrite cubique, qui sont *bons conducteurs*, deux variétés présentant des propriétés thermo-électriques opposées, si bien qu'en les associant on obtient un couple plus énergique que le couple bismuth et antimoine. Ces variétés peuvent se rencontrer dans un même cristal. M. Friedel

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. VI, p. 51.

reconnu que les surfaces finement striées sont de signe contraire aux surfaces brillantes<sup>1</sup>. Il opérait simplement en appuyant, en deux points du cristal, les deux bouts inégalement chauds du fil d'un rhéomètre. — Ayant ensuite porté dans une étuve un cristal de pyrite pincé entre les deux bouts garnis de platine du fil du rhéomètre, il obtint un courant thermo-électrique pendant l'échauffement, et un autre en sens inverse pendant le refroidissement, produits par la réunion des variétés positive et négative. Pour confirmer qu'il ne s'agissait pas d'un courant pyro-électrique, il serra entre les bouts de platine, les extrémités d'un petit barreau dont une moitié était en bismuth et l'autre en antimoine, les porta dans une étuve, et obtint les deux courants inverses pendant le réchauffement et le refroidissement; les deux métaux s'échauffant avec des rapidités inégales.

Le cuivre gris a donné à M. Friedel des résultats semblables à ceux de la pyrite.

M. Hankel a reconnu sur le quartz, dont la forme cristalline résulte de la combinaison de deux rhomboédres, que celui qui a les plus grandes faces s'électrise positivement pendant l'échauffement, et négativement pendant le refroidissement<sup>2</sup>.

**1891. II. CIRCUIT D'UN SEUL MÉTAL.** — Seebeck avait obtenu des courants de sens indéterminé en chauffant un point d'un circuit formé d'un seul métal à structure cristalline (bismuth, antimoine), et c'est ainsi qu'il découvrit les courants *thermo-électriques*. Plus tard, Becquerel, dans des expériences célèbres, obtint des résultats constants, au moyen d'un seul métal non cristallin. Nous allons d'abord nous occuper du cas des métaux à structure cristalline.

**1892. 1<sup>o</sup> Courants dans les métaux cristallins.** — Voici comment procédait Seebeck : il coulait du bismuth ou de l'antimoine en forme de cadre (*fig.* 1326), plaçait sur un côté horizontal dirigé dans le méridien magnétique, une petite aiguille aimantée mobile *e*, et chauffait un point du cadre. Aussitôt, l'aiguille était déviée. Le courant produit résultait évidemment de l'irrégularité accidentelle d'arrangement des cristaux rudimentaires de chaque côté du point chauffé, et l'on conçoit facilement pourquoi le sens en était indéterminé.

M. Yelin, et plus tard M. Sturgeon, ont obtenu des courants en chauffant un point de masses cristallines isolées<sup>3</sup>. M. Yelin plaçait au-dessous d'une petite aiguille aimantée suspendue par un fil d'araignée, un barreau de bismuth dont une extrémité avait été chauffée. Quand la partie chaude était du côté du sud et au-dessous de l'aiguille, le pôle nord était dévié à l'est, et il l'était à l'ouest quand on opérait avec la partie froide. Les effets étaient inverses quand la partie chaude était du côté du nord. Les deux moitiés donnent des résultats égaux quand on chauffe le milieu du barreau, et les effets dépendent aussi de sa forme. Par exemple, quand il est coulé en prisme triangulaire, les trois faces ne

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 79.

<sup>2</sup> *Ann. de Pogg.*, t. CXXXI, p. 631, et *Ann. de ch. et de ph.*, 4<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 454.

<sup>3</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. XXIV, LXVII et LXVIII.

produisent pas les mêmes effets : une dévie vers l'est, une autre vers l'ouest, et la troisième n'a pas d'action.

M. Sturgeon a suivi, sur des masses de bismuth ou d'antimoine de diverses formes, la marche des courants à la surface. La figure 1325 représente cette marche sur un cylindre et sur un cône d'antimoine. La lettre C indique la partie chaude, et F la partie froide; nC, n'C sont des lignes neutres sur lesquelles l'aiguille n'est pas déviée. Sur le cône, les courants changent de direction quand, au lieu de chauffer le sommet, on chauffe la base.

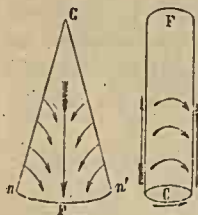


Fig. 1325.

**Influence du plan principal de clivage.** — Faraday a remarqué, dans le bismuth et l'antimoine cristallisés, un plan principal de clivage plus brillant que les autres, et dont on reconnaît également la direction quand on brise une assez grosse masse de ces métaux. M. Svanberg<sup>1</sup> a alors préparé des barreaux dans lesquels la longueur était perpendiculaire au plan principal de clivage, ou dans lesquels cette longueur était dirigée

suivant l'intersection de ce plan avec un second plan de clivage presque aussi marqué que le premier. Ayant disposé bout à bout deux barreaux de la première espèce, et les ayant chauffés près du point de jonction, il obtint un courant allant du froid au chaud par le rhéomètre. Avec deux barreaux de seconde espèce, le courant marchait en sens inverse.

Opérant autrement, M. Frantz taillait des cubes de bismuth ou d'antimoine, de manière que le plan principal de clivage fût parallèle à l'une des faces, ou fit un angle de 30° avec elle. Deux de ces cubes étant pressés l'un contre

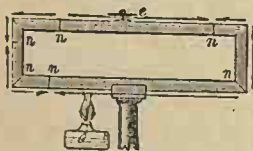


Fig. 1326.

l'autre et mis en communication avec un rhéomètre, il chauffait la ligne de contact au moyen d'un cylindre de verre brûlant, et obtenait un courant plus ou moins intense, suivant la position relative des plans de clivage dans les deux cubes. Le courant était nul quand ces plans étaient parallèles à la face de contact, ou formaient des angles égaux de part et d'autre de cette face.

Matteucci, qui a vérifié ces résultats, a pu déve-

opper dans le bismuth, par compression, des propriétés analogues à celles que lui donne la cristallisation.

**Points neutres.** — Les expériences qui suivent montrent bien l'influence de la structure. M. Sturgeon, ayant coulé du bismuth ou de l'antimoine sous forme de cadre ou d'anneau (fig. 1326), remarqua en différents endroits des points neutres qu'il pouvait chauffer sans obtenir de courant; mais il en obtenait de sens opposés s'il chauffait à droite ou à gauche d'un point neutre. L'aiguille

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXI.



aimantée  $e$  était rendue presque astatique au moyen d'un aimant voisin. Chaque flèche (*fig.* 1326) indique le sens du courant *qui parcourt tout le cadre* quand on chauffe un point quelconque placé près d'elle. Les lettres  $n$  indiquent des points neutres. Au nombre de ces points, on remarque toujours l'endroit où le métal a été versé dans le moule. — Les résultats de la figure sont relatifs à un certain cadre de bismuth; avec un autre, ils seraient différents. On peut, du reste, opérer sur un simple barreau, auquel on fixe le fil du rhéomètre, en ayant soin de ne pas échauffer les points d'attache.

Matteucci a repris ces expériences, et a reconnu que les points neutres se trouvent aux endroits où un refroidissement rapide, ou toute autre cause, a déterminé une cristallisation très-irrégulière à grains très-fins. Si l'on fait fondre et refroidir lentement dans le moule, le cadre de bismuth ou d'antimoine, les points neutres disparaissent, et il s'en montre d'autres partout où il se forme une boursofflure. On peut aussi produire de ces points à volonté en refroidissant rapidement, au moyen d'un filet d'eau, une portion du cadre aussi petite que possible. Il résulte de là qu'un point neutre peut être assimilé à une solution de continuité à côté de laquelle on appliquerait la chaleur.

D'après Matteucci, le courant irait, à travers le point neutre, de la partie froide à la partie chaude, dans le bismuth, et en sens contraire dans l'antimoine. Mais M. Gaugain montre qu'il n'en peut être ainsi; car, si l'on applique la source de chaleur entre deux points neutres, en la rapprochant de l'un, puis de l'autre, le courant change de sens, ce qui montre qu'il

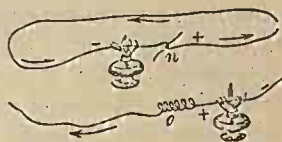


Fig. 1327.

doit y avoir un troisième point neutre entre les deux premiers, par rapport auquel le courant irait en sens contraire de ce qu'annonce la loi, si l'on chauffait près de ce troisième point.

**1893. 2° Circuit d'un seul métal non cristallin.** — Becquerel a, le premier, obtenu un courant dans un semblable circuit<sup>1</sup>. Ayant adapté aux extrémités du fil d'un rhéomètre à fil court, des fils de platine dont les bouts étaient enroulés en spirale, il chauffa au rouge l'une des spirales, l'appliqua sur l'autre, et obtint un courant allant, par le rhéomètre, de la spirale froide à la chaude. Le palladium donne des résultats semblables. Il en est de même du cuivre, mais il faut que la spirale chaude soit légèrement oxydée ou couverte d'une très-mince couche de mercure, d'étain, d'or ou d'argent purs.

Si l'on accroche l'un à l'autre, en  $n$  (*fig.* 1327), deux fils de cuivre, de laiton ou d'acier, et qu'on chauffe l'un d'eux auprès du point de jonction, on obtient encore un courant quand il s'est formé un peu d'oxyde; ce courant va du fil froid au fil chaud par le rhéomètre. Si l'on rapproche peu à peu la flamme, du point de jonction, et qu'on le dépasse, le courant s'affaiblit, devient nul et

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLI, p. 353, et t. LXII, p. 406.

reparaît en sens contraire. Ce courant n'est pas dû, du moins entièrement, à l'action chimique qui produit l'oxydation ; car, avec les métaux très-oxydables, comme l'antimoine, le zinc, la partie chaude reçoit le fluide positif, tandis que l'action chimique lui donnerait le fluide négatif, puisqu'elle s'oxyde le plus (1840).

Le platine ne donne pas de courant dans les mêmes conditions ; c'est que sa surface ne s'oxydant pas au point de jonction, la chaleur n'éprouve pas de difficulté à le franchir. Mais on peut obtenir un courant, avec un fil continu de platine, en contournant en hélice une portion de ce fil, *o* (fig. 1327), et chauffant à côté. Le courant va de l'hélice au point chauffé, par le rhéomètre. Magnus, qui a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet, attribuait ce résultat à une modification de structure dans la partie contournée, ce que nous discuterons plus loin (1895). — On obtient encore un courant, en réunissant les extrémités de deux fils de platine de grosseur différente, et chauffant auprès du point de jonction.

On peut obtenir des courants thermo-électriques au moyen de corps non métalliques : Nobili, ayant attaché deux cylindres d'argile au fil d'un rhéomètre, obtint un courant en appuyant la base rougie de l'un d'eux sur la base de l'autre. Matteucci est arrivé au même résultat avec des cylindres de charbon, dont un était très-chaud, mais pas assez pour s'allumer.

Becquerel a obtenu des courants thermo-électriques avec des fils de platine séparés l'un de l'autre, et mis en communication par la flamme conductrice qui les échauffait<sup>1</sup>. Comme la combustion des gaz produit de l'électricité (1835), pour éloigner l'influence de cette cause, on plonge une spirale de platine dans l'alcool d'une lampe allumée, et une autre spirale, transversalement dans la flamme, dont elle traverse toutes les couches, qui sont, comme nous savons, électrisées différemment. On obtient alors un courant qui va, par le rhéomètre, de la spirale froide à celle qui traverse la flamme. Pour confirmer l'origine thermique de ce courant, Becquerel porte à 0° la spirale qui plonge dans l'alcool, en entourant la lampe de glace fondante, et il remplace la spirale de la flamme, par un vase de platine rempli de glace. Tant que la glace n'est pas entièrement fondue, il n'y a pas de courant, les fils étant tous les deux à 0°.

**189-1. Influence de la structure.** — On peut encore obtenir des courants dans un fil continu, quand sa structure est différente dans deux parties de sa longueur ; par exemple, quand une partie est écrouie et l'autre recuite. Ainsi, M. Sturgeon a constaté qu'un barreau d'acier, mis en rapport avec un rhéomètre, et dont une des extrémités seulement est trempée, donne quand on le chauffe au milieu, un courant qui va de la partie douce à la partie dure, par le rhéomètre. Le cuivre donne un courant qui va dans le sens opposé. M. Mousson a observé beaucoup de faits semblables. Magnus a répété et varié ces expériences<sup>2</sup>. Il a obtenu un courant, au moyen d'un fil écroui par la filière, puis recuit dans une partie de sa longueur, à laquelle il appliquait la chaleur ; et avec

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLI, p. 353, et t. XLII, p. 406.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 405.

un fil entièrement recuit, dont il écrouissait une partie avec le marteau. Le fil était tendu dans un tube de verre horizontal traversant un vase de fer-blanc rempli d'eau bouillante dont la température n'est pas assez élevée pour modifier la structure du fil. Magnus a trouvé ainsi, que le courant va, par le rhéomètre, de la partie écrouie, qui conduit le mieux et s'échauffe le moins, à la partie recuite, avec des fils de *laiton, argent, acier, cadmium, cuivre, or, platine*; et de la partie recuite à la partie écrouie, avec des fils d'*argentan, zinc, étain, fer*. Les métaux les premiers inscrits dans les deux séries, donnent les courants les plus intenses.

Pour augmenter l'intensité du courant, Magnus prend un long fil qu'il enroule sur un cadre de bois, et dont il recuit deux côtés parallèles. Il forme ainsi une pile thermo-électrique analogue à celle de M. Botto (1888), et il suffit de chauffer avec la main deux angles opposés, pour obtenir un courant.

**Modification temporaire de l'élasticité.** — M. W. Thomson a annoncé en 1854, qu'un changement passager produit par *tension, torsion, ou compression* dans une portion d'un fil de cuivre, donne, quand on chauffe le point qui sépare la partie modifiée de celle qui ne l'est pas, un courant qui va, à travers ce point, de la première à la seconde. Si l'on détend la partie la plus tendue, le courant change de sens<sup>1</sup>.

M. Leroux a repris ces expériences, dans le cas de la *traction*<sup>2</sup>. Deux fils de même nature, étaient simplement en contact dans un bain destiné à échauffer le point de jonction. Un de ces fils était horizontal, traversait par des boîtes à étoupes le vase contenant le bain, et était tendu au moyen d'une vis. Un courant se manifestait, qui disparaissait dès qu'on supprimait la tension, si l'on n'avait pas dépassé la limite d'élasticité.

**1895. CAUSE DES COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.** — Pour expliquer la formation des courants thermo-électriques, Becquerel admet en principe que la propagation de la chaleur dans un conducteur est accompagnée d'un mouvement d'électricité. Si tout est semblable de part et d'autre du point échauffé, on a deux courants contraires égaux, qui s'entre-détruisent; mais si quelque circonstance modifie la propagation de la chaleur, d'un côté plutôt que de l'autre, l'un des courants l'emporte sur l'autre. C'est ce qui a lieu quand on réunit deux métaux différents, quand il y a solution de continuité, irrégularité de structure comme dans les métaux cristallins.

Mais l'inégalité de propagation de la chaleur autour du point échauffé, ne suffit pas par elle-même pour engendrer le mouvement électrique; il faut aussi, comme l'ont admis MM. de La Rive, Mousson, Magnus, Gaugain, Leroux,..... qu'il y ait des différences de structure de chaque côté de l'endroit chauffé, quand il n'y a pas de solution de continuité; l'inégale propagation provenant d'une différence de section ne suffirait pas.

<sup>1</sup> *Phil. Trans.* (1856), p. 450, et *Ann. de chim. et de phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. LIV, p. 105.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. X, p. 217.

Pour établir ce principe, il faut prouver : 1° qu'en l'absence de toute inégalité de structure, il ne se produit pas de courant; 2° expliquer comment de semblables inégalités existent toujours, même quand on opère sur un métal continu non cristallin.

1° Citons d'abord l'expérience suivante de Magnus. Ayant fait amincir sur le tour un cylindre de cuivre, dans une assez grande longueur de sa partie moyenne, il n'obtenait aucun courant quand il échauffait un point près duquel avait lieu un changement brusque de diamètre, quoique la chaleur dût se propager inégalement de part et d'autre de ce point.

Les liquides, qui n'ont pas de structure, ne doivent pas donner de courants thermo-électriques; c'est en effet ce qui a lieu. Matteucci prit trois capsules pleines de mercure, dont les deux extrêmes communiquaient avec un rhéomètre par des fils de platine, et dont celle du milieu était chauffée; il les réunit par des siphons de verre remplis de mercure froid, et il n'observa aucun courant. Il arriva au même résultat négatif avec le bismuth en fusion, qui conduit micux à l'état liquide qu'à l'état solide<sup>1</sup>. — Magnus a fait l'expérience suivante : du

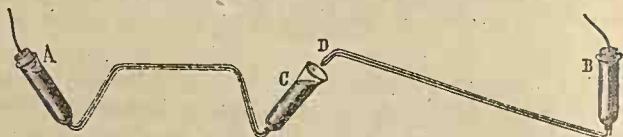


Fig. 1328.

mercure est renfermé dans deux systèmes de tubes de verre AC, BD (*fig.* 1328); en A et B, aboutissent les fils de platine d'un rhéomètre. Après avoir chauffé le mercure en C, on y plonge l'extrémité du tube D; ou bien on chauffe l'extrémité D et on la plonge en C dans le mercure froid. Dans les deux cas, on n'observe pas de courant<sup>2</sup>. Cependant M. Vorsselman de Heer et Peltier avaient observé des courants avec le mercure; mais il est probable qu'ils n'évitaient pas complètement le contact du liquide chaud avec le fil du rhéomètre.

M. E. Becquerel a opéré sur divers liquides en remplissant un tube en U, présentant un renflement dans sa partie courbe, et qu'il échauffait près de ce renflement, il n'obtenait pas de courant; mais il s'en produisait un, si l'un des fils de platine qui plongeaient dans les deux branches était plus chaud que l'autre (1883).

2° Examinons le cas d'un fil continu, qui donne un courant quand on le chauffe à côté d'une partie enroulée en hélice, ou formant un nœud. M. Gauguin a prouvé en 1853, qu'il n'y a de courant qu'autant que les plis du fil se touchent, au moins en un point; s'ils sont bien séparés, il ne s'en produit pas; et comme

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (nouvelle série), t. XII, p. 211, et XIII, p. 199.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 405.

les parties qui se croisent ne sont pas à la même température, on voit que ce cas rentre dans celui de deux fils de même métal que l'on appuie l'un sur l'autre.

M. Leroux<sup>1</sup> a confirmé cette explication en montrant que le courant est d'autant plus intense que la boucle du nœud est plus grande, et il explique l'absence de courant avec certains métaux, par leur grande conductibilité, qui fait que les deux parties qui se touchent sont sensiblement à la même température. Il a prouvé ensuite, par de nombreuses expériences, que la rencontre des plis du fil est rigoureusement nécessaire, et que l'effet n'est pas dû, comme le supposait Magnus (1893), à un écrouissage produit par les courbures données au fil. — Pour établir ce dernier point, il montre que le recuit à blanc de la partie courbée ne change rien au résultat; que le courant ne se produit plus si l'on redresse cette partie sans recuit; tandis qu'il s'en produit un quand on enroule un bout de fil, sur une longueur de plusieurs millimètres, autour du fil principal, et que ce courant disparaît quand on fait glisser la petite hélice loin du point chauffé.

En refroidissant un fil homogène, d'un côté du point chauffé, au moyen d'une boulette d'argile humide, M. Leroux a prouvé une fois de plus, par l'absence d'effet, que la seule différence dans le mouvement calorifique ne peut donner lieu à un courant.

Dans ces expériences, certains résultats négatifs peuvent être attribués au défaut de sensibilité du rhéomètre; et, en effet, au moyen d'un appareil très-sensible, M. Leroux a pu distinguer de faibles courants dans un fil de platine rectiligne et bien recuit. Mais la présence d'un nœud *sans contact entre les plis*, la suppression de ce nœud, avec ou sans recuit, n'ont rien changé au résultat, qui doit être attribué à un léger défaut d'homogénéité, dont ne sont pas exempts les fils de platine les mieux recuits.

#### 1896. Cause du mouvement électrique au point de rencontre. —

La production d'un courant dans un fil continu, se rapportant au cas où deux parties de ce fil sont mises en contact à des températures différentes, il nous reste à montrer d'où viennent, dans ce dernier cas, les différences de structure. Voici l'explication de M. Leroux : La partie froide, recevant de la chaleur près du point de jonction, se dilate; mais sa dilatation est gênée par les parties voisines moins échauffées, d'où résulte un état de tension moléculaire ou de compression. La partie chaude éprouve de même un changement moléculaire en sens opposé, par la contraction locale que le refroidissement, près du point de contact, lui fait éprouver. La condition d'un arrangement moléculaire différent de chaque côté du point de jonction se trouve donc ainsi réalisée.

Cette explication, adoptée, de son côté, par Clausius, est confirmée par les expériences suivantes de M. Leroux. On appuie bout à bout deux gros fils de platine dont les extrémités ont été bien dressées, et l'on n'obtient qu'un très-

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 4<sup>e</sup> série, t. X, p. 204.

faible courant en chauffant à côté du point de jonction, les dilatations se faisant régulièrement; mais, si les extrémités ne se touchent que par le bord, ou si les deux fils sont juxtaposés suivant une arête, ou surtout s'ils sont croisés, le courant est plus prononcé, les dilatations et contractions irrégulières déterminant alors des tensions moléculaires. Il en est de même si l'on creuse une entaille circulaire autour d'un gros fil de cuivre, et le courant est d'autant plus marqué qu'elle est plus profonde. Enfin, M. Leroux a pris un gros fil de laiton se terminant en un tronc de cône, qu'il enfonce dans une cavité cylindrique forcée à l'extrémité d'un autre fil égal de même matière. Quand les deux fils sont en ligne droite, la chaleur appliquée près du point de jonction ne produit qu'un faible courant; mais, si les deux fils sont inclinés l'un sur l'autre, le contact n'est plus symétrique, et l'on obtient un courant beaucoup plus intense.

Le même principe explique le courant continu obtenu par M. Gaugain, en promenant une flamme sur un fil de zinc, même recuit; l'inégalité de tension moléculaire se déplaçant avec le point chauffé. Le cuivre et d'autres métaux donnent le même résultat, mais quand ils sont écrouis, et il y a alors changement permanent de structure partout où passe la source de chaleur. Dans la plupart des métaux, le courant marche dans le sens du déplacement de la flamme.

Nous devons dire, en terminant, que les partisans du contact comme source d'électricité expliquent les courants thermo-électriques en supposant que la chaleur a la faculté d'exalter la force électromotrice de contact, de manière à augmenter la différence de potentiel qu'elle tend à établir entre deux corps de nature différente ou présentant des états moléculaires différents; mais ce n'est là, pour le moment, qu'une hypothèse, qui rend assez bien compte des phénomènes, mais qui aurait besoin d'être appuyée sur de nombreuses expériences.

**1897. Applications à la thermométrie.** — Nous avons eu plusieurs fois l'occasion de citer des applications des effets thermo-électriques à l'évaluation de la chaleur. Maintenant que nous connaissons mieux les faits, nous pouvons revenir sur ce sujet, et chercher quel degré de confiance mérite ce moyen de mesurer les températures.

Les premiers essais sur cette application ont été faits par Becquerel. Plus tard, Nobili et Melloni ont imaginé la pile thermo-électrique (II, 841), que Melloni a ensuite perfectionnée et illustrée par ses belles expériences sur la *chaleur rayonnante*. M. E. Becquerel a substitué au bismuth et à l'antimoine, dont cette pile est ordinairement formée, l'alliage de 10 de *bismuth* et 1 d'*antimoine*, associé à l'alliage de *cadmium* et d'*antimoine* à équivalents égaux, et contenant  $\frac{4}{10}$  de bismuth pour diminuer sa fragilité; 30 couples produisent alors sur l'aiguille du rhéomètre 6 fois plus d'effet que s'ils étaient composés de bismuth et d'antimoine (1887).

Nous avons décrit (II, 846) le pyromètre thermo-électrique de Pouillet, et indiqué la manière de l'employer dans l'industrie. Les variations qui peuvent survenir dans l'état magnétique de l'aiguille du rhéomètre n'ont pas d'inconvénients, car elles affectent l'action de la terre comme celle du courant.

Pouillet a reconnu que la force électromotrice moyenne qui correspond à chaque degré de chaleur décroît jusqu'au rouge naissant, puis augmente. A 1000° environ, elle est à peu près la même que vers 0°, et, au delà, elle continue à augmenter assez rapidement. Il a donc fallu construire des tables de graduation, en comparant les indications du pyromètre thermo-électrique à celles du pyromètre à air (II, 847).

Quand on ne veut pas dépasser 100°, il est préférable d'employer un couple de bismuth et cuivre, de la forme du couple B (fig. 1321); les lames de cuivre  $c, c'$  sont mises en communication avec le rhéomètre, et l'une des soudures est plongée dans la glace fondante, et l'autre dans le liquide dont on veut évaluer la température. Pouillet a reconnu que l'intensité du courant d'un semblable couple est proportionnelle à la température, de  $-78^{\circ}$  à  $+100^{\circ}$ . La température de  $-78^{\circ}$  était obtenue au moyen du mélange de Thilorier (II, 1166).

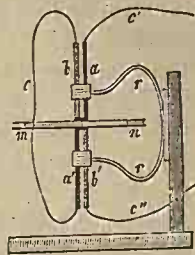


Fig. 1329.

**Pince thermo-électrique de Peltier.** — Cet instrument consiste en deux couples très-déliés  $ab, a'b'$  (fig. 1329), formés de bismuth  $b, b'$  et d'antimoine  $a, a'$ , et dont on applique les soudures de part et d'autre de la section de la tige  $mn$ , dont on veut connaître la température. Ces deux couples, réunis par un fil de cuivre  $c$ , communiquent en  $c'e''$  avec un rhéomètre à fil court. Un ressort  $r$  soutient les deux couples, et les presse contre la tige  $mn$ . Dans certains cas, on n'emploie qu'un seul couple, dont on appuie l'une des soudures sur le point considéré, comme cela a lieu avec l'aiguille de Becquerel et Breschet (II, 1261):

#### 1898. Comparaison au thermomètre

à mercure. — Regnault, dans son grand travail sur la thermométrie (II, 1040), a comparé les indications des appareils thermo-électriques à celles du thermomètre à mercure, au moyen de deux couples différents<sup>1</sup>. Le premier, destiné aux températures ne dépassant pas 30°, est formé de deux demi-cylindres de bismuth et d'antimoine ABCD,

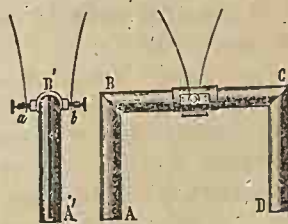


Fig. 1330 1/3.

$A'B'$  (fig. 1330) appliqués l'un contre l'autre, et séparés par une lame d'ivoire, excepté aux extrémités  $A, A, D$ , où elles sont soudées entre elles. En  $a$  et  $b$  sont fixés les fils d'un rhéomètre. Ce couple est le *couple normal* auquel sont comparés tous les autres. Les deux extrémités  $A$  et  $D$  sont plongées dans des vases séparés, remplis d'eau toujours agitée, et dont les températures différentes sont indiquées par des thermomètres à mercure.

<sup>1</sup> Mémoires de l'Académie des sciences de Paris, t. XXI, p. 240.

La figure 1331 représente le couple destiné aux températures élevées : un fil de fer  $ofo'$ , de 1<sup>mm</sup> de diamètre, est soudé en  $o$  et  $o'$ , à deux fils de platine  $oc$ ,  $o'a$ . Les soudures, faites à l'argent, sont plongées dans deux tubes de verre remplis d'une huile fixe ne contenant pas d'oxygène. Un de ces tubes s'enfonce dans une chaudière pleine d'huile, à côté d'un thermomètre à mercure ou d'un pyromètre à air (II, 1040), et l'autre, dans un vase plein d'eau à une température constante. Les boutons  $a$  et  $b$  du couple normal, sont mis en rapport avec l'un des fils d'un rhéomètre différentiel (1831), et les boutons  $a$  et  $c$  du couple fer-platine, avec l'autre fil ; de manière que, les courants de ces deux couples marchant en sens contraire, le rhéomètre donne la différence de leurs intensités.

Dans chaque expérience, Regnault faisait varier la température de la soudure chaude du couple normal, jusqu'à ce que l'aiguille s'arrêtât dans le méridien magnétique. Alors les courants correspondant aux différences de température  $T - t$ ,  $T' - t$ ,  $T'' - t$ ... des soudures du couple fer-platine étaient égaux à ceux que déterminaient dans le couple normal les différences  $\Theta - 0$ ,  $\Theta' - 0$ ,  $\Theta'' - 0$ ... des températures de ses soudures. En opérant ainsi, les résultats étaient indépendants de la graduation du rhéomètre et des variations du magnétisme de l'aiguille. Ces résultats étant consignés dans une table, quand ensuite on voulait mesurer une température élevée, avec le couple platine-fer, on déterminait par l'expérience, avec

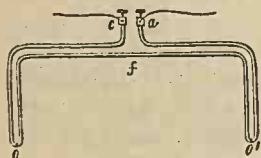


Fig. 1331.

le couple normal, la valeur de  $\Theta - 0$  convenable pour que le courant du couple fer et platine fût annulé, et l'on cherchait dans la table, la valeur de  $T - t$  qui correspondait à cette valeur  $\Theta - 0$ .

Pour connaître le degré de confiance que méritent les indications des couples thermo-électriques, Regnault construisit graphiquement les résultats obtenus dans plusieurs séries d'expériences, en prenant pour ordonnées le tiers des différences  $T - t$ , et pour abscisses, le quintuple de  $\Theta - 0$ . Les diverses séries obtenues dans les mêmes conditions lui ont donné des courbes différant sensiblement, et dont quelques unes présentaient des sauts brusques en certains points, la seconde partie de la courbe ne se raccordant pas avec la première. Ces faits ne peuvent s'expliquer que par des changements dans l'état moléculaire des métaux près des soudures, changements pouvant avoir lieu brusquement, surtout avec le couple fer-platine. Regnault a conclu de ces irrégularités, que l'on ne peut avoir confiance dans les indications du pyromètre thermo-électrique, et qu'il faut toujours, autant que possible, lui préférer le pyromètre à air.

Le couple normal, au-dessous de 30°, donne des résultats assez réguliers. Une différence de 1° entre ses deux soudures faisait toujours dévier l'aiguille du rhéomètre de 17°, quelle que fût la température absolue des soudures.



Regnault a trouvé aussi qu'une augmentation de  $1^{\circ}$  sur  $\Theta - 0$  augmentait d'autant moins la force électromotrice du couple bismuth-antimoine, que cette différence était déjà plus grande. Pour constater ce résultat, contraire à l'opinion généralement admise, il faisait passer un courant hydro-électrique faible, dans l'un des fils du rhéomètre différentiel; puis dans l'autre fil, et en sens contraire, le courant du couple bismuth-antimoine, dont il faisait varier la température d'une des soudures jusqu'à ce que l'aiguille fût à  $0^{\circ}$ . Il augmentait ensuite de  $1^{\circ}$ , la température de cette soudure, et observait la déviation. Plus le courant hydro-électrique était fort, et par conséquent plus devait être grande la différence  $\Theta - 0$ , plus la déviation observée était faible.

M. E. Becquerel a aussi comparé les indications thermométriques de divers couples, avec celles du pyromètre à air. Les principaux couples étudiés sont ceux de *platine et palladium*, de *maillechort associé au tellure*, ou au *sulfure de cuivre*, ou à l'alliage de *1 de zinc et 2 d'antimoine*. La force électromotrice du premier augmente d'une manière très-régulière avec la température  $T$ , qui peut être calculée au moyen de la formule  $3 \text{ Log } T = 2 \text{ Log } I + a - (b : t)$ , dans laquelle  $I$  est l'intensité du courant, et  $a$  et  $b$  deux constantes que l'on détermine par l'expérience.

Malgré les incertitudes qu'ils peuvent laisser parfois dans les hautes températures, les appareils thermo-électriques n'en sont pas moins précieux à cause de leur sensibilité, et parce qu'ils permettent d'évaluer des effets calorifiques que les thermomètres proprement dits ne pourraient indiquer que difficilement; par exemple les effets de la chaleur rayonnante.

## § 4. SOURCES PHYSIOLOGIQUES D'ÉLECTRICITÉ

### I. Poissons électriques.

**1899.** — Dans l'étude des différentes sources d'électricité, que nous venons de passer en revue, il est un fait qui n'aura pas échappé au lecteur attentif: c'est que toutes les actions qui engendrent de l'électricité sont aussi produites par cet agent: ainsi, les actions mécaniques, les actions chimiques, la chaleur, forment des sources d'électricité, et sont produites par elle. On ne devra donc pas s'étonner de voir l'électricité prendre naissance dans les corps vivants, qui sont si sensibles à son action; surtout si l'on considère le grand nombre de réactions chimiques dont ils sont le siège, et si l'on se rappelle que ces corps dégagent de la chaleur, et que la plupart des sources de chaleur sont aussi des sources électriques. Nous allons nous occuper en premier lieu d'un cas particulier très-curieux, celui d'animaux munis d'un organe électrique spécial; et il est à remarquer que ces animaux sont des poissons, c'est-à-dire des animaux qui vivent dans un milieu bon conducteur.

**1900. Poissons électriques.** — Les pêcheurs de l'Italie et de l'ancienne

Grèce avaient remarqué un certain poisson plat ayant la propriété de donner des secousses *engourdisantes* quand on le touchait avec la main, et de tuer, ou au moins d'engourdir, pour s'en défendre ou en faire sa proie, les animaux qui passaient à sa proximité. Ce poisson a reçu le nom de *torpedo* (d'où l'on a fait *torpille*), pour rappeler cette propriété singulière. Platon fait mention de la torpille; Scribonius Largus, Galien et Dioscoride la citent comme pouvant guérir, par ses commotions, la goutte et les maux de tête. Les modernes ont découvert d'autres poissons doués des mêmes propriétés, Pour expliquer les effets qu'ils produisaient, on disait qu'ils lançaient des *molécules engourdisantes*. Réaumur comparait l'action de la torpille à celle d'un ressort qui se débande brusquement, ou d'un corps qui vibre fortement. Après la découverte de la bouteille de Leyde, Muschenbroeck compara aussitôt ses effets à ceux de la torpille. A partir de cette époque, les poissons qu'on avait désignés d'abord sous le nom de *poissons trembleurs, engourdisants, magiciens*, furent appelés *poissons électriques*. Parmi les douze que l'on connaît aujourd'hui, nous citerons les suivants : quatre *torpilles* (*Torpedo narke* Risso, *T. Galvanii*, *T. Marmorata*, *T. Unimaculata*), communes dans la Méditerranée et sur les bas-fonds marécageux des côtes occidentales de la France; le *Gymnote électrique* ou *anguille de Surinam*, répandu dans l'Orénoque et ses affluents; le *silure électrique* (*malapterurus electricus*), qui se trouve dans le Nil et au Sénégal; le *tétron électrique*, et le *Trichiure électrique*, qui habitent la mer des Indes. Le Gymnote est le plus grand de tous; de Humboldt en a vu qui avaient près de 2<sup>m</sup>,60 de longueur. Les poissons électriques ont tous la peau dépourvue d'écailles, et couverte d'une mucosité, qui, d'après Volta, conduit l'électricité beaucoup mieux que l'eau. La torpille et le gymnote ont été étudiés avec soin, surtout la torpille.

**1901. Propriétés des poissons électriques.** — La torpille (*fig. 1333*) est une espèce de raie pouvant avoir jusqu'à 0<sup>m</sup>,50 de longueur; elle a été étudiée en détail par Walsh, Gay-Lussac, Becquerel....., et surtout Matteucci.

Quand on touche avec la main une torpille vivante placée hors de l'eau, on reçoit une commotion, qui se fait sentir jusque dans l'épaule, et est suivie d'un engourdissement analogue à celui que l'on éprouve quand on a comprimé le nerf cubital en se heurtant le coude. La commotion est plus intense, quand on applique les mains sur le dos et sous le ventre de l'animal. Elle peut être ressentie par plusieurs personnes formant la chaîne; la première touchant le dos, et la dernière le ventre de la torpille.

La secousse peut être transmise par les corps bons conducteurs, et les pêcheurs reconnaissent qu'il y a une torpille dans leurs filets, quand, en jetant de l'eau à pleins seaux, pour enlever la vase, ils reçoivent une commotion. C'est à travers l'eau que la torpille tue ou engourdit les poissons dont elle fait sa proie. On peut, au contraire, toucher impunément une torpille avec des corps mauvais conducteurs, ou avec de bons conducteurs présentant la plus légère solution de continuité.

<sup>1</sup> *Journal de physique*, de Lametherie, t. IV, p. 203.

La commotion de la torpille dépend de sa volonté; on peut toucher ce poisson sans rien éprouver; mais quand on l'excite en pinçant ses nageoires, il donne aussitôt plusieurs décharges extrêmement rapprochées. Quand l'animal est continuellement excité, il perd peu à peu son énergie, et les commotions finissent par devenir insensibles, même quand il reste plongé dans l'eau. Ce n'est qu'après un long repos qu'il reprend toute sa vivacité. A la température de 0°, la torpille perd ses propriétés, et les reprend dans de l'eau à 15 ou 20°. Dans l'eau à 30°, elle meurt bientôt en donnant un grand nombre de décharges.

Les commotions du gymnote sont formidables: de Humboldt ayant mis les deux pieds sur un de ces poissons qu'on venait de retirer de l'eau, reçut une secousse si violente, qu'il ressentit, le reste du jour, des douleurs dans presque toutes les jointures. Ces commotions sont assez fortes pour renverser un cheval: près d'Uritucu, dans la Colombie, on fut obligé de changer la direction d'une route, qui coupait une rivière que les mulets devaient passer à gué, et où il en périssait un grand nombre tués par les gymnotes. De Humboldt raconte comment, pour prendre ces poissons, les Indiens de Cumana poussent dans l'eau, des chevaux sauvages dont les piétinements font sortir les gymnotes, de la vase. Ces anguilles jaunâtres et livides se pressent sous le ventre des chevaux, et leur font subir des décharges répétées qui les renversent si violemment, que quelques-uns ne peuvent se relever et se noient. Quand les poissons ont épuisé leur énergie, on les prend avec de petits harpons attachés à de longues cordes. — Les sauvages, qui reçoivent souvent, en se baignant, la commotion du gymnote, l'appliquent à la guérison des paralysies; pratique autrefois usitée à la Guyane hollandaise.



Fig. 1332.

**1902. Origine électrique des propriétés de la torpille, etc.** — La torpille et les poissons analogues donnent tous les effets généraux de l'électricité. Walsh obtint une étincelle avec le gymnote, et constata que le dos de la torpille donne l'électricité positive et le ventre, la négative; mais il ne put en observer l'étincelle. Matteucci et Linari réussirent de la manière suivante: L'animal est étendu entre deux plateaux métalliques isolés (fig. 1332); deux boutons de métal *o*, soutenus par ces plateaux, portent des feuilles d'or placées à une très-petite distance l'une de l'autre. On appuie sur le plateau supérieur, pour exciter la torpille, et l'on voit une petite étincelle jaillir entre les feuilles d'or. Davy, puis Becquerel, Breschet et Matteucci, ont obtenu la déviation de l'aiguille d'un rhéomètre dont les électrodes communiquaient avec les régions dorsale et abdominale d'une torpille; le courant va du dos au ventre par le rhéomètre. Davy produisit des décompositions chimiques. Matteucci en obtint de la manière suivante: le poisson est placé entre deux disques de platine isolés, sur lesquels on étend des feuilles de papier imbibées d'iodure de potassium, et

qu'on réunit par un fil de platine. Après un certain nombre de décharges, on voit apparaître une tache rougeâtre d'iode, du côté du ventre, au point où le fil de platine apporté le fluide positif de la face dorsale.

En faisant aboutir les fils d'un rhéomètre en différents points du dos et du ventre ; ou, comme l'a fait aussi Matteucci, en parsemant le corps du poisson, de membres de grenouilles préparées à la manière de Galvani (1813), on reconnaît que l'électricité n'est pas lancée en quantité égale par tous les points du corps ; elle est en quantité maximum au-dessus des organes électriques, et l'on peut prendre le poisson par la queue sans recevoir de commotions.

Faraday, qui a fait un grand nombre d'expériences sur un gymnote apporté vivant à Londres, vers 1842, a reconnu que la partie antérieure du corps est positive, et la partie postérieure, négative. Il a obtenu avec cet individu, tous les effets des courants : l'étincelle, la déviation de l'aiguille aimantée, et des décompositions chimiques ; il compare sa commotion à celle d'une batterie de 27 décimètres carrés de surface armée.

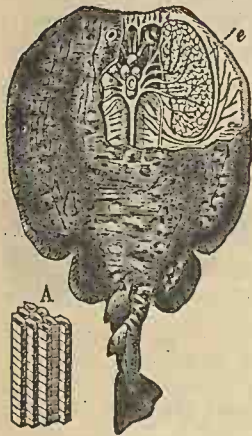


Fig. 1333.

**1903. Organe électrique.** — L'organe électrique de la torpille a été décrit par Redi et Lorenzini, puis par Walsh et Hunter. Geoffroy Saint-Hilaire et Pacini, ont fait connaître celui du gymnote.

L'organe électrique de la torpille *e* (fig. 1333) est composé de tubes aponévrotiques, A, ayant la forme de prismes, le plus souvent hexagonaux, au nombre de 4 à 5 cents dans chaque organe, et accolés les uns aux autres comme les alvéoles des abeilles. Ils forment deux masses semi-lunaires, *e*, disposées symétriquement aux deux côtés de la tête, contre les branchies, et sont dirigés de la région dorsale à la région abdominale, en se soudant fortement par les deux extrémités à la peau, à travers laquelle on peut les distinguer. Chaque prisme est divisé transversalement par des cloisons membraneuses très-rapprochées, formant des cellules remplies d'une substance demi-fluide, composée de gélatine et d'albumine. On a été frappé, dès le principe, de l'analogie de forme de ces tubes avec la pile à colonne. L'organe est plus mince sur son contour qu'au milieu, et est enveloppé d'une membrane fibreuse facile à séparer. Enfin, de très-gros troncs nerveux, partant du cerveau, *e*, se subdivisent dans chaque organe, et leurs dernières ramifications s'étalent en éventail sur les cloisons transversales des prismes.

Dans le gymnote, les prismes sont dirigés de la tête à la queue ; c'est pourquoi les pôles électriques sont situés dans ces régions opposées du corps (1902). Les prismes sont aussi disposés longitudinalement dans le suture. — M. Pacini

a publié un mémoire important sur la structure intime de l'organe électrique de plusieurs poissons<sup>1</sup>.

D'après Galvani et Spallanzani, si l'on coupe ou si l'on comprime par une ligature, les troncs nerveux qui répondent à l'un des organes d'une torpille, on le rend impuissant; tandis que l'autre continue de fonctionner. Matteucci, qui a fait des recherches suivies sur ce sujet<sup>2</sup>, a reconnu que, si l'on coupe certaines branches nerveuses, on paralyse la puissance de la portion seule de l'organe où elles se ramifient. Ayant isolé rapidement l'organe d'une torpille, en laissant intacts les troncs nerveux l'unissant au cerveau, et l'ayant ensuite couvert de membres de grenouille, il vit ces membres s'agiter, seulement sur les parties de l'organe recevant les branches nerveuses qu'il irritait. Le rhéomètre se prête aussi à ces sortes d'expériences.

**Lobe électrique.** — Matteucci a encore découvert ce fait capital, que le lobe postérieur du cerveau, qui semble être un renflement de la moëlle allongée et d'où partent les troncs nerveux, est seul capable de déterminer des décharges, quand on l'irrite; il le nomme *lobe électrique*. Si l'on irrite ce lobe sur le côté, l'organe qui est du même côté donne seul des décharges; même quand la torpille est comme morte, ses branchies ne remuant plus. Du reste, le lobe électrique et les nerfs qui se ramifient dans l'organe n'ont pas d'autre fonction que de donner la décharge, ressemblant en cela aux nerfs des organes des sens. — L'action nerveuse qui excite la décharge se propage dans le sens des ramifications des nerfs; car, si l'on coupe un organe en deux transversalement aux prismes, et si l'on irrite avec une pointe un des nerfs visibles dans la section, on ne recueille d'électricité que dans les portions de l'organe où le nerf se ramifie, et non dans celles qui sont plus rapprochées du cerveau. Une très-petite portion de l'organe, détachée du poisson vivant, peut donner des décharges quand on irrite d'une manière quelconque le filament nerveux qui s'y ramifie. Ces résultats se constatent au moyen du rhéomètre, ou de membres de grenouille dont on met un nerf bien séparé, en contact avec le point à explorer.

Voici comment Matteucci explique les effets des poissons électriques: chaque cellule est un organe élémentaire, dans lequel l'électricité se produit indépendamment de l'action nerveuse; car un fragment cubique détaché de l'organe, donne, pendant 24 à 30 heures, une déviation constante d'un rhéomètre à 24,000 tours. Quand l'action nerveuse se fait sentir, chaque prisme, composé de cellules superposées, devient analogue à une tourmaline ou à un aimant; et il se forme à ses extrémités deux pôles contraires, d'autant plus chargés d'électricité que les cellules sont plus nombreuses. L'organe électrique est donc un appareil multiplicateur; aussi, remarque-t-on que ce sont les prismes les plus longs, placés au milieu, qui donnent les plus fortes décharges. Si celles du gymnote ne sont pas aussi fortes qu'on pourrait l'attendre de la grande longueur

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de ph., 2<sup>e</sup> s., t. LXVI, p. 396, et 3<sup>e</sup> s., t. XXI, p. 160, et LIX, 444.

<sup>2</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), t. XXIV, p. 313.

des prismes, c'est que les cloisons sont bien plus écartées que chez la torpille.

Quand on considère l'épuisement des poissons électriques par de nombreuses décharges allant en s'affaiblissant, le rétablissement de leur puissance par le repos, et la structure de l'organe électrique, on ne peut s'empêcher de les comparer aux piles secondaires de M. G. Planté (1866), qui produisent les mêmes effets, quoiqu'elles empruntent leur électricité à une source toute différente.

## II. Courant musculaire.

**1901. Courant propre de la grenouille.** — Lors de la discussion qui s'éleva entre Galvani et Volta, sur l'origine des contractions de la grenouille, le premier remarqua que l'on pouvait obtenir des mouvements très-marqués, en mettant simplement quelque partie de muscle en contact avec des nerfs. L'expérience se fait ordinairement de la manière suivante : après avoir préparé



Fig. 1334.

à la manière de Galvani une grenouille forte et très-vive, on détache les nerfs lombaires, de la colonne vertébrale, en conservant seulement une portion de celle-ci pour les maintenir à leur partie supérieure (fig. 1334), puis on replie l'une des jambes, de manière à lui faire toucher le nerf; aussitôt il se produit une contraction. Aldini a fait un grand nombre d'expériences, dans lesquelles il faisait communiquer les nerfs et les muscles de la grenouille, par l'intermédiaire de son propre corps, ou de cadavres d'animaux<sup>1</sup>.

Galvani voyait dans ces résultats une confirmation nouvelle de ses idées sur l'électricité physiologique, et nous avons vu (1814) comment Volta les rattachait à sa théorie du contact. En 1797, de Humboldt avança qu'il devait exister une électricité animale, indépendamment de toute action physique ou chimique extérieure; et en 1827, Nobili<sup>2</sup> montra que les contractions, dans l'expérience ci-dessus, sont dues à un courant électrique dirigé des muscles aux nerfs dans l'intérieur de la grenouille; prouvant ainsi la justesse des idées de Galvani que les brillantes découvertes de Volta avaient fait abandonner. Pour montrer l'existence de ce courant, Nobili plongeait séparément les membres et les nerfs lombaires d'une grenouille récemment préparée, dans des capsules de verre remplies d'eau distillée (fig. 1335), dans lesquelles s'enfonçaient les extrémités du fil du rhéomètre à deux aiguilles, qu'il venait d'inventer. Il obtint une déviation, indiquant un courant dirigé, dans le

<sup>1</sup> *Essais sur le galvanisme*, par Aldini (1804), t. I.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVIII, p. 225.

rhéomètre, des nerfs aux membres, et désigné sous le nom de *courant propre* de la grenouille. Après cette découverte capitale, Nobili forma des *pires* de plusieurs grenouilles arrangées dans le même ordre, dans une série de vases, et il obtint des déviations d'autant plus grandes qu'il y avait plus d'éléments.

Matteucci s'est occupé du courant de la grenouille dans plusieurs Mémoires importants<sup>1</sup>. Il employait la méthode de Nobili : les extrémités du fil du rhéomètre étaient munies de lames de platine terminées en pointe, couvertes d'un vernis isolant, excepté sur une même étendue des deux lames, qu'il avait soin de plonger simultanément. Il a aussi procédé en mettant simplement les lames de platine, mouillées, en contact avec les muscles et



Fig. 1335.

les nerfs de la grenouille étendue sur une table enduite d'un vernis isolant. Il a encore opéré sur des grenouilles entières écorchées, et enfin sur des grenouilles vivantes, en faisant sortir par une incision, un nerf lombaire qu'il touchait avec une des lames de platine, pendant que l'autre était mise en contact avec un tendon dénudé de la jambe. — En réunissant des jambes de grenouille en série, de manière que le nerf qui sortait de chacune d'elles reposât sur les muscles de la suivante, il forma une *pile* donnant un courant plus intense que celui d'une grenouille entière.

**1905. Grenouille rhéoscopique.** — On nomme ainsi une jambe de grenouille fraîchement préparée, munie d'un long filament nerveux, et introduite dans un tube de verre servant à l'isoler (fig. 1336). Si l'on met deux points du filament nerveux en contact avec deux points du corps dont on veut étudier l'état électrique, on observe des contractions qui indiquent la présence de l'électricité. Cette espèce de *rhéoscope*, souvent employée par Matteucci, peut faire connaître la direction du courant circulant dans le nerf entre les deux points touchés : si la jambe éprouve des contractions quand on introduit le courant, et ne bouge pas quand on le supprime, c'est que le courant marche dans le sens des ramifications du nerf ; il marche en sens contraire, quand la contraction ne se produit qu'au moment où l'on ouvre le circuit. Pour bien juger du sens du courant par ce moyen, sur lequel nous reviendrons (1916), il faut attendre que le membre ait un peu perdu de son irritabilité.



Fig. 1336.

**1906. COURANT MUSCULAIRE.** — Matteucci a constaté que les nerfs ne sont pas nécessaires à la production du courant propre : il prépara deux *pires* de six grenouilles égales ; dans l'une, les membres étaient dépouillés de tous nerfs visibles, tandis qu'on les avait conservés dans l'autre ; ces deux *pires* ayant été opposées l'une à l'autre, il n'obtint qu'un faible courant

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de ph., 2<sup>e</sup> série, t. LXVII, et LXVIII ; et 3<sup>e</sup> série, t. VI, VII et VIII.

différentiel, dans le sens de celle qui ne contenait pas de nerfs. L'intérieur du muscle donne de l'électricité négative, et l'extérieur, du fluide positif; car si l'on enfonce l'un des bouts du fil de platine d'un rhéomètre au fond d'une incision, l'autre bout touchant la surface du muscle, on obtient un courant allant, par le rhéomètre, de l'extérieur à l'intérieur du muscle. Matteucci forma aussi des *piles musculaires*, en réunissant des tronçons de cuisse de grenouille (fig. 1337); le courant allait à travers la pile, de la grande base de chaque tronçon à la plus étroite, ou, de l'intérieur des muscles à l'extérieur. — Quand il y a des nerfs, ils se comportent comme la partie intérieure des muscles.

Matteucci a aussi constaté l'existence du courant musculaire dans divers animaux à sang chaud, pigeons, lapins, brebis, en faisant une plaie dans un muscle, et plaçant les extrémités du fil du rhéomètre, l'une au fond de la plaie, l'autre à la surface du muscle. Il a encore opéré en enfonçant l'extrémité du nerf de la grenouille rhéoscopique dans la plaie, et faisant toucher au bord, un autre point de ce nerf. Enfin, il a formé des *piles musculaires* avec des fragments de muscles de différents poissons, des tronçons de cuisses ou de divers muscles de lapins, de pigeons, ou de petits oiseaux. Le courant augmente d'intensité avec le nombre des fragments, mais il s'affaiblit rapidement, et sa durée est d'autant plus petite que les animaux sont plus élevés dans l'échelle des êtres.



Fig. 1337.

**1907. Loi du courant musculaire.** — Dans les piles musculaires de grenouilles, le courant est de sens contraire à celui qu'on observe dans les expériences de Galvani et de Nobili (fig. 1334 et 1335); aussi Matteucci avait-il distingué ce qu'il appelle le *courant propre* des animaux, du *courant musculaire*.

M. du Bois-Reymond a publié, dès 1842, de nombreuses expériences faites au moyen d'un rhéomètre à 24,000 tours, par lesquelles il démontre l'identité de ces deux courants, en établissant la loi suivante<sup>1</sup>: *Le courant musculaire se manifeste toutes les fois qu'on fait communiquer, par un rhéomètre, un point de la surface latérale des faisceaux de fibres musculaires avec un point d'une section transversale naturelle ou artificielle de ces fibres.* Ce courant est dirigé, par le rhéomètre, de la surface latérale à la section transversale. On peut cependant obtenir un courant en faisant communiquer deux points de la surface latérale. Par exemple, dans un muscle cylindrique, il n'y a pas de courant quand les extrémités du fil du rhéomètre sont également distantes des centres des bases; mais, si l'une de ces extrémités est plus près d'une des bases, il se manifeste un courant, qui traverse le rhéomètre en partant de l'autre extrémité. Ce courant, toujours très-faible, est bien plus intense quand on touche la base même du muscle.

Les nerfs, pendant leur vitalité, sont sujets aux mêmes lois que les muscles, c'est-à-dire qu'ils donnent un courant sensible, dirigé, dans le rhéomètre,

<sup>1</sup> *Recherches d'électricité animale, et Annales de ch. et de ph., 3e série, t. XXX, p. 419.*



de la surface latérale, ou de la section longitudinale, à la section transversale.

Quand on opère sur différents muscles, on trouve que le courant est d'autant plus intense que le muscle est destiné à agir plus fortement pendant la vie : ainsi, les muscles du cœur donnent un courant énergique, et ceux qui enveloppent les intestins n'en donnent qu'un très-faible.

Si l'on détermine dans les muscles d'une grenouille des contractions tétaniques continues, en irritant le nerf mécaniquement, ou par la chaleur, ou par des actions chimiques, le courant musculaire s'affaiblit rapidement. Ce changement dans l'état électrique des muscles peut réagir sur une grenouille rhéoscopique dont on pose les nerfs sur les muscles que l'on fait contracter : à chaque contraction produite en excitant les nerfs, la grenouille rhéoscopique s'agite. Ce phénomène remarquable, nommé *contraction induite*, a été découvert par Matteucci, et constaté par lui sur des grenouilles et sur des lapins, dont les muscles de la jambe, débarrassés de leur enveloppe aponévrotique, étaient excités au moyen d'un couple voltaïque<sup>1</sup>.

M. du Bois-Reymond, ayant introduit dans le circuit du rhéomètre, les membres inférieurs d'une grenouille, n'obtint pas de courant; mais, ayant produit des contractions tétaniques dans une des jambes, en excitant le nerf qui s'y rendait, par l'azotate de strychnine ou tout autre moyen, il obtint un courant dirigé, dans le rhéomètre, du membre contracté à celui qui ne l'était pas. D'abord, les deux courants s'entre-détruisaient dans les deux jambes; mais, la contraction ayant affaibli l'un d'eux, l'autre l'emporta.

**1908. De l'origine du courant musculaire.** — Quelle est l'origine des courants observés dans les diverses expériences que nous venons de rapporter? Faut-il y voir le résultat d'une action organique qui persiste quelque temps après la mort, ou un effet de ces actions chimiques variées qui s'accomplissent dans la profondeur des organes? L'électricité produite aurait alors une origine véritablement physiologique. Mais, dans ces expériences, on a toujours opéré après avoir dépouillé ou blessé les animaux. On ne peut donc s'empêcher de soupçonner des actions chimiques *extérieures* produites, soit par les humeurs exsudées par les surfaces coupées ou mises à nu, soit par l'action de l'air sur ces surfaces. L'air exerce certainement des actions chimiques sur les tissus blessés, et ces actions contribuent à produire la douleur; ce qui explique pourquoi on peut couper, déchirer des muscles, sans occasionner de souffrance quand on opère à l'abri de l'air. Cependant, des expériences directes ont conduit M. du Bois-Reymond à repousser l'action de l'air comme cause de l'électricité musculaire, et Matteucci rejette, d'après les siennes, l'action des fluides exsudés, car il a vu sa pile de muscles donner les mêmes résultats dans des gaz très-différents. Pour lever tous les doutes, il fallait opérer sur des animaux vivants et intacts; c'est ce qu'a fait M. du Bois-Reymond, dans l'expérience qui suit.

**1909. Courant musculaire par la contraction du bras.** — Cette

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VI, p. 339.

expérience capitale se fait de la manière suivante : on plonge un doigt de chaque main dans deux vases séparés, pleins d'eau salée, dans laquelle s'enfoncent des lames de platine communiquant avec le fil du rhéomètre à 2400 tours (fig. 1338). L'aiguille étant au repos, on contracte fortement les muscles d'un des bras en serrant une barre de bois *ab*, et en ayant soin de ne pas remuer les doigts plongés dans l'eau salée ; on voit aussitôt l'aiguille dévier, de manière à indiquer un courant dirigé, dans le rhéomètre, du vase communiquant avec le bras non contracté, au vase opposé. Les résultats sont les mêmes quand on remplace l'eau salée par de l'acide sulfurique étendu, par des dissolutions de potasse, azotate ou acétate de soude, sulfate de cuivre, par de l'eau de source. — M. du Bois-Reymond explique ce résultat en admettant l'existence préalable, dans les deux bras, de courants égaux qui s'entre-détruisent ; quand on contracte l'un d'eux, le courant qui lui correspond s'affaiblit (1907), et l'autre l'emporte. Il est vrai que, dans la grenouille dont on fait contracter un des membres, le

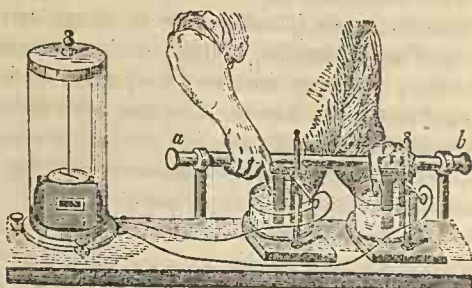


Fig. 1338.

courant est en sens inverse ; mais la disposition des muscles est différente dans ces membres et dans le bras de l'homme.

Pour répéter cette expérience, on peut simplement serrer dans ses mains des cylindres de cuivre soudés aux deux bouts du fil d'un rhéomètre de 15 à 20,000 tours. Il suffit même, après avoir posé sur une table les mains qui tiennent les cylindres, qu'un aide appuie fortement sur l'une d'elles, pour obtenir un courant, qui change de sens avec la main que l'on comprime.

On a cru pouvoir attribuer le courant observé, à la chaleur produite par la contraction, à la congestion sanguine ou à la transpiration qui peuvent en être la conséquence. M. du Bois-Reymond a étudié successivement ces différentes circonstances, et il a montré directement que, si elles produisent des courants, ils ont une direction contraire à ceux que l'on observe pendant la contraction. Becquerel, ayant contracté un des bras, et plongé les doigts dans les vases après que la contraction eut cessé, observa un faible courant. M. du Bois-Reymond explique ce résultat par la persistance, après la contraction, de la modification éprouvée par le courant musculaire. En effet, quand on fait l'expérience à la

manière ordinaire, on remarque que l'aiguille revient à l'état d'équilibre avec une extrême lenteur, quand on cesse de contracter le bras. Du reste, M. Zanteveschi, M. Buff ont confirmé les résultats annoncés par M. du Bois-Reymond. M. Buff a formé une chaîne de 16 personnes se tenant par les mains mouillées, et a obtenu une déviation de 10 à 12° quand elles contractaient le même bras; le courant changeait de sens quand elles contractaient l'autre bras<sup>1</sup>. Enfin, M. du Bois-Reymond, ayant enlevé, au moyen de vésicatoires appliqués sur la face dorsale de ses bras, l'épiderme mauvais conducteur, et ayant mis les deux parties dénudées en contact avec les lames du rhéomètre, obtint une déviation de 60° à 70°, tandis qu'elle n'était que de 2° à 3° quand les mêmes points étaient garnis de leur épiderme.

Ces expériences semblent prouver l'existence de courants électriques dans les animaux vivants. Ces courants sont dus probablement, comme la chaleur animale, aux réactions chimiques variées qui s'accomplissent dans la profondeur des organes. Ils doivent jouer un certain rôle utile aux fonctions vitales, et ils ne peuvent se perdre que difficilement au dehors quand l'organisme est intact, à moins qu'il n'y ait, comme dans les poissons électriques, un appareil destiné à condenser l'électricité. Nous trouverons dans l'étude des actions physiologiques produites par le courant de la pile, d'autres arguments en faveur de l'existence de l'électricité vitale chez les animaux (1923).

### III. Électricité des végétaux.

**1910. Électricité dans la germination.** — Dans ses recherches sur l'origine de l'électricité de l'atmosphère, Pouillet fit l'expérience suivante<sup>2</sup> : il isola, dans une chambre fermée bien desséchée, douze capsules de verre enduites de vernis et remplies de terreau humide dans lequel était semé du blé, et qui communiquait, par un fil métallique, avec le plateau d'un électromètre condensateur. Il n'y eut rien, tant que le germe des grains ne sortit pas de terre; mais, après qu'il fut sorti au bout de trois jours, le condensateur, essayé à toute heure du jour et de la nuit, et pendant plus de huit jours consécutifs, se montra toujours chargé d'électricité négative. Des graines de cresson alénois, de giroflée de Mahon, donnèrent des résultats semblables. Le condensateur recevant de l'électricité négative, l'acide carbonique et la vapeur d'eau exhalés par les parties vertes doivent emporter du fluide positif. C'est là, suivant Pouillet, une source d'électricité atmosphérique, et il estime qu'une surface de 100 mètres carrés couverte de végétation, dégage en un jour assez d'électricité pour charger une forte batterie.

Nous devons dire cependant que M. Riess a fait des expériences qui l'ont

<sup>1</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences), t. XIII, p. 150.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXV, p. 414.

conduit à une conclusion toute différente de celle de Pouillet<sup>1</sup>. Dans ces expériences, il suivait la même méthode que son devancier, mais il opérait comparativement, au moyen de deux appareils semblables, dans l'un desquels le terreau ne contenait pas de graines de cresson en germination. Les deux appareils, observés chaque jour, lui donnèrent souvent des signes d'électricité, mais elle était tantôt positive, tantôt négative, et de plus les résultats étaient les mêmes dans les deux appareils. D'où l'on est en droit de conclure que l'électricité observée est due à quelque cause accidentelle indépendante de la germination. Malgré la concordance et le grand nombre des expériences de Pouillet, il semble donc que de nouvelles recherches seraient nécessaires pour dissiper tous les doutes.

**1911. Courants des végétaux.** — Donné a obtenu des courants en enfonçant des fils de platine fixés au rhéomètre, l'un près de la queue, l'autre près de l'extrémité opposée de divers fruits. Dans les fruits à pépins, le courant va de la queue à l'œil, et, en sens opposé, dans les fruits à noyau. Quand les fils sont enfoncés à la même distance de la queue, il n'y a pas de courant. Les effets doivent être attribués à la réaction de sucs de nature différente accumulés du côté de la queue et du côté de l'œil, et qui réagissent chimiquement les uns sur les autres à travers le tissu cellulaire qui les sépare. En effet, si l'on coupe un fruit en deux *transversalement*, et si l'on exprime le jus des deux moitiés, dans des vases réunis par une mèche de coton mouillée, on obtient un courant, et il n'y en a pas si le fruit a été coupé de l'œil à la queue.

MM. E. Wartmann<sup>2</sup> et Zantedeschi et Becquerel ont démontré l'existence de courants électriques dans les tiges, les racines et les feuilles des végétaux. Voici comment a opéré Becquerel<sup>3</sup> : ayant coupé une tige de jeune peuplier en pleine sève, et introduit l'un des fils de platine du rhéomètre dans la moelle, et l'autre dans une couche du ligneux ou du système cortical, il obtint un courant partant de la moelle, allant en s'affaiblissant, à cause de la polarisation secondaire des fils de platine, et d'autant plus intense que le fil extérieur était plus près de l'épiderme. Si, quand ce dernier fil est tout près de l'épiderme, on retire l'autre de la moelle, pour le rapprocher de l'écorce, le courant s'affaiblit; et, quand ce fil est placé entre le bois et l'écorce, dans la couche de *cambium* qui les sépare, le courant change de sens, le fluide positif partant de l'épiderme. — Si, prenant un morceau d'écorce détachée de l'arbre, on applique les fils du rhéomètre sur la face interne et sur la face externe dépouillée de son épiderme, on a encore un courant, mais qui s'affaiblit beaucoup plus vite que dans le cas précédent; ce qui montre que l'action de l'air atténue les propriétés électriques. Becquerel a fait aussi beaucoup d'expériences sur des tubercules et diverses racines, en ayant soin d'éviter les effets de la polarisation des fils de platine.

<sup>1</sup> *Annales de Poggendorff*, t. XIX, p. 228.

<sup>2</sup> *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des sc.), t. XV (1850), p. 301, et t. XVII, p. 149.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXI, p. 40.

Becquerel explique les courants dont nous venons de parler, par la réaction de la sève riche en oxygène qui monte dans le ligneux, sur la sève qui descend dans le tissu cortical en perdant son oxygène. La sève ascendante se comporte comme un acide à l'égard de l'autre. Il suffit même de plonger dans l'eau des aiguilles de platine que l'on vient d'enfoncer dans le ligneux et l'écorce pour obtenir un courant dû à l'action chimique des sucs qui adhèrent à ces aiguilles. — Si on les enfonce à la même profondeur dans l'écorce, en deux points placés sur la même verticale, on obtient un courant qui indique que l'aiguille inférieure prend le fluide négatif, la sève perdant son oxygène en descendant. Si l'aiguille inférieure est plongée dans le sol humide, à quelques mètres des racines du végétal, qui peut être ligneux ou herbacé, on obtient un courant qui part de l'aiguille plongée dans le sol. Ce résultat s'explique en admettant que la sève ascendante communique aux racines, l'électricité positive qu'elle prend en réagissant sur la sève descendante. — Au lieu d'enfoncer l'une des aiguilles dans les couches extérieures du végétal, on peut la placer entre plusieurs feuilles superposées tenant encore aux branches. Si on l'enfoncé dans le ligneux près de la moelle, on obtient peu ou point d'effet, comme on pouvait le prévoir. Ces effets tendent à diminuer l'électricité négative du sol, et doivent avoir une certaine influence sur l'état électrique de l'air. Enfin, les courants que l'on dérive à l'extérieur de la plante tendent à prouver qu'il circule dans son intérieur des courants électriques dans diverses directions.

M. Buff a fait des expériences, dans quelques-unes desquelles il a eu soin de ne pas blesser ou mutiler les plantes<sup>1</sup>. Deux vases contenant du mercure recevaient des fils de platine entourés d'un tube de verre et mis en rapport avec un rhéomètre. Dans de l'eau recouvrant le mercure, étaient plongées les deux parties du végétal dont on voulait comparer l'état électrique. Quand ces parties étaient les feuilles et les racines, enlevées du sol sans les déchirer, puis lavées au moyen d'un courant d'eau, on constatait un courant électrique allant des racines aux feuilles à travers la plante. Dans une branche séparée de la tige, le courant marchait aussi vers les feuilles. L'écorce jeune et fraîche, les boutons, les fleurs se comportaient comme les feuilles. — Dans les champignons, l'intérieur est négatif par rapport à la surface laissée intacte. M. Buff conclut, en général, que les racines et toutes les parties internes des plantes, qui sont remplies de sucs, sont négatives par rapport aux surfaces extérieures plus ou moins humides.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLI, p. 198.

## CHAPITRE V

## EFFETS PRODUITS PAR LES COURANTS

...Ces phénomènes... se passent à ce point de rencontre des deux pouvoirs qui exercent l'empire le plus direct sur les éléments, la force électrique et la force chimique.

DUMAS, *Bull. de la Soc. d'enc.*, XIII, 153.

## § 1. — EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

## I. Effets sur les animaux morts.

**1913.** Nous avons vu que l'électricité accumulée sur les corps, à l'état statique, ne peut produire les effets physiologiques, physiques, chimiques et magnétiques, qu'elle engendre quand elle se précipite avec explosion à travers les substances qui opposent une certaine résistance à son passage. L'électricité en mouvement dans les courants produit les mêmes phénomènes, comme nous l'avons déjà montré (1828), mais d'une manière bien plus nette, à cause de la continuité du mouvement électrique. Nous allons, dans ce chapitre, étudier en détail les divers effets des courants, en laissant cependant de côté les effets magnétiques, qui feront l'objet d'un chapitre spécial, parce qu'ils dépendent d'une théorie remarquable, due au génie d'Ampère, au moyen de laquelle on est parvenu à rattacher tous les phénomènes magnétiques à ceux de l'électricité.

Remarquons, avant d'entrer en matière, que tous les effets que nous allons étudier sont les mêmes, quelle que soit la source d'électricité à laquelle peut être emprunté le courant, qu'il provienne du frottement; des actions chimiques ou de toute autre cause.

**1914. Phénomènes généraux.** — La première expérience à citer est celle de la grenouille de Galvani, qui amena la découverte de la pile (1813). Bientôt, plusieurs physiciens, particulièrement Galvani et Aldini, appliquèrent ce merveilleux appareil à des animaux ou à des parties d'animaux de grande taille. Aldini se servait d'une pile à colonne de 100 éléments, montée avec de l'eau salée<sup>1</sup>. Ayant fait communiquer par une tige métallique, l'intérieur d'une oreille de la tête d'un bœuf récemment tué avec l'un des pôles de la pile, l'autre

<sup>1</sup> *Essais sur le galvanisme* (1804), t. I, p. 98 et suivantes.

pôle communiquant avec un des naseaux, ou mieux avec l'autre oreille, il vit les yeux tourner dans leur orbite, les oreilles et la langue s'agiter, et les naseaux s'enfler comme dans la plus violente colère. Des cadavres de bœufs, moutons, chiens, lapins, poulets, lui ont aussi donné des mouvements rappelant ceux qui se produisent pendant la vie. — De Humboldt, ayant fait passer le courant de la pile à travers le corps de poissons décapités, les vit sauter et donner des coups de queue. On a aussi opéré sur des insectes : Zanotti, de Bologne, ayant fait passer le courant à travers le corps d'une cigale récemment tuée, produisit le *chant* particulier à ce petit animal.

Les expériences les plus frappantes sont celles qu'on a faites sur des cadavres humains ; Bichat avait fait quelques essais à ce sujet, lorsque la mort vint le surprendre. Aldini fit plus tard, à Bologne, des expériences suivies, sur les corps de deux criminels qui venaient d'être décapités ; il put produire des mouvements énergiques dans les muscles de la face et de différentes parties du corps. Des expériences analogues ont été faites à Turin par Vassali, Julia, Rossi, et par différents observateurs, en d'autres pays.

Citons, en particulier, celles qui ont été faites à Glasgow, par Andrew Ure, sur le cadavre d'un supplicié qui était resté près d'une heure suspendu au gibet<sup>1</sup>. Les électrodes de la pile, de 270 couples, étaient terminées en pointe et munies de manches isolants. L'une des pointes ayant été enfoncée dans la moelle épinière mise à nu au-dessous de la nuque, et l'autre introduite dans une incision faite au talon, la jambe, préalablement repliée sur elle-même, fut lancée avec violence, et faillit renverser un des assistants, qui cherchait à s'opposer à son extension. L'un des pôles ayant été introduit dans une incision faite au-dessus du cartilage de la septième côte, et l'autre mis en contact avec un nerf du cou (*phrénique gauche*), la poitrine se souleva et s'abassa bruyamment, le diaphragme, les intestins furent refoulés et affaissés alternativement, en réalisant tous les mouvements qui accompagnent la respiration. — Un nerf du sourcil (*supra-orbital*) ayant été touché avec l'une des électrodes, pendant que l'autre était enfoncée dans l'incision du talon, les muscles de la face se contractèrent d'une manière effroyable : « La rage, l'horreur, le désespoir, l'angoisse et d'affreux sourires unirent leur hideuse expression sur la face de l'assassin... » A cette vue, plusieurs spectateurs, effrayés et pris de malaise, furent forcés de s'éloigner, et un gentleman s'évanouit. En faisant passer le courant, de la moelle épinière au nerf ulnaire, dans le coude, ou à une légère incision faite à un doigt, on vit les doigts remuer vivement et le bras s'agiter convulsivement, de manière que le mort semblait montrer les divers spectateurs. Du reste, tous ces mouvements étaient incertains et désordonnés.

Au lieu de cadavres venant de mort violente, Aldini voulut aussi expérimenter sur des corps morts naturellement, mais il n'obtint aucun effet ; ce qui se conçoit, l'excitabilité des différentes parties de l'organisme s'étant anéantie graduellement.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 344.

Les muscles qui ne sont pas soumis à la volonté, comme le cœur, la tunique musculaire de l'estomac ou des intestins, peuvent aussi se contracter pendant le passage d'un courant, contrairement à l'opinion de Volta. Le cœur, qui, après la mort, donne spontanément quelques rares pulsations, en donne de bien plus rapprochées après qu'il a été traversé par un courant. De Humboldt a vu le cœur d'une carpe qui ne donnait plus qu'une pulsation en 4 minutes en donner successivement 35, 31, 23, 12 et 3 pendant chacune des minutes qui suivirent le passage du courant. Ces expériences sont surtout faciles avec les animaux à sang froid; cependant, de Humboldt a pu accélérer les pulsations du cœur sur un renard, un rat, des lapins, et Fowler sur divers autres animaux à sang chaud. Les organes de sécrétion subissent eux-mêmes l'influence du courant: Aldini, ayant lancé un courant à travers une des glandes salivaires d'un supplicié, obtint une sécrétion abondante de salive.

**1915. Conditions et lois de la contraction.** — La première condition est que le courant parcoure les nerfs dans le sens de leur longueur; s'il ne fait que traverser les masses musculaires, il n'y a pas d'effets, à moins que le courant, très-énergique, ne vienne à suivre quelques-unes des ramifications nerveuses qui s'y distribuent. On sait que, si l'on irrite les nerfs au moyen d'actions mécaniques, avec un fer rouge ou par des acides, on obtient des contractions; si l'on fait une ligature à un nerf et qu'on l'irrite au-dessous, il y en a encore, tandis qu'il n'y en a pas quand on l'irrite du côté opposé. On arrive aux mêmes résultats quand on fait passer le courant à travers une partie du tronc nerveux, au-dessous ou au-dessus de la ligature. On a conclu de là que l'électricité agit comme excitant du système nerveux.



Fig. 1339.

Après la mort, les muscles perdent peu à peu la propriété de se contracter, et les nerfs, celle d'exciter les contractions quand on les irrite. Valli a reconnu que ce sont les parties des nerfs les plus rapprochées du cerveau qui perdent, les premières, ces propriétés quand ils sont traversés par un courant. Matteucci a confirmé ce résultat; il a vu un nerf qui, soumis à l'action d'un courant, ne pouvait plus exciter de contractions, en produire quand il faisait passer le courant entre deux points plus éloignés du cerveau.

Les nerfs n'excitent pas la contraction des muscles quand ils sont traversés par un courant, perpendiculairement à leur longueur. — Ce fait, remarqué par Galvani, a été vérifié ainsi par Matteucci: on prend deux jambes de grenouille munies d'un long cordon nerveux (fig. 1339); le nerf de l'une est coupé et interrompu dans un espace *ab*, de 2<sup>cm</sup> de longueur, à travers lequel passe le nerf *n* de l'autre jambe. Une goutte d'eau distillée établit la communication entre les points *a* et *b* et le nerf *n*. On fait communiquer les points *a* et *b* avec les pôles d'une pile; le courant traverse transversalement le nerf *n*, et la jambe à laquelle il appartient n'éprouve pas de contractions, tandis que l'autre s'agite convulsivement.



**Courant continu.** — Les contractions ne se manifestent qu'au moment où l'on introduit le courant dans les muscles, et au moment où on le supprime; il ne s'en produit pas pendant tout le temps que le courant circule avec une intensité constante. Nobili a cherché à expliquer ce résultat, remarqué par Volta, en admettant que le courant apporte tout à coup à l'état des nerfs une modification qui disparaît avec ce courant, et il y aurait contraction au moment où se fait la modification et au moment où elle cesse. Aussi a-t-il observé que lorsqu'on introduit ou qu'on supprime le courant peu à peu et non brusquement, il n'y a plus de contractions. Quand le courant est fort et persiste longtemps, la modification produite dans les nerfs et les muscles devient permanente, et les contractions n'ont plus lieu, à moins qu'on ne fasse agir une pile plus forte. Cependant les muscles reprennent peu à peu une grande partie de leur irritabilité par le repos. On peut aussi la leur rendre au moyen d'une étincelle électrique.

**Alternatives voltaïques.** — Quand les muscles ne se contractent plus après le passage prolongé d'un courant, on peut obtenir instantanément de vives contractions, en changeant le sens de ce courant. Volta a pu, au moyen de semblables *alternatives*, produire des contractions sur une grenouille, pendant toute une journée. Ce qui montre que l'inaptitude aux contractions qui suit le passage continu d'un courant n'est pas due à une désorganisation qu'il aurait produite dans les muscles et les nerfs, mais simplement à une modification momentanée imprimée au système des molécules organiques.

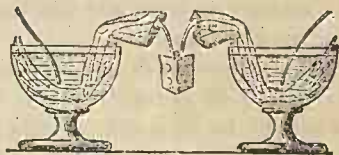


Fig. 1340.

**1916. Influence du sens du courant.** — Le sens du courant a une influence remarquable : Il y a contraction au moment de la fermeture du circuit, dans les muscles où le courant marche dans le sens des ramifications des nerfs, c'est-à-dire là où il est *direct*, suivant la notation de Nobili; et les contractions ont lieu au moment où l'on supprime le courant, dans les muscles où il est *inverse*, ou qu'il parcourt en sens contraire des ramifications. Cette loi, trouvée en 1800 par Le Galvani, avait été entrevue par Volta, qui avait observé que la décharge de la bouteille de Leyde ne fait contracter des membres de grenouille qu'autant que l'électricité positive entre par le tronc. Marianini, qui a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet, employait la disposition de la figure 1335, et Matteucci celle de la figure 1340, au moyen de laquelle les deux effets se voient en même temps. Une grenouille préparée est placée à califourchon sur deux vases remplis d'eau, qui reçoivent les électrodes de la pile (*fig. 1340*). Quand la grenouille est forte, il y a contraction dans les deux jambes quand on établit et quand on supprime le courant; mais au bout de quelque temps, la contraction n'a lieu, quand on établit le courant, que dans la jambe où il est *direct*; et quand on le supprime, que dans celle où il est *inverse*. — Ce résultat

se vérifie sur toutes les espèces d'animaux; il explique comment la grenouille rhéoscopique peut indiquer le sens des courants (1905).

En 1816, Bellingieri reconnut qu'il suffit de faire passer le courant à travers une certaine longueur d'un tronc nerveux, pour observer des résultats différents suivant que l'électricité positive entre par le point le plus éloigné des ramifications, ou par le plus rapproché.

Nobili, qui a publié en 1829 une longue série de recherches sur les contractions produites par l'électricité, distingue 5 états de la grenouille<sup>1</sup>. Dans le premier, quand elle est fraîchement préparée, il y a contraction, au moment où l'on établit et où l'on supprime le courant, qu'il soit direct ou inverse. Dans le second état, il y a de fortes contractions quand on ferme le courant direct et quand on ouvre le courant inverse; il n'y en a pas quand on ferme le courant inverse, et il n'y en a que de faibles quand on ouvre le courant direct. Ces dernières n'existent plus dans le troisième état. Dans le quatrième, il n'y a de contractions qu'au moment où l'on ferme le courant direct. Dans le cinquième, les contractions n'ont plus lieu dans aucun cas, à moins qu'on n'emploie un courant plus énergique.

On doit conclure de ce qui précède que le mode d'action des courants dans l'excitation du système nerveux, diffère essentiellement de celui des autres stimulants, les effets dépendant du sens du courant. De plus, on remarque que : 1° l'électricité agit encore quand les autres stimulants n'ont plus d'action; 2° le changement du sens du courant ranime l'irritabilité; 3° la cessation du courant détermine une contraction très-forte; 4° les poisons, comme la morphine, l'acide prussique, qui détruisent l'irritabilité du nerf pour les excitants ordinaires, la laissent subsister pour l'électricité.

**1917. De la contraction de rupture.** — Comment concevoir maintenant la contraction qui a lieu au moment où l'on ouvre le circuit? Volta l'expliquait par un refoulement du courant en arrière, au moment où le passage lui est fermé; hypothèse reconnue inadmissible par Marianini<sup>2</sup>. En effet, l'aiguille d'un rhéomètre revient simplement et avec calme à sa position d'équilibre, quand on ouvre le circuit; la cuisson que l'on éprouve à une écorchure du doigt, pendant le passage du courant, cesse aussitôt qu'on le supprime; enfin, si, au lieu d'ouvrir le circuit, on enfonce simplement un arc métallique dans les vases qui reçoivent le tronc et les membres (*fig.* 1340), on observe encore une contraction, quoiqu'on ne supprime pas le courant, mais qu'on ne fasse que le détourner subitement de la grenouille. Nobili explique alors la contraction de rupture par l'accumulation de l'électricité dans les nerfs qu'elle parcourt, dans ce cas, en sens inverse. Quand le circuit s'ouvre, cette électricité reflue dans le sens des ramifications et produit la contraction. Aussi la contraction de rupture est-elle d'autant plus forte que le courant a circulé plus longtemps. Il ne devrait donc

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XLIV, p. 60.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XL, pp. 225 et 241.

pas s'en produire si le temps était infiniment court ; et, en effet, si l'on opère avec la bouteille de Leyde, la grenouille ne s'agite pas quand le fluide positif entre par les pattes, le courant étant établi et interrompu au même moment.

Peltier explique autrement la contraction au moment de la rupture : les extrémités des membres de la grenouille se *polarisent*, et le courant contraire produit par les matières déposées, agissant seul quand on ouvre le circuit, fait contracter les muscles dans lesquels il est direct, ou dans lesquels le courant de la pile était inverse. L'influence de la durée du passage de ce dernier se conçoit bien dans cette explication ; mais il est difficile d'admettre que le courant très-faible dû à la polarisation soit capable d'exciter des contractions souvent aussi fortes que celles que donne la pile.

M. Ch. Matteucci a proposé une autre explication, d'après laquelle les nerfs eux-mêmes seraient *polarisés* dans leur profondeur, par le passage du courant. Parmi les expériences qu'il a faites à l'appui de cette explication, nous citerons la suivante : un fil de platine très-fin, entouré d'une couche de coton imbibé d'eau salée, est parcouru par un courant pendant un instant très-court ; si on le fait ensuite communiquer avec un rhéomètre, il donne un courant secondaire intense. M. Ch. Matteucci compare les nerfs à un semblable fil ; le *cylindre-axis* des filaments nerveux remplacerait le fil de platine, et la *moelle nerveuse* ou *myéline* qui l'enveloppe représenterait le coton mouillé. Un fil de zinc bien amalgamé mis à la place du fil de platine ne donne pas de courant secondaire, parce qu'il ne se polarise pas. C'est pourquoi MM. Ch. Matteucci et Regnault ont recommandé d'employer, dans les expériences d'électro-physiologie, des électrodes de zinc amalgamé, ou terminées par des coussinets imbibés de solution de sulfate de zinc, qui présentent l'avantage de ne pas se polariser par des dépôts secondaires.

## II. Effets sur les animaux vivants.

**1918. Sensations produites par les faibles courants.** — Les courants produisent sur les êtres vivants des *sensations* plus ou moins vives, et des *contractions*. L'expérience la plus ancienne est la suivante, publiée par Sulzer, dans sa *Théorie générale du plaisir*, en 1767, avant la découverte de Galvani. On place deux disques de zinc et de cuivre, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la langue, puis on rapproche leur bord extérieur jusqu'au contact ; aussitôt on ressent une saveur acide au point de la langue touché par le zinc, et une saveur alcaline au point touché par le cuivre. Si l'expérience se prolonge, on peut éprouver des nausées. Volta a constaté que la saveur varie, de l'acide brûlant à l'alcali amer, suivant la nature des métaux. Ces sensations viennent, au moins en partie, de la décomposition des humeurs de la langue, par le courant du couple voltaïque formé par les deux métaux.

Ces expériences ont été beaucoup variées : Hunter ayant engagé une lame de

métal sous la langue, et placé une autre lame d'espèce différente entre la lèvre et la gencive supérieure, aperçut une lueur assez vive, chaque fois qu'il mettait ces lames en contact. Il obtint des résultats semblables en appliquant les lames aux deux yeux, ou l'une à un œil, l'autre à la langue. De Humboldt a éprouvé, à la suite d'expériences analogues, une faiblesse momentanée de la vue, et une légère inflammation de la conjonctive<sup>1</sup>. Aldini a pu faire apercevoir des lueurs à des aveugles, en appuyant les pôles d'une pile sur les lèvres et le nez. Ces effets lumineux doivent être attribués à des contractions, et comparés à ceux que l'on produit en comprimant les papières.

De Humboldt ayant introduit une lame de zinc dans une narine, et l'ayant mise en contact avec une lame d'argent placée sur la langue, éprouva dans le nez une sensation de froid accompagnée d'un chatouillement donnant envie d'éternuer. Le Dr Monro saignait du nez quand il faisait cette expérience; l'hémorragie commençait dès qu'il apercevait une lueur.

Volta ayant fait passer le courant d'une pile de 40 couples, d'une oreille à l'autre, entendit un grand bruit qu'il compara à celui que produit une matière visqueuse en ébullition. Ritter entendait un son musical au moment où le courant s'introduisait; il a publié beaucoup d'autres résultats, mais dont quelques-uns paraissent, *à priori*, peu vraisemblables.

**1919. Commotion voltaïque.** — Quand on fait communiquer les pôles d'une pile, au moyen d'une partie du corps, on ressent une commotion d'autant plus forte que la pile se compose d'un plus grand nombre de couples. L'étendue des éléments ne peut suppléer au nombre, l'effet dépendant de la tension des électricités : ainsi, les 12 couples en hélice de la Faculté des sciences de Paris (1821) ne donnent qu'une légère secousse. Gay-Lussac, ayant voulu éprouver le choc des 600 couples de la batterie à auges de l'École polytechnique, reçut une commotion tellement violente, qu'il s'en ressentit pendant plus de 24 heures, et conserva pendant tout ce temps une grande faiblesse dans les bras. La pile de 2000 couples de l'Institut de Londres est capable de tuer un cheval ou un bœuf. Quand la pile n'est pas très-forte, il faut, pour recevoir la commotion, augmenter la conductibilité de l'épiderme en mouillant les mains avec de l'eau salée ou acidulée, et saisir des cylindres métalliques fixés aux électrodes. Plusieurs personnes peuvent recevoir simultanément la décharge en se donnant la main; mais toutes ne l'éprouvent pas également : celles qui sont au milieu de la chaîne peuvent même ne rien ressentir, à cause des pertes d'électricité.

La commotion se fait sentir au moment où l'on établit la communication, puis on n'éprouve plus qu'un léger frémissement dans les muscles, accompagné d'une irritation sourde particulière. Une nouvelle commotion se produit, quand on ouvre le circuit, comme sur les animaux morts (1916).

**1920. Influence du sens du courant.** — Si le courant est *direct* (1916), il y a contraction sans impression vive, quand on l'établit; et, au moment où on

<sup>1</sup> *Expériences sur le galvanisme*, traduction de M. Jadelot (1799).

le supprime, il n'y a pas de contraction, mais une douleur plus ou moins forte. C'est le contraire lorsque le courant est *inverse*. Pour établir cette loi, Marianini prépare une grenouille très-vigoureuse, de manière que le tronc ne reste uni aux membres postérieurs que par les deux faisceaux des nerfs cruraux. Les pattes postérieures sont réunies par une feuille de plomb, et soulevées dans la main revêtue d'une substance isolante. La partie antérieure du corps repose sur une lame de verre, et l'une des pattes est entourée d'une petite bande de plomb communiquant avec un des pôles d'une pile. Quand on fait passer un courant, de la tête aux jambes, ces dernières se contractent aussitôt. Quand ensuite on ouvre le circuit, les jambes ne s'agitent pas, mais l'animal pousse un cri, se soulève et donne tous les signes d'une vive douleur. Les effets sont inverses quand le courant marche des jambes à la tête. Cette expérience a été répétée plusieurs fois avec des piles ayant de 1 à 8 couples. Si la pile était trop forte, on obtiendrait les mêmes effets lors de la fermeture et lors de l'ouverture du circuit.

Marianini a aussi observé que, si l'on ferme le circuit avec les bras, on ressent une secousse plus forte au bras dans lequel le courant est direct. Ritter avait déjà remarqué un sentiment de lassitude et de gêne dans le bras où le courant était direct, et une excitation particulière dans l'autre bras.

Citons encore l'expérience suivante de Matteucci : il découvre sur un lapin le nerf sciatique des deux cuisses, le sépare bien, l'essuie avec du papier Joseph, et l'appuie sur du taffetas isolant. Il fait ensuite passer le courant d'une pile de 10 couples, dans une partie du nerf : l'animal pousse des cris, et la cuisse, le dos et les oreilles se contractent. Ces phénomènes, qui cessent pendant le passage du courant, se reproduisent au moment où il est interrompu, et sont les mêmes, quel qu'en soit le sens<sup>1</sup>. Mais, quand l'irritabilité de l'animal est diminuée, l'entrée du courant direct détermine dans les pattes, la contraction sans douleur; et sa suppression, la douleur sans contractions. Le contraire a lieu quand le courant est inverse dans la partie du tronc nerveux qu'il parcourt. Quand on fait passer le courant perpendiculairement au nerf, on n'observe aucune action, comme dans les animaux morts (1915).

**1921. Actions sur les différentes parties du système nerveux.** — Il résulte de la loi qui précède que le courant produit, à l'instant où l'on ferme le circuit, tantôt des sensations, tantôt des contractions : les premières, quand le courant est inverse, et les secondes, quand il est direct. On peut faire, à ce sujet, un rapprochement important : c'est que les impressions produites sur les organes de la sensibilité, par les agents extérieurs, se transmettent au cerveau

<sup>1</sup> Les contractions produites dans les parties antérieures du corps, où le nerf sciatique n'envoie pas de ramifications, s'expliquent par la transmission de l'excitation, de ce nerf à la moelle épinière, qui détermine ensuite la contraction dans les muscles où elle envoie des filets nerveux. Si l'on coupe, en effet, la moelle épinière, les contractions ne s'étendent pas aux muscles situés au-dessus de la section.

en marchant en sens contraire des ramifications des nerfs, et que les contractions volontaires sont provoquées par une influence qui, partant du cerveau, se transmet dans le sens des ramifications, comme le courant quand il produit la contraction à son entrée.

En outre, les physiologistes ont distingué des fibres nerveuses destinées spécialement aux sensations, et d'autres destinées aux mouvements. Ils ont reconnu aussi que les nerfs qui partent de la moelle épinière s'en séparent par deux systèmes de racines : les unes antérieures, qui président aux mouvements, et les autres postérieures, qui correspondent à la sensibilité. Il était curieux de chercher comment agit un courant sur ces deux espèces de racines ; c'est ce qu'ont fait MM. Longet et Matteucci, et ils ont reconnu que le courant direct n'excite de contractions qu'en entrant par les racines antérieures. Les faisceaux antérieurs et postérieurs qui composent la moelle épinière se comportent comme les racines correspondantes. On peut donc, au moyen de l'électricité, distinguer les nerfs du mouvement de ceux de la sensibilité. Il ne faut pas employer un courant trop fort, autrement l'électricité pourrait passer, des racines antérieures aux racines postérieures, et réciproquement.

Quand on excite les nerfs des organes des sens, on y développe la sensation qui leur est propre : le son dans l'ouïe, les saveurs et les odeurs dans les organes du goût et de l'odorat, la lumière dans l'œil. Ce dernier résultat s'observe facilement en prenant dans la main l'une des électrodes d'une pile de 5 à 6 couples, et touchant avec l'autre un point du visage.

Nous avons vu (1914) que le courant produit la contraction dans les muscles qui ne sont pas sous l'influence de la volonté. Les nerfs du système ganglionnaire, qui président aux contractions de ces muscles, sont donc aussi susceptibles d'être excités par le courant ; mais ils présentent cette particularité, que l'action du courant s'y produit d'abord lentement, qu'elle continue pendant son passage, et persiste quelque temps après qu'on l'a supprimé, effets tout différents de ceux qu'éprouvent les muscles volontaires (1919).

**1922. Effets dus au passage continu d'un courant.** — Si les muscles volontaires ne se contractent pas pendant le passage continu d'un courant, ce dernier a néanmoins une influence évidente sur leurs nerfs, puisque leur irritabilité diminue peu à peu pendant son passage (1915). Le courant continu peut produire d'autres effets : transporter des fluides à travers les tissus organiques, ranimer les actions vitales, rétablir certaines fonctions, modifier les sécrétions, les exhalations... Citons quelques exemples.

Des poulets soumis à l'action continue d'une pile de 50 couples s'affaiblirent peu à peu ; quand ils furent presque morts, le courant ayant été interrompu, ils battirent aussitôt des ailes. L'autopsie montra que le sang était extravasé dans les muscles, et les intestins refoulés vers le bassin. — Achard, ayant fait passer le courant d'un seul couple d'une extrémité à l'autre du tube intestinal, éprouva des douleurs dans le bas-ventre ; l'énergie de l'estomac fut augmentée, et des changements furent produits dans les évacuations alvines. Ces résultats,

vérifiés par de Humboldt, lui suggérèrent l'expérience suivante : Une linotte était près d'expirer ; il introduisit une lame de zinc dans le bec, une lame d'argent dans le rectum, et établit une communication métallique entre ces deux lames : l'oiseau ouvrit les yeux, battit des ailes, respira pendant 6 à 8 minutes, et mourut ensuite tranquillement.

Ure, après avoir reproduit sur un cadavre les mouvements de la respiration (1914), pensa que l'on pourrait, au moyen de l'électricité, ranimer les personnes asphyxiées. Aldini avait fait des essais sur des chiens et autres animaux noyés ou asphyxiés par des gaz, et avait pu les rappeler à la vie, en faisant passer un courant de la bouche au rectum. Pouillet, Magendie, Andral et Roulin ont fait des expériences analogues : des cochons d'Inde asphyxiés, ne donnant plus signe de vie depuis une demi-heure, furent ranimés, et, la respiration étant rétablie, le cœur se contracta et la circulation reprit son cours.

Le Dr Wilson Philip, en 1816, ayant fait une incision au cou d'un lapin vivant, coupa les nerfs de la 8<sup>e</sup> paire, qui vont à l'estomac. La respiration devint très-pénible, l'animal faisait des efforts pour vomir, et, au bout de quelques heures, on reconnut, en faisant l'autopsie, que du persil qui remplissait l'estomac n'avait pas été digéré, et que les poumons étaient dans un état de congestion manifeste. Chez un autre lapin qui avait subi le même traitement, on fit passer un courant assez faible à travers les parties inférieures des nerfs coupés : la respiration se fit facilement, les poumons ne furent pas congestionnés, et le persil fut trouvé aussi complètement digéré que chez des lapins qui n'avaient pas été mutilés. Des résultats semblables furent obtenus sur des chiens<sup>1</sup>.

Les courants peuvent modifier la nature des fluides de l'économie animale. De Humboldt, ayant posé une plaque d'argent sur un vésicatoire qu'il s'était fait appliquer derrière l'épaule, et ayant mis cette plaque en contact avec du zinc, observa une augmentation dans l'écoulement de l'humeur, accompagnée d'une vive cuisson. Cette humeur était tellement âcre, qu'elle laissait sur la peau des traces bleuâtres. — Matteucci, ayant mis entre les pôles d'une pile de 15 couples, deux points du péritoine mis à nu sur les côtés de l'abdomen d'un lapin, recueillit une humeur alcaline au pôle négatif, et acide au pôle positif. Il obtint des résultats semblables, par le même moyen, sur le foie ou les intestins mis à nu de divers animaux vivants. Il conclut de là qu'il y a analogie entre le mécanisme des sécrétions et les décompositions électro-chimiques avec transport des éléments.

Les courants peuvent aussi modifier les liquides organiques : Brandt a reconnu que l'albumine d'un œuf se coagule au pôle positif ; et Brugnatelli, que le sang est coagulé quand il est traversé par un courant. — M. I. Petrequin a appliqué cette dernière propriété à la guérison, sans opération sanglante, de certaines tumeurs anévrismales, en y coagulant le sang au moyen d'un courant passant

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 341, et t. XXII, p. 216.

par des aiguilles d'acier enfoncées dans la tumeur. On a reconnu depuis qu'il est préférable d'enfoncer seulement l'aiguille positive, en faisant communiquer le pôle négatif avec l'extérieur de la tumeur.

**1923. De l'électricité animale.** — Les physiologistes ont admis l'existence d'un agent, désigné souvent sous le nom de *fluide nerveux*, qui transmet du cerveau, siège de la volonté, aux différents organes, l'excitation nécessaire à l'accomplissement de leurs fonctions. Or il résulte des détails qui précèdent, que les courants électriques, interrompus ou continus, sont capables de produire dans les organes des animaux, des effets analogues à ceux que produit l'influence nerveuse : contractions, sensations, sécrétions, mouvements du cœur et de la respiration, rétablissement des fonctions de l'estomac, des intestins, des organes de sécrétion. L'électricité agissant ainsi de la même manière que le fluide nerveux, on est porté à croire que ce dernier n'est autre que l'électricité, qui serait lancée, par l'acte de la volonté, à travers le système nerveux, dans la direction où l'effet doit être produit. Cependant, un courant continu circulerait dans le système ganglionnaire, pour produire les phénomènes de la vie organique ; comme les pulsations du cœur, les mouvements qui accompagnent la respiration et la digestion, le transport des fluides à travers les tissus. La surexcitation du cerveau par différentes causes, comme la peur, la colère, l'enthousiasme, donnerait lieu à une production surabondante d'électricité ; alors les mouvements du cœur et de la respiration sont accélérés, et les contractions musculaires peuvent se faire avec une énergie inusitée. Un exercice prolongé, sous l'influence d'une température élevée, peut aussi augmenter la sécrétion du fluide cérébral ; si, ensuite, on se livre au sommeil, l'organe surexcité continuant à produire beaucoup de fluide, et ce fluide n'étant plus utilisé, il s'accumule, et il peut en résulter des décharges intérieures, accompagnées de commotions quelquefois pénibles.

L'identité du fluide nerveux et de l'électricité, tantôt admise, tantôt repoussée par les physiciens et les physiologistes, se confirme de plus en plus, à mesure que la science fait des progrès ; elle a acquis un degré de vraisemblance de plus, le jour où l'on est parvenu à dériver à l'extérieur une partie de l'électricité du corps des animaux (1900). L'objection qu'on lui a opposée le plus souvent est que l'influence nerveuse se transmet beaucoup plus lentement que l'électricité, qui peut franchir plus de 100,000 lieues par seconde ; mais cette excessive vitesse ne se montre que dans les fils métalliques. Elle est beaucoup plus faible dans les conducteurs imparfaits, et des expériences directes faites par le procédé graphique (1, 594), sur le temps qui s'écoule entre l'introduction d'un courant dans un nerf et la contraction musculaire produite, ont montré que la vitesse de l'électricité dans les nerfs n'est que de 30<sup>m</sup> par seconde, plus grande que dans un fil de coton mouillé.

**1924. Applications diverses.** — L'action des courants sur les muscles a été employée pour étudier le rôle spécial de la plupart d'entre eux. Par exemple, M. Duchenne, de Boulogne, après avoir reconnu qu'on peut faire contracter



séparément les divers muscles de la face, au moyen d'un courant, a étudié le rôle de chacun d'eux dans les modifications qu'elle éprouve quand elle exprime les différents états de l'âme : joie, tristesse, colère... ; et, après avoir produit, au moyen du courant, ces diverses expressions, il a eu soin d'en conserver les images par la photographie. Il opérait tantôt sur le cadavre, tantôt sur la face inerte d'un vieillard peu intelligent ; et il a pu établir des règles assez sûres pour reconnaître que certains plis qui se voient au front du Laocoon et du rémouleur antique, sont en contradiction avec la réalité, ces plis ne pouvant exister simultanément comme les a représentés l'artiste.

**Électrothérapie.** — On a cherché à tirer parti des effets variés que l'électricité produit sur les organes, pour guérir diverses maladies. Les premiers essais à cet égard sont dus à Nollet, Jallabert, en 1740, Sans, Bertholon, Sigaud-Lafond... parvinrent à guérir des paralysies. On employait alors la commotion de la bouteille, des séries d'étincelles, des aigrettes jaillissant de pointes, ou enfin on administrait le *bain électrique*, c'est-à-dire qu'on chargeait d'électricité, le malade préalablement isolé. D'abord, on opéra sans méthode, à peu près au hasard ; aussi, des échecs multipliés firent-ils douter de la réalité des succès obtenus. Le charlatanisme vint ensuite jeter le discrédit sur l'*électrothérapie*. Les découvertes de Galvani et de Volta lui rendirent une certaine vogue. On put, au moyen de la pile, diriger le courant spécialement à travers les organes malades ; on commença à étudier son mode d'action, et l'on obtint des résultats plus constants. On réussit assez souvent aujourd'hui à rétablir les fonctions vitales dans des membres paralysés, au moyen de commotions répétées ; à guérir des névralgies, des rhumatismes... Nous avons vu comment on peut ranimer des animaux asphyxiés (1922), et cette application mériterait d'être étudiée de nouveau.

Il y a aujourd'hui deux moyens principaux d'employer l'électricité : 1<sup>o</sup> quand on veut exciter les organes, comme dans les cas de paralysie, on fait passer par intermittences, afin d'obtenir des commotions, le courant d'une machine de Holtz, d'une pile et surtout d'appareils d'*induction*, que nous décrirons plus tard, qui permettent de modifier à volonté la rapidité des secousses et leur intensité. Pour diriger les courants, on termine les rhéophores par des plaques de métal, par des éponges imbibées d'eau salée, ou encore par des brosses ou des pinces métalliques, que l'on applique sur les régions par lesquelles on veut faire entrer ou sortir le courant. Souvent aussi, on emploie la *galvano-puncture*, c'est-à-dire qu'on enfonce des aiguilles d'acier dans les muscles, de manière à conduire l'électricité en un point voisin du nerf sur lequel on veut agir. On s'est servi avec avantage du courant intermittent, pour rappeler à la vie des personnes qui avaient été soumises trop longtemps à l'action de l'*éther* ou du *chloroforme* ; pour constater la mort, la contractibilité des muscles disparaissant avec la vie.

2<sup>o</sup> On fait passer le courant d'une manière continue : par exemple, quand on veut diminuer l'irritabilité des nerfs, dans certaines affections nerveuses. Nobili

à employé ce mode d'électrisation pour combattre le tétanos. M. Menneton, en décembre 1877, a pu suspendre les convulsions de la rage, par le passage d'un courant entre la nuque et la plante du pied. Le courant continu agit encore pour modifier les sécrétions, favoriser les déplacements de fluides, dénaturer les plaies en produisant des décompositions chimiques : c'est ainsi que Becquerel et Breschet ont pu détruire la nature alcaline des humeurs sécrétées par un ulcère rebelle, en le faisant communiquer avec le pôle positif d'une pile.

**Chaines galvaniques.** — On a imaginé, pour les usages médicaux, des piles en forme de chaines, qui peuvent s'appliquer sur différentes parties du corps. Nous citerons celles de M. Pulver-Macher (*fig. 1341*) : chaque couple est formé d'un cylindre de bois aplati *ca*, sur lequel sont enroulés en hélice un fil de zinc et un fil de cuivre, engagés dans des sillons de manière à ne pas se toucher. Le fil de zinc communique avec le fil de cuivre du couple voisin. Ces couples sont articulés entre eux, comme on le voit à part en AB et en *ca*, et disposés en large comme en *ca*, ou en long comme en AB. On applique la

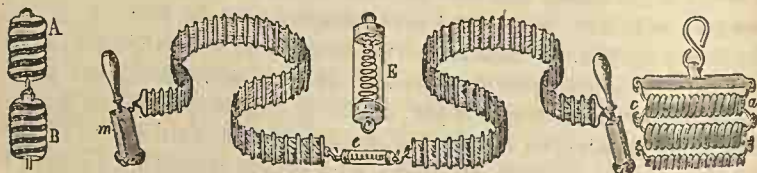


Fig. 1341.

chaîne sur la peau, de manière que la partie malade soit comprise entre ses deux extrémités, après l'avoir trempée dans du vinaigre étendu d'eau ou même sans préparation, la transpiration de la peau suffisant pour la mettre en activité. Pour obtenir des commotions, on emploie le *modificateur*, boîte à manche isolant, *m*, dans laquelle un mouvement d'horlogerie fait tourner un roue dont une dent vient, à chaque tour, fermer un instant le circuit, en touchant un petit ressort. Quand la chaîne est appliquée sur le corps, on peut obtenir de légères commotions au moyen du *cylindre interrupteur*, E (*fig. 1341*) : Un tube de verre, terminé par des viroles métalliques par lesquelles il est accroché en *e* au milieu de la chaîne, contient un ressort en hélice fixé à l'une des viroles, et qui ferme le circuit quand son extrémité libre, munie d'un disque étoilé, vient toucher l'autre virole ; ce qui se produit au moindre mouvement du malade.

Nous n'entrerons pas dans plus de détails sur la manière d'appliquer l'électricité à la thérapeutique, sur l'efficacité des méthodes adoptées par les divers praticiens, sur les cas où elles peuvent être appliquées sans danger, et sur les précautions à prendre dans chacun de ces cas ; ce serait sortir de notre cadre ; nous nous contenterons donc de renvoyer aux ouvrages spéciaux.

## III. Effets de l'électricité sur les végétaux.

1925. Van-Marum, ayant fait passer de fortes décharges à travers des branches de différentes espèces d'euphorbes, reconnu qu'elles avaient perdu la propriété de chasser au dehors, quand on les coupait, le suc laiteux qu'elles contenaient; d'où il conclut que le passage de l'électricité avait détruit dans les vaisseaux la faculté de se contracter. — Giulio, de Turin, vit les feuilles de différentes espèces de *mimosa* se replier sur elles-mêmes quand il faisait passer à travers les branches, le courant d'une pile de 50 couples. Les feuilles se contractaient lentement et les unes après les autres, pendant le passage du courant, et non au moment où on l'introduisait. Un seul couple ne produit aucun effet, même sur la *mimosa sensitiva*, qui se contracte le plus facilement.

Il résulte d'expériences de Becquerel et Dutrochet, que le mouvement circulaire de la sève dans les cellules du *chara*, est ralenti pendant le passage d'un courant suivant la longueur de la tige, quel qu'en soit le sens. Si le courant est assez fort pour arrêter le mouvement de la sève, ce mouvement se rétablit peu à peu; on l'arrête de nouveau en augmentant le nombre des couples, puis il reprend encore, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le courant soit assez fort pour arrêter le mouvement pendant plusieurs heures.

## 1926. Influence de l'électricité sur la germination et la végétation.

— L'électricité paraît influencer la germination. Nollet avait vu des graines humectées et électrisées germer avec rapidité, tandis que d'autres de même espèce placées dans les mêmes conditions, mais non électrisées, ne germaient pas. Ce phénomène a été étudié par Jallabert, Davy, et en dernier lieu par Becquerel<sup>1</sup>. Ce dernier physicien plaça une capsule de porcelaine entre deux capsules de platine en relation avec les pôles d'une auge de 30 couples faiblement chargés; les capsules étaient réunies par des mèches de coton mouillé, et contenaient de l'eau de Seine et du coton sur lequel étaient des graines de cresson alénois. La germination se fit également dans la capsule négative et dans la capsule de porcelaine, et fut très-lente dans la capsule positive. Le courant ayant été supprimé, la végétation continua dans les deux premières capsules et fut comme suspendue dans la dernière, dont l'eau avait une réaction acide, tandis que l'eau de la capsule négative était alcaline. Or, on sait que les acides nuisent à la végétation, et que les alcalis en petite quantité la favorisent. — Becquerel a encore disposé dans deux soucoupes, des doubles lames zinc et cuivre soudées par une de leurs faces; dans l'une des soucoupes, le zinc était en dessus, et dans l'autre il était en dessous. Une troisième soucoupe contenait une lame de verre au lieu du couple métallique. Toutes les trois contenaient de l'eau, du coton et des graines de cresson ou de pois ordinaires. Au bout de deux ou trois jours,

<sup>1</sup> Archives de botanique, t. 1, p. 395.

la végétation était la plus avancée sur le coton reposant sur le cuivre. Sur le zinc, les radicules semblaient fuir le métal, se contournaient, et les tiges cessaient bientôt de croître. On trouva sur la face cuivre une réaction alcaline, et l'on constata sur la face zinc la présence d'un sel de zinc nuisible à la végétation. Les résultats étaient encore plus marqués avec de l'eau contenant une petite quantité d'un sel à base terreuse ou alcaline. Il semble résulter de ces expériences que les courants agissent sur la germination, en décomposant les sels contenus dans l'eau, ou dans la graine : au pôle positif, les éléments acides nuisent à la végétation, tandis que les substances alcalines transportées au pôle négatif la favorisent.

On a généralement remarqué que la végétation est très-active par les temps d'orage, et l'on pouvait être tenté d'attribuer cet effet à la pluie et à la chaleur qui accompagnent les orages. Mais l'influence de l'électricité qui les caractérise est aujourd'hui évidente, depuis que M. Berthelot a montré le rôle des effluves électriques de l'atmosphère lors de la fixation de l'azote dans les végétaux ou dans les matières organiques servant d'engrais, où ils viennent ensuite le puiser (1789).

## § 2. — EFFETS CALORIFIQUES DES COURANTS

### I. Effets calorifiques dans les bons conducteurs.

**1927. Échauffement des fils métalliques.** — La pile de Volta venait à peine d'être découverte, qu'on chercha si la décharge de ses pôles pourrait, comme celle des batteries, faire fondre des fils métalliques. En juin 1801, Thénard et Hachette ayant fait communiquer les électrodes au moyen d'un fil métallique, le virent s'échauffer, rougir, fondre ou se volatiliser, suivant que ce fil était plus fin et plus court. Il est à remarquer que l'incandescence, quand il n'y a pas fusion, est constante pendant le passage du courant; ce qui renverse l'opinion que la décharge des batteries produirait la fusion en faisant jaillir la chaleur latente du corps par une compression brusque. Fourcroy, Vauquelin et Thénard ont reconnu que ces effets calorifiques dépendent surtout de l'étendue des couples de la pile, c'est-à-dire de la quantité d'électricité qui

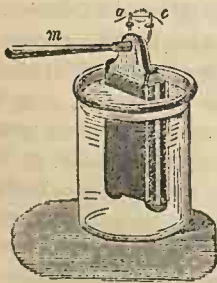


Fig. 1342.

traverse le fil. Cent couples à petite surface ne produisent que peu d'effet, tandis que quelques couples à grande surface en produisent de très-énergiques. Un seul couple peut même suffire pour faire rougir un fil très-fin. La figure 1342 représente un couple de Wollaston, disposé pour cette expérience; le fil *ac* est retenu par deux petites pinces de cuivre *a* et *c*, soudées

l'une à la lame de cuivre l'autre à la lame de zinc. Wollaston a pu, au moyen d'un couple de 7<sup>cm</sup> carrés formé avec un dé à coudre, fondre un fil de platine de  $\frac{1}{1000}$  mm de diamètre, et c'est cette expérience qui lui donna l'idée de la pile qui porte son nom (1821).

Davy ayant fait fondre des feuilles métalliques de différents métaux, observa qu'ils brûlent en faisant entendre une crépitation particulière, et en produisant des effets de coloration qui dépendent de leur oxydation par l'air. Le *platine* seul ne s'oxyde pas et fond en se disséminant en gouttelettes d'un blanc éclatant. L'*or* forme un oxyde brun, et brûle avec une flamme jaune; le *fer*, avec une lumière rouge; le *cuivre* la donne verte; l'*argent*, blanche au milieu et verte sur les bords; le *zinc*, bleue; le *plomb*, jaune et violette sur un bord; l'*étain*, pourpre. Ces expériences se font facilement au moyen de la disposition (fig. 1343) : deux colonnes métalliques, dont une communique avec un des pôles de la pile, soutiennent des fils horizontaux auxquels on suspend les feuilles métalliques, *f*, sur lesquelles on veut opérer, et dont on touche l'extrémité libre, avec une boule de platine *n* communiquant avec l'autre pôle de la pile. Le même appareil peut servir à opérer sur des fils de différente nature. Ces fils sont fixés à l'une des colonnes, au moyen d'une pince, et à l'autre, au moyen d'une cheville métallique qui peut s'enfoncer à volonté dans deux trous voisins, dont un est garni intérieurement d'une substance isolante. Les deux colonnes étant mises en communication avec les pôles de la pile, il suffit d'enfoncer la cheville d'un des fils dans le trou non isolé, pour que ce fil soit traversé par le courant.

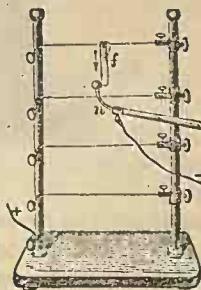


Fig. 1343.

Peltier a reconnu, au moyen de sa *pince thermo-électrique* (1897), que la température du fil est la même dans toute son étendue; excepté aux points de jonction avec les rhéophores, où elle est plus basse, à cause de l'absorption de chaleur par ces derniers; ou plus élevée, à cause d'un effet particulier qui se produit aux points de jonction, comme nous le verrons bientôt (1930).

Avec des batteries à très larges surfaces, on peut obtenir des effets d'une intensité remarquable. Children<sup>1</sup>, avec une pile de Wollaston de 21 couples, dont chaque zinc présentait 3,60 mètres carrés de surface, a pu fondre des tiges de platine de 70<sup>mm</sup> de longueur et de 5<sup>mm</sup> de diamètre. Les piles à charbon permettent aujourd'hui de faire ces expériences avec facilité. Avec 50 couples, on peut faire brûler deux aiguilles d'acier à tricoter, et les voir jaillir en étincelles brillantes, en les fixant aux électrodes et rapprochant leurs extrémités.

**1928. Applications diverses.** — Au moyen d'un fil de platine que l'on rend incandescent à l'extrémité de la *sonde électrique*, on cautérise les parties

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Sciences et arts), t. I (1816), p. 109.

profondes où l'on ne pourrait pas introduire un fer rouge ; on opère, sans hémorrhagie, l'ablation de tumeurs, de loupes, en les enveloppant à la base d'une anse de platine incandescent que l'on rétrécit peu à peu. On a pu même amputer la cuisse à des lapins, sans aucune effusion de sang. On est surtout frappé de l'innocuité des opérations pratiquées par cette méthode, désignée généralement sous le nom d'*électro-caustique*. La pile secondaire de M. Planté (1866) est surtout précieuse pour ces sortes d'applications, étant toujours prête à servir et pouvant être portée toute chargée auprès du malade.

On a eu l'idée, en Amérique, de couper les arbres au moyen d'un fort fil de

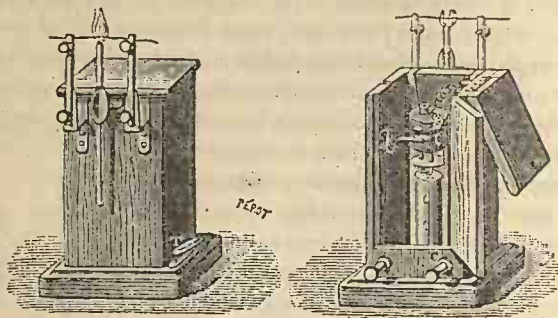


Fig. 1344.

platine porté au rouge-blanc au moyen d'un courant, et que l'on appuie sur le tronc, en exécutant le mouvement d'une scie. On assure que l'arbre est coupé en 5 fois moins de temps, et sans fatigue.

**Allumoirs électriques.** — M. G. Planté a imaginé sous le nom de *briquet de Saturne*, un petit appareil dans lequel une bougie est allumée (fig. 1344) par un fil de platine rendu incandescent au moyen d'un courant intense. Ce courant est fourni par un couple secondaire à lame de plomb (1866) que l'on voit à droite de la figure, où la boîte qui le contient est représentée ouverte ; au bas sont deux bornes auxquelles on ajuste les rhéophores d'une pile Callaud, dont on voit la disposition (fig. 1307), et qui sert à charger le couple secondaire. Le circuit du fil de platine est habituellement ouvert ; on le ferme, pour faire rougir ce fil, en appuyant sur un ressort latéral T (fig. 1344). On peut allumer la bougie une centaine de fois, sans avoir besoin de recharger le couple.

Depuis, MM. Voisin et Dronier ont construit un allumoir dans lequel le couple secondaire est remplacé par un couple à *bichromate de potasse* (1823) dont le zinc est soulevé hors du liquide par un ressort à boudin qui enveloppe la tige à laquelle il est fixé. Quand on abaisse cette tige, il se produit un courant, trop faible pour faire rougir le fil de platine. Mais comme ce fil traverse les vapeurs de la mèche d'une lampe à essence de pétrole, il rougit, par un effet semblable à celui de la lampe sans flamme (II, 1293), et met le feu à la mèche.

Becquerel a produit des températures très-élevées, pour obtenir des fusions,

en faisant passer un courant dans des fils de platine enroulés en hélice conique, dont les spires, voisines mais ne se touchant pas, se préservent mutuellement du refroidissement. De petits creusets en charbon, platine, porcelaine..., placés dans l'hélice, reçoivent des substances à fondre. On augmente l'effet en enveloppant le creuset d'une flamme d'alcool. L'appareil est recouvert d'une cloche, de manière qu'on puisse opérer dans le vide et dans différents gaz.

On a fait de nombreux essais pour appliquer à l'éclairage, la lumière de baguettes de platine ou de charbon de cornue rendues incandescentes par le passage d'un courant. Plusieurs appareils, nommés *lampes à incandescence*, ont été proposés pour cet usage; nous y reviendrons quand nous traiterons de l'éclairage par l'électricité.

**1929. Circonstances dont dépend l'échauffement.** — 1° L'échauffement d'un même fil traversé par un courant augmente avec la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné, par conséquent avec l'étendue des couples de la pile. 2° Plus le fil est fin, court et mauvais conducteur, plus il s'échauffe. On voit facilement pourquoi un fil fin rougit mieux qu'un fil plus gros; c'est qu'il passe plus d'électricité par chaque point du premier. — La longueur n'a d'influence qu'en augmentant la résistance que le courant éprouve en parcourant le fil, dont la section est beaucoup plus petite que celle des rhéophores, ce qui fait qu'une plus grande portion des électricités se recombinaut à travers la pile (1846), le fil est parcouru par un courant plus faible. Mais si l'on a soin de laisser à ce dernier toujours la même intensité, en faisant varier le nombre des couples ou la longueur de quelque autre partie du circuit, on obtient le même échauffement. Nous avons vu qu'il en est de même dans la fusion des fils par la décharge des batteries (1710).

L'influence de la résistance du fil est évidente dans l'expérience suivante, faite par Children à l'instigation de Wollaston : il réunit les électrodes de sa grande pile, par deux fils de même longueur et de même substance, mais de diamètre différent; le courant ne passa qu'en faible proportion dans le fil le plus fin, et le plus gros devint seul incandescent; tandis que le plus fin rougit seul quand les deux fils furent placés l'un à la suite de l'autre.

Pour montrer l'influence de la conductibilité, Children fit passer le courant à travers des fils métalliques de même longueur (21<sup>cm</sup>) et de même diamètre (0<sup>mm</sup>,75) soudés deux à deux par le bout. L'un des fils fondait ou rougissait, pendant que l'autre ne changeait pas d'aspect. De La Rive a répété ces expériences, et est arrivé aux résultats suivants :

No change pas d'aspect :	Rougit à blanc :	Fond :
Or, argent, zinc ou cuivre. . . . .	Platine.	»
Argent. . . . .	Or.	»
Platine. . . . .	Fer.	»
Zinc ou cuivre. . . . .	»	Fer.
Argent. . . . .	»	Zinc.

Des deux métaux, c'est celui qui est le meilleur conducteur qui reste obscur.

D'après ces faits, de La Rive admet que l'échauffement des fils est dû à la difficulté qu'éprouve l'électricité à passer d'une molécule à la suivante, après la décomposition électrique polaire qui se fait dans chacune d'elles (1646). Nous avons déjà fait mention de cette résistance, en parlant des effets de la décharge des batteries (1707). D'après de La Rive, ce seraient les décharges intermoléculaires qui produiraient la chaleur; et il remarque à l'appui, que toute solution de continuité, où le courant éprouve une résistance, augmente l'échauffement. Ainsi, lorsque la pile n'est pas assez forte pour faire rougir les fils, l'incandescence peut avoir lieu aux points de jonction, même quand les fils réunis sont identiques.

Si l'on appuie sur un morceau de charbon conducteur, fixé à l'une des électrodes d'une pile de Wollaston de 10 couples seulement, le bout d'un fil de platine de  $\frac{1}{2}$  mm de diamètre attaché à l'autre électrode, la chaleur est si forte que l'extrémité du fil de platine fond comme du plomb, avec un éclat que l'œil peut à peine supporter, pendant que le reste du fil s'échauffe à peine. Si l'on approche le bout du fil de platine, de la surface du mercure contenu dans une capsule de platine fixée à l'un des rhéophores, la chaleur est tellement vive au point de contact, que le mercure se volatilise avec bruit et vive lumière, et en produisant un petit nuage blancâtre (fig. 1344). Dans cette expérience, comme dans la précédente, l'échauffement est augmenté par cette circonstance que l'électricité se resserre, pour passer par le petit nombre de points en contact avec le charbon ou le mercure.



Fig. 1344.

#### 1930. ÉCHAUFFEMENT DES SOUDURES SUIVANT LE SENS

**DU COURANT.** — Peltier a étudié les changements de température aux soudures des fils traversés par un courant, au moyen de sa pince thermo-électrique (fig. 1131), qu'il applique sur le point dont il veut reconnaître l'échauffement, en ayant soin d'interposer du papier très-mince, pour empêcher l'électricité de passer du fil dans la pince<sup>1</sup>. La figure 1345 représente l'ensemble de l'appareil. Le fil *mn* est fixé à deux colonnes métalliques en communication avec les pôles d'une pile *P*, dont le courant passe aussi par le rhéomètre *R*. La pince *ab* glisse sur une règle à crémaillère, quand on fait tourner le pignon denté *r*, et elle est en communication avec un second rhéomètre *R*.

Peltier a reconnu d'abord que le sens du courant a une influence sur l'échauffement des soudures. Ainsi, quand le courant passe d'un fil de cuivre dans un fil de fer, zinc, plomb ou étain, l'échauffement de la soudure est moins prononcé que lorsqu'il marche en sens inverse. Si l'on met un fil de zinc entre deux fils de cuivre, la soudure par laquelle le courant entre dans le zinc s'échauffe moins que l'autre. C'est là le phénomène que M. Le Roux désigne sous le nom d'*effet Peltier*.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LVI, p. 374.



**1931. Froid produit par un courant.** — Peltier a découvert ce fait très-remarquable, qu'un courant peut produire un refroidissement à la soudure de deux métaux dont un, au moins, est à structure cristalline. Par exemple, une lame de bismuth soudée bout à bout entre deux lames de cuivre, étant traversée par un faible courant donnant  $20^{\circ}$  au rhéomètre R' (fig. 1345), l'une des soudures s'échauffe, et l'autre se refroidit. Les résultats sont indiqués en *abc'* dans la figure 1346. Les nombres  $+20^{\circ}$ ,  $-10^{\circ}$ , écrits près des soudures, sont les déviations du rhéomètre R. Les résultats

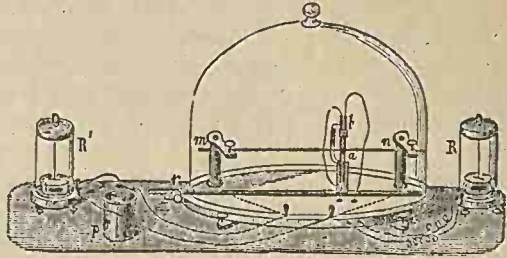


Fig. 1345.

sont inverses quand le bismuth est remplacé par l'antimoine; ils sont indiqués en *CAC'*. Quand le courant est trop fort, les deux soudures s'échauffent; mais celle qui se refroidissait s'échauffe toujours moins que l'autre. Enfin, si l'on soude la lame d'antimoine à la lame de bismuth, il y a refroidissement, indiqué par  $-45^{\circ}$  de déviation, quand le courant va du bismuth  $\beta$  à l'antimoine  $\alpha$ ; et échauffement, indiqué par  $+37^{\circ}$ , quand le courant marche en sens opposé.

La pince thermo-électrique enlevant ou cédant de la chaleur aux soudures, les valeurs numériques citées ne sont pas très-exactes. Peltier a alors évalué les températures au moyen d'un thermomètre à air (fig. 1347), dont le réservoir

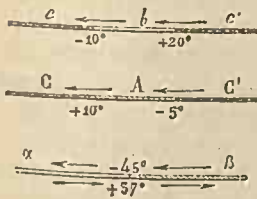


Fig. 1346.

était traversé par la lame, la soudure étant au centre. — Enfin, M. Lenz, ayant creusé une petite cavité dans la soudure réunissant deux baguettes de bismuth et d'antimoine portées à une température voisine de  $0^{\circ}$ , y mit une goutte d'eau, et la vit se con-

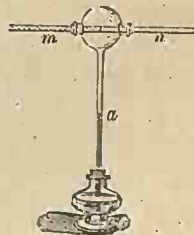


Fig. 1347.

geler pendant le passage d'un faible courant allant du bismuth à l'antimoine.

M. E. Becquerel, qui a répété et varié les expériences de Peltier, a obtenu un léger refroidissement, par le passage d'un très-faible courant, d'un fil de cuivre ou de platine dans un fil de fer.

**1932. Loi de l'échauffement des soudures.** — Cette loi a été trouvée par M. Quintus Icilius et par M. Frankenheim. La méthode suivie par le premier

donne des résultats indépendants de l'échauffement des fils hors des points de jonction<sup>1</sup>. Une bande de métal est soudée entre deux bandes d'un autre métal : quand on fait passer un courant, les deux soudures s'échauffent inégalement ; si ensuite, supprimant le courant, on met les extrémités de la bande en rapport avec un rhéomètre, on obtient un courant *thermo-électrique*, dont le sens et l'intensité font connaître quelle est la soudure la plus chaude, et de combien elle est plus chaude que l'autre. Pour rendre les résultats plus prononcés, M. Quintus Icilius, au lieu de trois lames seulement, a employé une pile thermo-électrique de 52 couples bismuth et antimoine, qu'il faisait traverser par le courant d'un couple de Bunsen, et qu'il mettait ensuite rapidement en rapport avec le rhéomètre. Mais, l'équilibre de température tendant à s'établir, le courant thermo-électrique diminuait rapidement, ce qui en rendait l'évaluation difficile. On tournait la difficulté en laissant osciller l'aiguille, et observant six positions extrêmes successives, d'où l'on déduisait, par une méthode de calcul de M. Weber, l'intensité du courant constant qui aurait donné deux positions extrêmes successives.

On a trouvé ainsi, très-sensiblement, que *la différence entre les élévations de température des soudures paires et impaires est proportionnelle à l'intensité, donnée par un rhéomètre, du courant voltaïque qui les a traversées*. Remarquons que ce courant était un peu modifié par le courant thermo-électrique développé par l'inégal échauffement des soudures. En effet, on a constaté que, si les deux soudures sont d'avance à des températures différentes, un courant tend à échauffer la plus froide et à refroidir la plus chaude ; ce qui doit affaiblir la différence des températures produites à ces soudures.

Il nous reste à trouver quelles sont les propriétés physiques des métaux associés d'où dépend la variation de température d'une soudure suivant le sens du courant. Peltier avait cru que l'échauffement était le plus faible quand le courant passait du métal le meilleur conducteur dans l'autre métal ; mais M. E. Becquerel a montré qu'il n'en est pas ainsi, et est arrivé à la loi suivante :

*Il y a une relation entre les résultats et le sens du courant thermo-électrique qu'on obtiendrait en chauffant faiblement la soudure : si le sens de ce courant est le même que celui du courant voltaïque qui traverse la soudure, l'échauffement est le moins fort ; il peut même être remplacé par un refroidissement<sup>2</sup>. Par exemple, si l'on chauffe la soudure de deux barreaux de bismuth et d'antimoine, on a un courant thermo-électrique qui va du bismuth à l'antimoine à travers la soudure (1882) ; et, si l'on fait passer à travers ces barreaux un faible courant allant aussi du bismuth à l'antimoine, la soudure se refroidit.*

Matteucci a reconnu que si l'on chauffe le point de jonction de deux tiges prises dans un cristal cubique de bismuth, l'une perpendiculaire au plan du clivage principal, l'autre parallèlement, on obtient un courant thermo-

<sup>1</sup> Ann. de Poggendorff, t. LXXXIX, et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. XXXIX, p. 249.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XX, p. 56.

électrique allant de la première à la seconde par le point de jonction ; or si l'on fait passer un courant voltaïque dans le même sens, il y a refroidissement au contact.

**1933. Phénomènes électro-thermiques.** — Peu après la découverte de l'effet Peltier (1930), on a cherché à appliquer ce phénomène à l'explication de l'origine des courants *thermo-électriques* (1895), au point de vue de la thermodynamique. M. E. Becquerel, après avoir énoncé la loi ci-dessus, remarque, comme conséquence, que, si l'on chauffe une soudure d'un circuit de deux métaux, le courant produit doit échauffer la soudure froide, et refroidir la soudure chaude, qui absorbe ainsi une partie de la chaleur de la source servant à l'échauffer ; et *cette chaleur est transformée en électricité*.

M. W. Thomson, qui s'est beaucoup occupé de ces phénomènes, a déduit de certaines considérations théoriques, que l'effet calorifique produit par un courant dans un circuit *d'un seul métal* dont la température n'est pas la même partout, dépend du sens du courant<sup>1</sup>. Ce phénomène, que M. Le Roux appelle *effet Thomson* ou *phénomène électro-thermique*, a été vérifié depuis par l'expérience : M. Thomson prend un paquet de bandes métalliques serrées en deux endroits autour des réservoirs de deux thermomètres ; dans l'espace compris entre ces réservoirs, les bandes sont écartées les unes des autres et plongées dans de l'eau à 100°. En dehors des thermomètres, elles sont aussi écartées et entourées d'eau froide. Quand on fait passer un fort courant par ces bandes, les deux thermomètres montent inégalement, et la différence entre leurs indications varie (de 1°,76 à 1°,97 pour le fer), quand le courant change de sens. Le thermomètre le plus élevé est, pour le *fer* et le *platine*, du côté par où sort le courant quand la différence est la plus faible. M. Thomson exprime les résultats en disant qu'il y a *transport électrique de chaleur* dans le sens opposé à celui du courant. Le *cuivre* donne des résultats inverses.

M. Leroux<sup>2</sup> a fait une étude suivie des phénomènes électro-thermiques, sur l'existence desquels il pouvait rester quelques doutes. Il procédait de la manière suivante : deux barreaux droits, identiques et parallèles, s'enfoncent horizontalement, par un bout, dans la paroi d'un vase plein de mercure à 0°, et, par l'autre bout, dans un bain à 100°. La pile d'un thermo-multiplicateur est placée entre ces barreaux, ses deux bases touchant leurs milieux, dont on peut ainsi évaluer la différence de température. Le courant d'une pile de Bunsen à grande surface parcourt les barreaux en allant, dans l'un, du chaud au froid, et, dans l'autre, du froid au chaud ; de manière que l'effet calorifique indiqué par le thermo-multiplicateur, est double de l'effet produit sur chaque barreau ; et, quand on reverse le courant, la différence observée représente le quadruple de l'effet produit par le transport électrique.

M. Le Roux a d'abord reconnu que *l'effet est proportionnel à l'intensité du*

<sup>1</sup> *Trans. phil.* (1856), p. 649, et *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIV, p. 105.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. X, p. 258.

*courant*. Il a ensuite comparé les *pouvoirs électro-thermiques* relatifs de 16 métaux. Voici quelques résultats :

<i>Antimoine.</i>	<i>Zinc.</i>	<i>Argent.</i>	<i>Cuivre.</i>	<i>Laiton.</i>	<i>Platine.</i>	<i>Bismuth pur.</i>
+ 64	+ 11	+ 6	+ 2	+ 0,3	- 18	- 31

Le pouvoir du plomb est sensiblement nul. L'unité est arbitraire, et le signe (+) indique que le transport de la chaleur se fait dans le sens du courant, et le signe (—), qu'il se fait en sens contraire.

Les phénomènes électro-thermiques semblent dépendre d'une différence de structure que la chaleur déterminerait entre les deux parties inégalement échauffées du fil. On les a aussi invoqués pour expliquer les inversions, découvertes par M. Cumming, dans les courants thermo-électriques, quand on élève suffisamment la température de la soudure chaude (1929).

**1934. LOIS DE L'ÉCHAUFFEMENT DES FILS HOMOGÈNES.** — Nous avons vu (1929) que l'échauffement des fils métalliques dépend : 1° de la conductibilité électrique et des dimensions de ces fils ; 2° de l'intensité du courant. Les premières recherches destinées à comparer l'élévation de température à l'intensité du courant ont été faites par A. de La Rive<sup>1</sup>. Il mesurait l'échauffement, qui n'allait pas jusqu'à l'incandescence, soit au moyen d'un thermomètre à air dont le fil traversait le réservoir, comme dans la figure 1347, soit au moyen d'une espèce de pyromètre vertical dont le fil laissait descendre un levier en se dilatant, soit au moyen d'un thermomètre de Breguet (II, 1006), dont le courant traversait l'hélice métallique constituant le fil à échauffer, et dont l'aiguille horizontale portait en son milieu une petite tige verticale plongeant dans une cavité pleine de mercure. Pour faire varier l'intensité du courant, de La Rive le faisait passer à travers une colonne d'acide nitrique concentré renfermée dans une auge de verre, et dont il augmentait à volonté la résistance, au moyen de diaphragmes de platine. L'intensité du courant était donnée par un rhéomètre placé dans le circuit. Voici quelques résultats :

<i>Nombre de diaphragmes.</i>	1	2	3	4	5	6
<i>Rhéomètre.....</i>	85°	84	83	75	40	37
<i>Élévation de température.</i>	312°	170	115	12	0	0

En plaçant un voltamètre à eau (1828) dans le circuit, de La Rive a trouvé que le temps pendant lequel il obtenait un certain volume de gaz était de 5<sup>s</sup> et de 25<sup>s</sup>, et les élévations de température de 38° et 3°, quand il n'y avait pas de diaphragme et quand il y en avait un. On voit donc que l'élévation de température diminue bien plus rapidement que l'intensité du courant, soit qu'on évalue cette intensité par le rhéomètre, soit par la quantité d'eau décomposée en un temps donné ; mais la loi de cette diminution restait à trouver.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XL, p. 374.

Peltier a aussi cherché les lois de l'échauffement des fils, au moyen de sa pince thermo-électrique, mais sans succès, cet instrument enlevant de la chaleur au point touché. Ces lois ont été découvertes par M. Joule<sup>1</sup>, puis confirmées par MM. Lenz, E. Becquerel, Botto. En voici d'abord l'énoncé :

**1835. Lois de Joule.** — *Quand un courant traverse un fil métallique homogène, LA QUANTITÉ DE CHALEUR dégagée dans l'unité de temps est proportionnelle : 1° à la résistance que ce fil oppose au passage de l'électricité ; 2° au carré de l'intensité du courant, cette intensité étant mesurée par la quantité d'eau que peut décomposer le courant pendant l'unité de temps. La quantité de chaleur  $q$  dégagée pendant cette unité est donc donnée par la formule*

$$q = kri^2,$$

dans laquelle  $r$  est la résistance,  $i$  l'intensité du courant, et  $k$  une constante.

M. Joule faisait passer le courant dans un fil de cuivre qui s'enroulait en hélice autour d'un tube de verre plongé dans l'eau d'un petit calorimètre. Le liquide, peu conducteur, empêchait le courant de sauter d'une spire à l'autre. La chaleur dégagée dans un temps donné était calculée en calories, et la quantité d'électricité qui avait traversé le fil était évaluée en prenant pour unité la quantité d'électricité capable de décomposer, en une heure, 100 grains d'eau. Le courant constant capable de fournir cette quantité déviait le rhéomètre de 33°,5 ; de sorte que la déviation permettait de calculer, en fonction de cette unité, la quantité d'électricité passée en un temps donné.

Pour vérifier la première loi, M. Joule faisait passer le courant, simultanément dans les deux fils qu'il voulait comparer ; ces fils, de même longueur, plongeaient dans deux calorimètres identiques. Il trouva ainsi, que le rapport entre les élévations de température des calorimètres était égal au rapport des résistances. Les principales expériences ont été faites avec deux fils de cuivre de différent diamètre, un fil de cuivre et un fil de fer, un fil de cuivre et une spirale de mercure introduit dans un tube capillaire contourné.

M. Lenz plongeait le fil dans de l'alcool, qui est moins conducteur que l'eau, et mesurait le temps employé à échauffer ce liquide, de 1°. La force du courant, donnée par un rhéomètre, était modifiée à volonté par l'introduction dans le circuit, de fils de platine plus ou moins longs. Le produit de la résistance de chaque fil, par le temps employé à chauffer l'alcool, de 1°, s'est trouvé le même pour le même courant, ce qui vérifie la première loi. Les temps se sont aussi trouvés, pour un même fil et divers courants, en raison inverse des carrés des intensités de ces derniers ; d'où l'on conclut la deuxième loi. Les expériences ont été faites sur divers fils d'argentan, et sur des fils de platine, fer ou cuivre.

La figure 1348 représente l'appareil qu'employait M. E. Becquerel<sup>2</sup>. Le calorimètre,  $cc$ , en cuivre mince, et de 2<sup>cm</sup>,5 de hauteur, reçoit le fil métallique,

<sup>1</sup> Archives de l'électricité de M. A. de La Rive, t. II, p. 54, et t. V, p. 353.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. IX, p. 40.

qui y pénètre par des tubes de verre  $o, o'$ , et est enroulé autour d'une hélice de verre, représentée à part en S. La quantité d'électricité écoulée dans un temps donné est évaluée au moyen du nombre de centimètres cubes d'oxygène et d'hydrogène recueillis dans un voltamètre V, à une seule éprouvette. Un thermomètre plongé dans l'eau d'un vase de cuivre,  $v$ , donne la température de l'air. Le vase  $v$ , et le calorimètre, sont entourés de boîtes de carton, et les tubes à mercure  $n$ , servent à établir les communications.

Pour déterminer les quantités de chaleur dégagées en un temps donné, on attendait que la perte de chaleur à l'extérieur fût égale à chaque instant à la chaleur reçue, c'est-à-dire que la température du calorimètre fût stationnaire. On calculait alors la chaleur perdue, par la méthode employée par Delaroché et Bérard dans la mesure des chaleurs spécifiques des gaz (II, 1062).

Indépendamment des lois énoncées ci-dessus, M. E. Becquerel a aussi vérifié ce résultat (1927), que l'échauffement est le même dans tous les points d'un fil

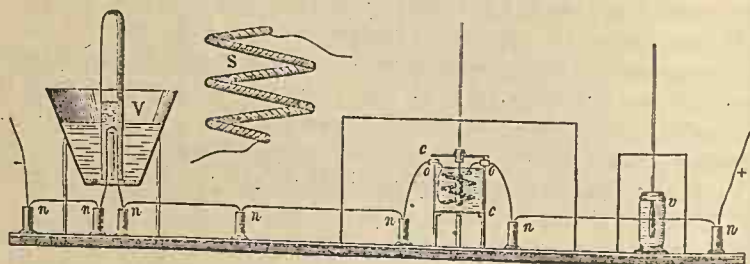


Fig. 1348.

cylindrique, quelle que soit sa longueur, pourvu que le courant qui le traverse ait toujours la même intensité. Il a enfin trouvé que l'élévation de température est, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre du fil. On voit que ces quatre lois sont précisément celles qui ont été trouvées par M. Riess pour l'échauffement produit par la décharge des batteries (1710). Il faut remarquer cependant que l'effet de celles-ci ne dépend pas seulement de la quantité d'électricité qui traverse le fil, mais aussi de la surface armée de la batterie qui contient cette électricité (1709).

Remarquons encore que la différence d'échauffement de deux soudures étant proportionnelle à l'intensité du courant (1932), tandis que les fils s'échauffent proportionnellement au carré de cette intensité, les variations de température aux soudures seront d'autant moins distinctes, que le courant sera plus intense; il faut donc employer de faibles courants, pour les observer.

Nous ajouterons enfin que Clausius, en partant des calculs de M. Kirchhoff, est parvenu à rattacher, au moyen de l'analyse mathématique, les lois de Joule aux principes de la théorie mécanique de la chaleur; car il a trouvé pour l'expression de la chaleur,  $C$ , dégagée par le passage d'un courant d'intensité  $I$ ,

dans un fil de résistance  $r$ , la formule  $C = Ar^2$ , dans laquelle  $A$  représente l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur (II, 1332)<sup>1</sup>.

Nous avons vu plus haut le parti qu'on a tiré des lois de Joule, dans la calorimétrie (II, 1062).

**1936. Influence du milieu sur l'échauffement des fils.** — Quand on plonge dans l'eau, un fil parcouru par un courant capable de le faire rougir, il cesse d'être incandescent. Il est naturel d'expliquer ce résultat par le refroidissement dû au contact de l'eau; cependant il y a une autre cause : c'est que le refroidissement diminue la résistance du fil, et que la chaleur l'augmente, comme nous le verrons plus loin, et nous savons que la résistance influe sur l'échauffement (1929). D'un autre côté, l'intensité du courant augmente lorsque la résistance diminue, rien n'étant changé au reste du circuit. Un fil plongé dans un milieu refroidissant prendra donc une température qui dépendra à la fois de ces deux causes, qui agissent en sens inverse. Davy a fait à ce sujet une expérience curieuse : pendant qu'un fil est porté au rouge cerise par le passage de l'électricité, on en refroidit la partie moyenne par un courant d'air ou par le contact d'eau ou de glace; on voit aussitôt le reste du fil devenir rouge-blanc et même fondre : c'est que le courant est devenu plus intense, la résistance de la partie refroidie ayant diminué. Si, au contraire, on fait rougir à blanc le milieu du fil au moyen d'une flamme, les parties extrêmes deviennent obscures.

L'expérience suivante, de M. Romney-Robinson, montre bien l'opposition entre les effets de l'augmentation du courant et de l'accroissement de résistance du fil par la chaleur : on fit passer un courant pendant 12 minutes, dans un fil de platine  $f$  (fig. 1349) recouvert d'une éprouvette  $e$ , pleine d'air et entourée d'eau. Ce fil devint rouge-blanc, et l'eau s'échauffa de  $3^{\circ},05$ . L'appareil ayant été refroidi, on introduisit une partie de l'eau dans l'éprouvette; alors, sous l'influence du courant, l'eau s'échauffa, dans le même temps, de  $46^{\circ},22$ ; mais le courant avait doublé d'intensité, à cause de la moindre résistance du fil  $f$ , qui resta obscur. — Dans une autre expérience, le courant fut ramené à son intensité primitive par l'introduction dans le circuit, d'un fil de platine de longueur convenable; l'eau ne s'échauffa plus que de  $1^{\circ},65$ , la résistance du fil refroidi étant très-faible. Cette expérience montre aussi que la loi de l'échauffement relative à la résistance du fil doit s'appliquer à la résistance qu'il présente pendant qu'il est échauffé par le courant, et non à celle qu'il possédait avant l'expérience.

**1937. Influence des gaz.** — Nous avons vu (II, 978) qu'un fil métallique

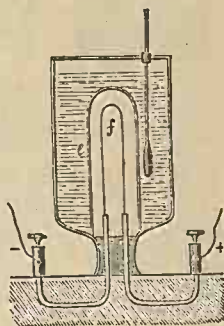


Fig. 1349.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 122.

rendu incandescent par un courant, perd immédiatement son incandescence, quand on le plonge dans du gaz hydrogène. Grove, puis Poggendorff, ont attribué ce phénomène au refroidissement du fil par le contact du gaz, qui possède un plus grand pouvoir refroidissant que l'air; le fil refroidi devient donc meilleur conducteur, et le courant, quoique plus intense, ne peut plus le faire rougir.

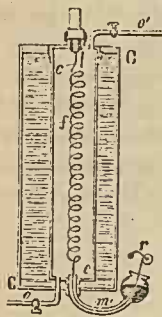


Fig. 1350.

Viard<sup>1</sup> a démontré l'exactitude de cette explication, en faisant voir que la quantité de chaleur dégagée est la même dans divers gaz, quand on fait en sorte que la résistance du fil ne varie pas. Le fil, *f* (fig. 1350), plié en hélice, traverse un tube de cuivre, *cc*, que l'on remplit d'hydrogène par les tubes *o*, *o'*; son extrémité supérieure est soudée à un bouchon isolé; l'autre passe dans un tube plein de mercure *m*, de façon que, en la tirant en *r*, on puisse diminuer la longueur de la partie *f* contenue dans le tube *cc*. Le tout est plongé dans un calorimètre *CC*. Le courant se divise en deux parties: l'une traverse le mercure *m* et le fil à échauffer *f*, et circule ensuite dans l'un des fils d'un rhéomètre différentiel (1831), dont l'autre partie du courant parcourt en sens contraire le second fil; on fait en sorte, en donnant plus ou moins de longueur à cette seconde partie du circuit, que l'aiguille du rhéomètre reste au zéro. Dans une autre expérience, on remplace l'hydrogène par un gaz différent; la résistance du fil, moins refroidi, est plus grande, et l'aiguille du rhéomètre obéit à l'action prépondérante de la seconde partie du circuit. Alors, en tirant en *r* le fil à échauffer, on diminue la longueur de la partie *f*, et sa résistance devient moindre. Quand on a ramené, par ce moyen, l'aiguille au zéro, la résistance est la même que lorsque le fil était entouré d'hydrogène. En opérant ainsi, Viard a reconnu que l'échauffement du calorimètre est le même pendant le même temps, quel que soit le gaz contenu dans le tube de cuivre.

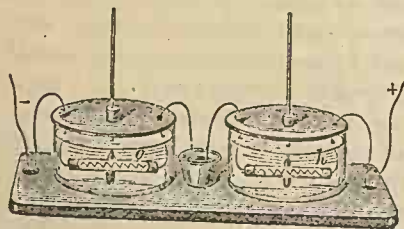


Fig. 1351.

passent des fils égaux en platine tournés en hélice, de 0<sup>m</sup><sub>3</sub> de diamètre et de 94<sup>m</sup><sub>m</sub> de longueur. Ces tubes étaient plongés dans des calorimètres séparés, contenant chacun 93<sup>gr</sup> d'eau, et les fils étaient parcourus par le même courant

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XLIII, p. 304.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIX, p. 497.



de 8 couples de Grove. Quand les gaz étaient l'oxygène, *o*, et l'hydrogène, *h*, le fil plongé en *o* devenait rouge-blanc, l'autre restant obscur. De plus, la température s'élevait, en 5 minutes, de 11°,7 dans le calorimètre *o*, et de 5°,6 seulement dans l'autre, la température initiale étant de 15°,5. La différence provenait de ce que le fil entouré d'hydrogène, se refroidissant plus que l'autre, présentait moins de résistance au courant et s'échauffait moins. Si l'on remplaçait l'oxygène par d'autres gaz, on trouvait des différences analogues. Le tableau suivant fait connaître les températures du calorimètre contenant le tube *o* rempli successivement de différents gaz, quand celui qui renfermait le tube à hydrogène *h* s'échauffait de 5°,5. Dans la troisième ligne, sont indiquées les quantités de gaz dégagées par minute dans un voltamètre introduit dans le circuit, quand le courant traversait seulement le tube *o* rempli successivement des différents gaz.

Acide sulfhydrique,	gaz oléfiant,	acide carbonique,	oxyde de carbone,	oxygène,	azote.
6°	9°,2	11°	11°	11°,7	12°
»	126	118,8	118,8	117	115

Quand le tube *o* était rempli d'hydrogène, le volume de gaz recueilli en une minute dans le voltamètre était représenté par 138,6.

On voit que les gaz qui refroidissent le plus le fil sont aussi ceux avec lesquels le courant a la plus grande intensité. La vapeur d'éther agit à peu près comme l'hydrogène. Dans le vide, le refroidissement est moindre que dans les gaz, et un fil de platine peut y rougir sous une plus grande longueur.

**1938. ÉCHAUFFEMENT DES LIQUIDES.** — Les liquides s'échauffent aussi pendant le passage d'un courant; mais le phénomène est compliqué par les effets calorifiques dus aux actions chimiques produites par l'électricité, et à la résistance qu'elle éprouve en passant des électrodes métalliques dans le liquide, ou réciproquement. L'influence des actions chimiques est évidente dans l'expérience suivante : Davy fixa aux électrodes d'une pile de 100 couples deux vases coniques en or réunis par une mèche d'amiant mouillée, l'un rempli d'eau pure, l'autre d'eau contenant un peu de sulfate de potasse. Cette dernière entra en ébullition au bout de 1 ou 2 minutes. Une goutte d'une solution d'azotate d'ammoniaque fit que l'eau disparut en vapeur en 3 ou 4 minutes, avec un grand bruit. — De La Rive prouve l'influence de la résistance au passage, en divisant la colonne liquide, par des cloisons membraneuses; elle s'échauffe alors beaucoup plus rapidement<sup>1</sup>. Des cloisons métalliques ne conviendraient pas, parce que l'eau décomposée donnerait sur chacune d'elles un dégagement de gaz accompagné d'une absorption de chaleur. Si le courant passe d'un vase à un autre par une mèche de coton mouillée, la mèche s'échauffe, tandis qu'un tube en siphon rempli d'eau, mis à sa place, ne s'échauffe pas sensiblement. — Une tige de plante grasse, formée de cellules remplies de sucs, convient

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XI, p. 378.

très-bien pour ces sortes d'expériences : au bout de peu de temps, on voit le liquide entrer en ébullition près des électrodes. Citons encore le résultat suivant : Ørsted, ayant fait passer un courant à travers une colonne d'eau, trouva la température de  $20^{\circ},5$  près du pôle négatif, de  $18^{\circ}$  près du pôle positif, et de  $23^{\circ}$  à égale distance de ces pôles ; résultat qu'explique le refroidissement que produit aux pôles, le dégagement des gaz hydrogène et oxygène.

**1939. Expériences de M. E. Becquerel.** — Malgré toutes ces complications, M. E. Becquerel est parvenu à constater que *l'échauffement des liquides par les courants suit les mêmes lois que celui des fils métalliques* (1935). L'appareil dont il s'est servi dans ces nouvelles expériences est disposé comme celui de la figure 1348 ; seulement, le calorimètre est remplacé par un vase de platine assez mince (fig. 1352) pouvant contenir  $25^{\text{sr}}$  d'eau distillée. Le courant entre dans l'eau par le fil  $f$  et par les deux lames métalliques  $l, l'$ , et en sort par le fil  $f'$  qui entoure le vase ; ce vase sert ainsi d'électrode négative, et les gaz qui se dégagent à sa surface agitent le liquide. M. E. Becquerel a d'abord opéré

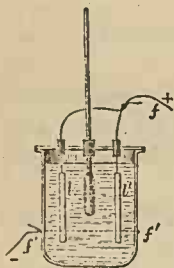


Fig. 1352.

sur différentes dissolutions salines, en prenant pour  $l, l'$  des lames formées avec le métal de la base du sel ; de sorte que, si ce métal se déposait sur le vase, les lames  $l, l'$ , attaquées par l'acide, formaient une quantité de sel qui remplaçait celui qui avait été décomposé. Il n'y avait pas de dégagement de gaz, et les effets calorifiques se compensaient aux deux pôles, les actions chimiques qui s'y produisaient étant opposées. Aussi a-t-on retrouvé facilement, dans ce cas, la loi de la proportionnalité au carré de l'intensité du courant. — La loi relative à la conductibilité du liquide ne se vérifie pas aussi complètement. Ainsi, pour des dissolutions de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc, la loi donnerait, pour les quantités de chaleur fournies par un courant capable de dégager  $1^{\text{cc}}$  de gaz, des nombres entre eux comme 0,26 et 0,32, et l'expérience a donné 0,21 et 0,36. M. E. Becquerel attribue les différences à l'échauffement dû à la résistance qu'éprouve l'électricité à passer du métal dans le liquide, et *vice versa*.

Des expériences avec dégagement de gaz, faites sur de l'eau rendue conductrice par des acides, des bases ou divers sels, ont montré que les lois s'appliquent encore dans ce cas, quand on a soin d'ajouter à la chaleur reçue par le calorimètre, celle que produirait la combinaison des volumes d'oxygène et d'hydrogène dégagés, volumes qui sont les mêmes que dans le voltamètre V (fig. 1348), comme nous le verrons. Si les expériences pouvaient se faire avec une précision suffisante, on pourrait calculer, en partant des lois de l'échauffement, la quantité de chaleur dégagée dans la combustion de l'hydrogène.

Une expérience ancienne de De La Rive montre bien l'influence de la conductibilité d'un liquide sur son échauffement : il fit passer un courant à travers une série de capsules remplies de divers liquides communiquant entre eux par des

arcs de platine, et vit les liquides les plus résistants s'échauffer plus que les autres, quel que fût l'ordre des capsules.

**1910. Chaleur des couples, et origine de la chaleur chimique.** — L'action chimique qui a lieu dans le couple voltaïque est accompagnée d'un dégagement de chaleur, en même temps que d'électricité. Quand il n'y a pas de circuit extérieur, cette électricité se recombine tout entière à travers la pile, en formant des courants qui échauffent le liquide résistant. Davy, Berzélius, Ampère, penchèrent à attribuer à cette cause toute la chaleur des actions chimiques; mais c'est M. Joule qui a le premier nettement formulé cette idée<sup>1</sup>. Il a trouvé les lois suivantes, en observant l'échauffement d'un couple de Smée sans circuit extérieur, et en tenant compte des capacités calorifiques du vase et des diverses substances qu'il contenait.

1<sup>o</sup> *La quantité de chaleur dégagée dans un temps donné est proportionnelle à la résistance de conductibilité du couple, multipliée par le carré de l'intensité du courant électrique, comme pour l'échauffement des fils; ces lois s'appliquent donc à tout le circuit, y compris la pile.*

2<sup>o</sup> *La chaleur totale développée dans le circuit est proportionnelle au nombre d'équivalents d'eau ou de zinc employés pour produire le courant.*

M. Joule a ensuite cherché les rapports entre les affinités pour l'oxygène, de différents corps, zinc, fer, potassium, hydrogène, en prenant pour mesure de l'affinité l'intensité magnétique du courant produit par l'oxydation de ces substances. Il a mesuré ensuite directement, au moyen de calorimètres, les quantités de chaleur dégagées par la combustion d'un équivalent de ces corps, et a trouvé qu'elles sont proportionnelles à leur affinité pour l'oxygène; et comme les quantités de chaleur trouvées ainsi diffèrent peu de celles qu'il a obtenues en cherchant l'échauffement produit, dans un fil de résistance connue, par le courant dû à la dissolution d'un poids donné de zinc ou d'une autre substance, il a conclu que la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques, sans électricité transmise, a pour origine la résistance à la conductibilité électrique. Cette manière de voir a été confirmée, depuis, par des expériences plus directes; en montrant, par exemple, que l'échauffement du couple diminue quand on détourne dans un circuit extérieur une partie de son électricité, et que la chaleur qui lui manque se retrouve alors dans ce circuit.

**1911. Chaleur totale du circuit.** — Dès 1843, De La Rive avait annoncé que la somme des quantités de chaleur dégagées dans toutes les parties du circuit, y compris le couple qui fournit le courant, est constante. Cette somme se partage inégalement entre ce couple et le fil qui joint les pôles, et d'une manière qui dépend de leurs résistances relatives. De La Rive employait un couple formé de platine et zinc distillé plongés dans l'acide nitrique concentré; les pôles étant réunis par un fil de platine entièrement plongé dans une même quantité du même acide, renfermée dans un vase semblable à celui du couple. Ce fil de

<sup>1</sup> Arch. de l'électr., t. II, p. 54 et 80; et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 474.

platine était joint au zinc et au platine du couple, par des tiges du dernier métal assez grosses pour ne pas s'échauffer. La somme des échauffements dans les deux vases a toujours été la même; mais la part de chacun d'eux dépendait des dimensions du fil de platine<sup>1</sup>.

M. A. Favre<sup>2</sup> a confirmé cette loi importante, au moyen de nombreuses expériences faites avec son calorimètre à mercure (II, 1061). Un petit couple zinc et platine était plongé dans le moufle, et le fil conjonctif, dans le moufle d'un second calorimètre. Le gaz hydrogène dégagé dans le couple était recueilli et jaugé avec soin; il servait de mesure à l'action chimique, les résultats étant rapportés à un équivalent, 1<sup>er</sup>, d'hydrogène dégagé, ou à 33<sup>es</sup> de zinc dissous. La quantité correspondante d'électricité forme ce que l'on nomme un *équivalent d'électricité*.

Indépendamment de la loi énoncée, M. Favre a reconnu que *l'on retrouve dans le couple et dans le circuit extérieur la totalité de la chaleur dégagée par les actions chimiques qui produisent l'électricité*. Cette loi s'énonce aussi en disant que *la chaleur chimique est égale à la chaleur voltaïque*, c'est-à-dire à celle que dégage le passage du courant.

Cependant, cette belle loi ne se vérifie pas toujours exactement, comme il résulte de nombreuses expériences de M. Raoult, faites au moyen du calorimètre à mercure un peu modifié<sup>3</sup>. Tantôt c'est la chaleur chimique qui l'emporte, tantôt la chaleur voltaïque, suivant les circonstances. M. Edlund<sup>4</sup> conclut que l'égalité entre les deux chaleurs ne peut être exacte, de ce fait, constaté par M. Favre, qu'un couple peut se refroidir quand le circuit extérieur est très-résistant; l'expérience en a été faite sur des couples de zinc ou cadmium; associés au platine et à l'acide chlorhydrique, et sur des couples de Grove. M. Edlund explique l'inégalité entre les deux chaleurs par une absorption de chaleur équivalant au travail du courant dans sa propagation; tout courant qui traverse un couple dans le sens de la force électromotrice y produisant un refroidissement; et un réchauffement, quand il marche en sens contraire. — Il part de là pour expliquer la chaleur considérable qui se dégage dans les voltaïques, comme l'ont reconnu M. E. Becquerel, puis MM. Favre et Silbermann.

Quoi qu'il en soit on peut regarder la loi comme vraie, au moins en théorie; car, si le circuit contenait plus de chaleur que n'en produit l'action chimique, l'excès de chaleur serait créé de rien, et si la chaleur totale du circuit était moindre que la chaleur chimique, il y aurait destruction de travail, ce qui est impossible. — Les anomalies observées dans la pratique doivent être attribuées à des causes accidentelles, à des effets chimiques secondaires, des changements

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de M. A. de La Rive, t. III, p. 478.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XL, p. 293.

<sup>3</sup> Annales de chimie et de physique, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 406.

<sup>4</sup> Annales de Poggendorff, t. CLIX, p. 240, et Journal de physique, de M. d'Almeida, t. VI, p. 129.

d'état, des dissolutions, des expansions ou compressions de gaz, et peut-être aussi, comme le suppose M. Favre, au passage de gaz, de l'état naissant à l'état ordinaire.

**1942. Conséquences.** — 1° D'après les lois de Joule, la quantité  $q$  de chaleur dégagée dans une portion d'un circuit dont la résistance est  $r$ , est donnée, au bout du temps  $\theta$ , par la formule  $q = kr^2\theta$ . La quantité totale de chaleur  $Q$  développée dans le circuit dont la résistance totale est  $R$ , sera, au bout du même temps,  $Q = kR\theta^2$ . Nous verrons plus loin que l'on a  $i = E : R$ , en désignant par  $E$  la force électromotrice qui fournit l'électricité. Remplaçant  $i$  par cette valeur, les formules deviennent

$$[1] \quad Q = k \frac{E^2}{R} \theta ; \quad \text{et} \quad q = k \frac{r}{R} \frac{E^2}{R} \theta , \quad [2]$$

qui donne la quantité de chaleur dégagée dans une partie du circuit, de résistance  $r$ . On voit que  $q$ , proportionnel au carré de la force électromotrice, est une fraction de la quantité totale  $Q$ , proportionnelle au rapport,  $r : R$ , de la résistance de la partie considérée à la résistance totale.

Les expressions [1] et [2] peuvent être présentées sous une autre forme. Soit  $e$  la quantité d'électricité qui parcourt le circuit pendant le temps  $\theta$  ; cette quantité est proportionnelle au temps, et en raison inverse de la résistance totale  $R$  ; on a donc  $e = k' (\theta : R)$  ; d'où  $\theta = Re : k'$ . Substituant dans [1] et [2], et représentant  $k : k'$  par  $K$ , il vient

$$[3] \quad Q = KE^2e , \quad \text{et} \quad q = K \frac{r}{R} E^2e . \quad [4]$$

La formule [3] montre que la quantité  $Q$ , indépendante des résistances du circuit, est proportionnelle à la quantité d'électricité  $e$  qui le parcourt.

Cette formule coïncide avec celle qui exprime l'échauffement produit par la décharge d'une batterie (1709). En effet, nous avons trouvé, dans ce cas, pour l'élévation de température dans un fil de diamètre  $d$  ;  $t = ke^2 : d^2s$  ;  $e$  étant la quantité d'électricité, et  $s$  la surface armée de la batterie. Or  $e : s$  représente la densité électrique  $\delta$ , que nous représentons ici par  $E$ , et qui remplace la force électromotrice, on aura donc en substituant,  $t = kEe : d^2$ . Mais  $t$  varie aussi en raison inverse du temps  $\theta$  de la décharge ; on a donc  $k = k' : \theta$  ; et comme  $e$  est proportionnel à la résistance totale  $R$  du circuit, et en raison inverse de la densité électrique  $E$  (1709), on aura  $k = k' : \theta = k'E : R$ .

Substituant, il vient  $t = \frac{k'E^2e}{d^2R}$ . La quantité de chaleur,  $q$ , développée dans le fil s'obtiendra en multipliant l'échauffement  $t$ , de ce fil, par sa masse  $\frac{1}{2} \pi d^2 \Delta$ , et par sa capacité calorifique  $n$  ; on aura donc

$$q = \frac{1}{2} \pi d^2 \Delta nt = K \frac{r}{R} E^2e ,$$

en remarquant que  $l : d^2$  représente la résistance particulière  $r$  du fil, et en réunissant toutes les constantes sous le symbole unique  $K$ .

2° La quantité de chaleur produite par un équivalent d'électricité est proportionnelle à la force électromotrice  $E$ . En effet, si celle-ci devient  $n$  fois plus grande, la quantité de chaleur sera  $n^2$  fois plus grande, d'après la formule [3]. Mais le nombre d'équivalents d'électricité dégagés dans le même temps est  $n$  fois plus grand; donc, pour un seul équivalent, la quantité de chaleur sera multipliée par  $n$ .

3° Température d'un fil. — La quantité de chaleur développée par un courant d'intensité  $i$ , dans un fil dont la résistance est  $r$ , est donnée par la formule  $q = kri^2$ . Quand la température du fil est constante, la quantité de chaleur reçue est égale, à chaque instant, à celle qui se perd à l'extérieur. Celle-ci est proportionnelle à la surface  $\pi dl$  du fil, à son pouvoir émissif  $m$  et à l'excès  $t$  de sa température sur celle de l'air, en supposant que la loi de Newton (II, 894) soit applicable. On a donc

$$[5] \quad q = kri^2 = k' \pi d l m t .$$

On a aussi  $i = E : R$ ; de plus, la résistance  $r$  est, comme nous le verrons, proportionnelle à la longueur  $l$  du fil et en raison inverse de sa section et de sa conductibilité  $c$ ; on a donc  $r = l : \frac{1}{4} \pi d^2 c$ . Substituant dans [5], il vient

$$q = K \frac{4l}{\pi d^2 c} \frac{E^2}{R^2} = \pi d l m t ; \quad \text{d'où} \quad t = c \frac{1}{m d^3 c} \frac{E^2}{R^2} ,$$

en réunissant toutes les constantes en une seule. Cette formule permet de rendre compte des phénomènes observés, avec des fils de différente conductibilité et de différents diamètres (1929). La valeur de  $t$  est indépendante de la longueur, mais à la condition que  $R$  restera constant, comme nous l'avons déjà vu. Remarquons aussi que  $c$  doit avoir la valeur qui correspond à la température du fil, ce qui explique l'influence du milieu sur l'échauffement (1936).

4° Travail produit dans le circuit. — Nous verrons qu'on peut, au moyen des courants, mettre en mouvement des machines, c'est-à-dire produire du travail mécanique. Dans ce cas, une partie de la chaleur du circuit disparaît et se transforme en travail; nouvelle application de la théorie mécanique de la chaleur (II, 1333). De plus, la quantité de chaleur dégagée dans les actions chimiques qui produisent l'électricité est égale à celle que l'on trouve dans le circuit total, qu'il y ait ou non production d'un courant; elle représente donc le travail moléculaire accompli dans l'électromoteur. Nous avons vu (II, 1331) comment M. Fabre a confirmé ce principe, en l'appliquant à l'évaluation de l'équivalent mécanique de la chaleur, au moyen d'une petite machine mue par un courant.

Remarquons enfin que, si le courant produit des actions chimiques exigeant de la chaleur, cette chaleur est encore empruntée à la chaleur totale du circuit.

5° Faraday avait posé en principe que l'électricité fournie par un couple

voltaïque était due tout entière à l'oxydation du zinc, la combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique n'y contribuant pas. M. Favre a soumis cette opinion à un contrôle décisif : si elle était vraie, la quantité de chaleur produite devrait être égale à celle que dégage l'oxydation du zinc, soit 42451 calories pour un équivalent, ou 33<sup>es</sup> de ce métal, diminuée de la chaleur absorbée par la décomposition de l'eau, ou 34462 calories. On ne devrait donc pas pouvoir développer dans le circuit extérieur un nombre de calories plus grand que la différence 7989<sup>e</sup> par équivalent de zinc dissous ; or M. Favre a trouvé jusqu'à 9685 calories. Il y a donc aussi de la chaleur et de l'électricité dégagées dans la combinaison de l'acide sulfurique avec l'oxyde de zinc.

## II. Arc voltaïque.

**1943. Formation de l'arc voltaïque.** — Quand on laisse une petite solution de continuité dans le fil qui réunit les deux pôles d'une forte pile, on obtient des étincelles tellement rapprochées, qu'elles forment une lumière continue, dont l'éclat est surtout remarquable quand on la fait jaillir entre deux pointes d'un charbon conducteur. Quand on emploie un grand nombre de couples, on peut éloigner ces pointes de plusieurs centimètres, et l'espace qui les sépare reste constamment rempli par une bande lumineuse un peu ovale, d'un éclat éblouissant, nommée *arc voltaïque*. L'arc voltaïque a été observé, pour la première fois, par Davy, au moyen de sa pile de 2000 couples (1821). Pendant longtemps, on n'avait pu le reproduire que très-rarement, lorsque est venue l'invention des piles d'Young et de Muncke, avec lesquelles on peut réunir un grand nombre de couples dans un petit espace. Aujourd'hui, on obtient l'arc voltaïque au moyen des piles à charbon. Il suffit de 60 couples du grand format pour produire de brillants effets. Les piles secondaires de M. Planté, chargées au moyen de 2 ou 3 couples de Bunsen, sont aussi très-commodes pour répéter l'expérience.

Pour opérer dans différents gaz, on emploie l'appareil (fig. 1353). Deux crayons en plombagine, terminés en pointe et fixés à deux pinces métalliques communiquant avec les pôles de la pile, sont renfermés dans un vase de verre, dans lequel on peut faire le vide. La tige *t* glisse dans une boîte à cuir qui permet d'écarter plus ou moins les charbons. Pour produire l'arc lumineux, on fait d'abord toucher les pointes, et, une fois que le courant est établi, on les écarte peu à peu ; la lumière continue de briller, et à une distance bien plus grande dans le vide que dans les gaz. Dans le vide, Davy a pu dépasser 41<sup>cm</sup>. Il a aussi obtenu



Fig. 1353.

l'arc voltaïque dans divers liquides; les pointes de charbon devenaient rouge-blanc, et il se dégagait beaucoup de gaz provenant de la décomposition du liquide.

Dans l'air, les charbons brûlent, leur distance augmente, et il faut les rapprocher de temps en temps. Davy se servait de charbon de bois calciné. On emploie aujourd'hui le charbon de cornue, qui ne brûle qu'avec lenteur.

**1944. Transport de particules dans l'arc voltaïque.** — Une dizaine d'années après la brillante expérience de Davy, M. Silliman étudia l'arc voltaïque au moyen du *déflagrateur* de Hare (1821)<sup>1</sup>, et reconnut qu'il se fait, *du pôle positif au pôle négatif*, un transport de particules incandescentes de charbon, qu'on peut distinguer en regardant à travers des verres colorés. Le mouvement de ces particules semble assez lent, fait paraître l'arc agité, et leur répulsion mutuelle concourt à lui donner sa forme ovale. Le charbon négatif s'allonge peu à peu en cône par l'accumulation des particules transportées, et le charbon positif présente une cavité telle, que la masse accumulée au pôle négatif pourrait s'y mouler presque exactement. Dans l'air, la pointe négative ne s'accroît pas autant, à cause de la combustion d'une partie des particules, et le charbon positif est terminé par une surface plane, sans doute à cause de la combustion des bords de la cavité conique. — Matteucci a observé au microscope le transport des particules, dans le cas d'électrodes coniques en fer; il vit des globules en fusion rouler avec rapidité sur la pointe positive, et s'élancer vers la pointe négative pour s'y déposer et former des champignons. Si les deux pointes étaient en contact, la pointe positive devenait rouge, et, si on l'écartait lentement, on parvenait à obtenir un arc de matière fondue très-brillante, et qui coulait évidemment du pôle positif au pôle négatif.

Le transport des particules explique pourquoi on peut écarter les charbons quand l'électricité a pu franchir l'espace qui les sépare; les particules servant d'intermédiaires, comme dans les tubes étincelants. Aussi, peut-on faire jaillir l'arc lumineux sans rapprocher d'abord les charbons, en faisant partir entre eux une forte étincelle électrique, qui entraîne des particules, comme l'a prouvé Fusinieri (1720).

Quant à l'arrachement de ces particules, il semble dû à une répulsion semblable à celle qui s'exerce, comme nous le verrons, entre les parties consécutives d'un fil parcouru par l'électricité. Un courant d'air peut rompre l'arc, sans doute en entraînant les particules.

**1945. Influence de la substance des électrodes.** — Quand on change la nature des électrodes, l'éclat et la longueur de l'arc changent, les particules transportées étant différentes. Avec le platine, la longueur maximum est moindre qu'avec le charbon; et à peu près la même quand le platine est en éponge. De La Rive a reconnu que les particules de platine se déposent au pôle négatif, sous forme de petites ramifications faciles à détacher. Grove a fait des expériences

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXIV, p. 216.



nombreuses sur ce sujet<sup>1</sup> ; il range les métaux dans l'ordre qui suit, en commençant par ceux qui donnent l'arc le plus long et le plus brillant : *potassium, sodium, zinc, mercure, fer, étain, plomb, antimoine, bismuth, cuivre, argent, or, platine*. — Il y a transport de particules métalliques, du pôle positif au pôle négatif, dans le vide ou dans un gaz ne contenant pas d'oxygène ; et de particules d'oxyde, dans l'air ou l'oxygène.

Quand les électrodes en charbon se touchent, on entend des craquements particuliers, que De La Rive attribue à l'arrachement des particules de charbon. Ces craquements n'ont pas lieu avec les métaux, les particules entraînées étant probablement alors en fusion, comme l'a supposé M. Van Breda en voyant leur forme arrondie.

D'après ce qui précède, l'arc devra être d'autant plus long que la matière des électrodes sera plus fusible et moins tenace ; aussi, le charbon, de nature friable, donne-t-il un arc très-long. De La Rive a remarqué que l'arc ne se produit avec une pile faible, qu'après que l'un des charbons en contact a rougi et perdu par là de sa ténacité. Un métal en poudre impalpable tassée dans des tubes donne aussi un arc plus long que le même métal compacte. — Il résulte encore de là que, si les électrodes sont de nature différente, la longueur de l'arc devra dépendre du sens du courant ; en effet, avec des électrodes de platine et de zinc, l'arc est plus brillant quand le zinc est positif, et MM. Fizeau et Foucault ont reconnu qu'il est plus long entre des électrodes de charbon, et argent ou platine, quand le charbon est positif. Grove a constaté que, en général, l'arc est d'autant plus long et brillant que l'électrode *positive* est plus oxydable et plus facile à volatiliser. M. Tyrtow, ayant pris pour électrodes, du mercure et un fil métallique, vit ce dernier rougir et fondre quand il était positif ; s'il était négatif, il n'y avait, au moment du contact, que des étincelles bleuâtres, et le mercure se vaporisait avec bruit.

**1946. Lumière électro-silicique.** — A l'influence des électrodes se rattachent les faits suivants, observés par M. G. Planté sur des électrodes contenant de la silice. Ayant enfoncé dans une solution de salpêtre communiquant avec l'un des pôles d'une pile à grande tension (par exemple, une de ses piles secondaires) un fil de platine engagé à frottement dans un tube de verre, et communiquant avec l'autre pôle de la pile (*fig. 1354*), il vit le verre fondre dans le liquide, et envelopper le bout du fil, en répandant une lumière éblouissante. Avec le salpêtre, il suffit de 60 éléments de la pile secondaire ; mais, avec du sel marin, il en faut de 250 à 300.

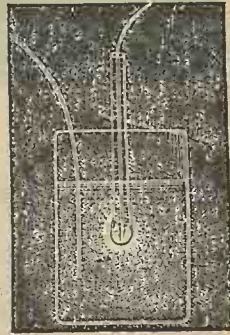


Fig. 1354.

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Sciences et arts), t. XXV (1840), p. 326.

On obtient encore une très-vive lumière en appuyant une des électrodes en platine, sur une lame de verre ou de porcelaine plongée dans la dissolution, et en un point peu éloigné du niveau du liquide. Le caractère particulier de cette lumière est dû à la présence de la silice; car un cristal de quartz (*fig. 1355*)



Fig. 1355.

donne le même résultat, et il est probable qu'il y a décomposition de la silice, et que le silicium, en brûlant, joue le principal rôle.

**1947. Forme des électrodes.** — De La Rive, ayant formé les électrodes d'une pointe de platine et d'une plaque de même métal placées sous une cloche (*fig. 1356*), a vu que l'arc, qui formait un cône ayant sa base sur la lame, était plus long quand celle-ci était positive<sup>1</sup>. La tige *t* pouvait être abaissée au moyen d'une crémaillère et d'un pignon denté, de quantités mesurées au moyen d'une tête divisée *r*. Avec une pile de Grove de 50 couples fortement chargés, il se formait sur la plaque positive une tache circulaire bleuâtre, qui, dans le vide, présentait un diamètre double et une

couleur plus vive que dans l'air. Cette tache ne se formant pas dans l'hydrogène, on doit l'attribuer à une oxydation. Quand la plaque était négative, il se produisait encore une tache à sa surface, mais elle était blanche et formée de particules de platine. Les taches se montraient de même, quand la plaque était verticale. Grove a fait beaucoup d'expériences de ce genre<sup>2</sup>.

**1948. Transport du pôle négatif au pôle positif.** — La nature de l'électrode négative a aussi de l'influence sur la longueur de l'arc. De La Rive, ayant remplacé la pointe de platine (*fig. 1356*) par une pointe en coke, obtint un arc deux fois plus long, quoique le coke fût négatif et que le cône lumineux fût remplacé par une multitude de jets partant de la plaque et allant aboutir à différents points du coke.



Fig. 1356.

L'influence de l'électrode négative vient de ce qu'il y a aussi transport de particules, de cette électrode à l'électrode positive, comme l'a montré M. Van Breda<sup>3</sup>; seulement, le transport est plus abondant dans le sens opposé. Par exemple, avec deux boules de fer, dans le vide, la boule négative avait perdu 55<sup>mg</sup>, et la positive, 309<sup>mg</sup>. Une des boules de fer ayant été remplacée par du charbon de Bunsen (1860), la boule de fer perdit le même poids, quel que fût

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. IV, p. 345.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVII, p. 376.

<sup>3</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. III, p. 32.

le sens du courant; mais le charbon perdait davantage quand il formait l'électrode positive. Enfin, une plaque de fer épaisse et isolée ayant été placée dans le vide entre deux électrodes de cuivre, et l'arc ayant été excité par une forte étincelle, la matière lumineuse sembla sortir des électrodes, sous forme de jets resplendissants qui rejaillissaient en gerbes de feu contre la plaque, et les deux boules de cuivre furent recouvertes de poussière ferrugineuse. La boule positive gagna 63<sup>mg</sup>, et la négative 360.

Il résulte de ce qui précède que l'arc voltaïque doit sa permanence aux particules qui le traversent. C'est pourquoi la quantité d'électricité qui passe entre les électrodes dépend de la quantité de particules transportées, et par conséquent de la nature des électrodes. En effet, les électrodes étant à 3<sup>mm</sup> de distance, un voltamètre introduit dans le circuit reçut, au bout d'une minute, 45<sup>cc</sup> de gaz, quand elles étaient en étain, et 25, 29, 27, 26 et 23, quand elles étaient en *zinc, coke, fer, laiton, et cuivre*. La pile était composée de 60 couples de Grove, et le voltamètre recevait 46<sup>cc</sup> en une minute, quand les électrodes se touchaient. Du reste, Matteucci a prouvé directement l'existence du courant dans l'arc, en introduisant en deux points de cet arc les extrémités de fils de platine enchâssés dans des tubes de verre, et en relation avec un rhéomètre, dont l'aiguille fut déviée.

**1949. Échauffement inégal des électrodes.** — Les électrodes de l'arc voltaïque s'échauffent, et, quand elles sont de nature différente, celle qui conduit le moins bien l'électricité s'échauffe le plus, comme dans un circuit continu (1929). Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que, dans le cas où les électrodes sont de même nature, l'échauffement est toujours beaucoup plus prononcé à l'électrode positive qu'à l'électrode négative; ce qui explique pourquoi le transport des particules se fait principalement de la première à la seconde. De La Rive a vu la pointe de platine (*fig. 1356*) fondre quand elle était positive, et ne s'échauffer que faiblement quand elle était négative, auquel cas la plaque rougissait et pouvait être tronquée. Le fer, le cuivre, l'argent, l'argentan, lui ont donné des résultats semblables. On peut reconnaître aussi, avec deux cônes de fer, que le cône positif est brûlant pendant que le cône négatif n'est pas sensiblement chaud. Matteucci a confirmé ce résultat, en mesurant la température des électrodes, au moyen d'une aiguille thermo-électrique enfoncée dans un petit trou pratiqué près de l'extrémité<sup>1</sup>. Il a aussi reconnu que la différence des températures des électrodes est d'autant plus prononcée que la matière dont elles sont formées est moins conductrice et plus friable. Cette différence est faible quand elles sont plongées dans du gaz hydrogène, sans doute à cause du pouvoir refroidissant de ce gaz, qui, en abaissant la température, augmente la conductibilité (1937).

**1950. Influence du nombre des couples sur la longueur de l'arc.** — Despretz, dans un grand travail sur l'arc voltaïque, a cherché l'influence sur

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXVII, p. 41, et t. XXXII, p. 350.

sa longueur, du nombre et de la disposition des couples de la pile<sup>1</sup>. La distance des cônes de charbon, placés verticalement le pôle positif en haut, augmentait rapidement avec le nombre des couples ajoutés en série. L'arc donné par 100 couples était presque quadruple de celui de 50 couples; et l'arc de 200 couples, un peu moins que triple de celui de 100. Avec 600 couples, l'arc, qui avait 20<sup>cm</sup>, était 7 à 8 fois aussi long que l'arc donné par 100 couples.

Au lieu de placer les couples les uns à la suite des autres, Despretz les a ensuite réunis par groupes de 25 disposés en séries parallèles, de manière à former des piles d'un même nombre de couples, successivement 2, 3, 4..., 24 fois plus grands. Il a trouvé que l'arc avait 1<sup>mm</sup> pour trois séries parallèles, et 11<sup>mm</sup>, 5 pour les 24 séries; tandis que les 600 éléments disposés en une seule série donnaient un arc 14 fois plus long; ce qui montre l'influence de la tension. Mais ce qu'il y a de singulier, c'est que le contraire a lieu quand les charbons sont placés horizontalement: six séries de 100 couples disposés parallèlement produisirent un arc de 40<sup>mm</sup>, 5, tandis que les 600 éléments placés les uns à la suite des autres n'ont donné qu'un arc de 27<sup>mm</sup>, 6. Ces résultats se rattachent à des effets magnétiques dont nous allons parler (1952).

**1951. Action du magnétisme sur l'arc voltaïque.** — Lors de la découverte de la déviation de l'aiguille aimantée par les courants, Arago annonça que l'arc voltaïque devait exercer une action semblable, et être lui-même influencé par l'aimant. Davy constata, en effet, que l'arc est attiré par le pôle d'un fort aimant, présenté transversalement, ou bien en est repoussé, suivant le sens du courant et la nature du pôle de l'aimant. L'arc prend alors une courbure d'autant plus prononcée, que l'aimant est plus fort. De La Rive a vu même l'arc se rompre sous l'influence d'un aimant puissant, qui le détournait trop de sa direction.

Le magnétisme agit aussi sur l'arc, dans le sens longitudinal: De La Rive<sup>2</sup> ayant formé l'arc entre les pointes de deux barreaux de fer doux, le supprima subitement en aimantant ces barreaux, soit par l'influence de forts aimants, soit au moyen du courant d'une seconde pile, circulant dans un fil enroulé en hélice autour de ces barreaux. Pour reproduire l'arc, il fallait rapprocher les pointes de fer; mais alors il présentait un aspect particulier; les particules semblaient se détacher difficilement de la pointe positive, et étaient lancées dans toutes les directions, en faisant entendre un son aigu comparable à celui d'un sifflet à vapeur. Les résultats étaient les mêmes, quand les pôles magnétiques des pointes de fer étaient de même nom, ou de nom contraire.

De La Rive a encore procédé en plaçant sur l'un des pôles d'un fort *électro-aimant* une plaque d'un métal peu fusible, et au-dessous une pointe de même métal. L'arc est alors plus court qu'en l'absence de l'électro-aimant chargé, et quand la plaque est positive, on entend un sifflement aigu. Si c'est la pointe, qui

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXVII, p. 41, et XXXII, p. 330.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève (Sciences et arts)*, t. IV, p. 355.

est positive, l'arc est projeté vers les bords de la plaque dans une direction qui dépend du sens du courant et de la nature du pôle magnétique sur lequel repose la plaque. A chaque instant l'arc est rompu, et à chaque rupture, on entend une explosion semblable à celle d'une bouteille de Leyde. Cette explosion qui se produit aussi quand la plaque est remplacée par une seconde pointe, est comparable à celle d'une arme à feu, quand l'électro-aimant est très-puissant. Dans ce cas, il y a sifflement quand, la pointe positive approchant de son point de fusion, l'arc reste continu. Si, par exemple, l'une des pointes est en platine, et l'autre en cuivre, il y a sifflement quand la pointe de platine est positive, et ruptures fréquentes accompagnées d'explosions, quand elle est négative; le cuivre, dans ce dernier cas, s'échauffant beaucoup moins que le platine dans le premier.

M. Quet, ayant placé de part et d'autre d'un arc voltaïque vertical formé entre deux charbons, les pôles A, B d'un électro-aimant (fig. 1357), vit cet arc se courber dans un plan perpendiculaire à la ligne AB, et dans un sens dépendant de la direction du courant dans l'arc et de la position relative des pôles A et B. Si l'on change ceux-ci de place, l'arc se courbe en sens opposé. Si l'on rapproche les pôles A, B, il se courbe de plus en plus et finit par se transformer en un dard horizontal *r*. Ce dard, dont la longueur peut être de 8 à 10 fois la distance AB, lance des particules de charbon, siffle, et fait entendre en disparaissant un bruit sec et intense<sup>1</sup>.



Fig. 1357.

**1952. Action du magnétisme terrestre.** — La direction de la ligne des électrodes a une grande influence sur la longueur de l'arc voltaïque. Despretz a reconnu que l'arc vertical a le plus de longueur quand le pôle positif est en haut, quelle que soit la nature des électrodes<sup>2</sup>. Avec 600 couples de Bunsen, arrangés en 6 séries parallèles, les distances maximum des charbons étaient de 74<sup>mm</sup>, quand le pôle positif était en haut, et de 56<sup>mm</sup>, quand il était en bas. Dans d'autres expériences, le rapport entre les distances était de 6 à 7. Si les charbons étaient horizontaux, et perpendiculaires au méridien magnétique, l'arc était le plus long quand le pôle positif était à l'est. Dans ce cas, le pôle austral de la terre était à la gauche du courant qui parcourait l'arc. Avec 200 couples en deux séries parallèles, les longueurs étaient 20<sup>mm</sup>, 8 et 1<sup>mm</sup>,5.

Dans ces expériences, les charbons étaient renfermés dans une boîte de bois, de 80<sup>cm</sup> de côté, et soutenus par des tiges de cuivre isolées, dont une était mobile. Après la suppression du courant, on mesurait la distance des pointes de charbon. L'arc était observé à travers un verre bleu, pour amortir l'éclat de la lumière, qui peut être dangereuse pour les yeux. L'arc d'une pile de 600 couples

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXIV, p. 805.

<sup>2</sup> Comptes-rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXX, p. 373.

occasionne, en un instant, des maux de tête et d'yeux très-violents, et la peau du visage devient rouge comme par un fort coup de soleil. Une pile de 100 couples produit déjà une vive douleur aux yeux.

**1953.** — EFFETS CALORIFIQUES DE L'ARC VOLTAÏQUE. — La température de l'arc voltaïque est excessivement élevée; on l'a utilisée pour opérer la fusion des corps les plus réfractaires, même de ceux qui conduisent mal l'électricité. Des baguettes de fer ou d'acier introduites dans l'arc, y brûlent dans l'air en lançant de vives étincelles. Quand on veut opérer des fusions, on place les électrodes l'une au-dessus de l'autre, comme dans la (*figure 1353*). L'électrode inférieure, qui reçoit l'électricité positive, est formée d'un fragment de charbon dur creusé en forme de coupe dans laquelle on place le corps à fondre. Un cône de charbon forme l'électrode négative. Quand on le rapproche du fond de la coupe, l'arc se produit, et la matière placée au pôle positif, qui s'échauffe, le plus (1949), entre en fusion, pendant que quelques-unes de ses particules sont transportées au pôle négatif. On a essayé bien des fois de fondre le charbon par ce moyen, mais on n'a pas d'abord réussi. M. Jacquelin était parvenu cependant à ramollir le diamant, en le transformant en une matière noire semblable à la plombagine. Enfin Despretz a obtenu la fusion des corps qui avaient résisté jusque-là aux agents calorifiques les plus énergiques.

**Expériences de Despretz**<sup>1</sup>. Despretz a d'abord opéré en réunissant les trois sources les plus puissantes : la chaleur de l'arc voltaïque, le chalumeau à oxygène et hydrogène, et la chaleur solaire concentrée au foyer d'une lentille à échelons de 90<sup>cm</sup> de diamètre. La pile se composait de 185 couples de Bunsen; ses effets étaient augmentés par l'addition des deux autres sources; car la magnésie dure et compacte, qui ne prenait que l'état pâteux sous l'action de la pile seule, se volatilisait, avec le concours de la lentille, en produisant une fumée blanche. Une baguette d'anhracite, de 1<sup>mm</sup> de diamètre et de 30<sup>mm</sup> de longueur, se ramollissait sous l'action des deux mêmes sources, au point de se courber sous son propre poids.

Ayant ensuite réuni un plus grand nombre de couples à charbon, Despretz a pu réaliser la fusion et la volatisation d'une foule de corps, dans l'arc voltaïque seul. Pour opérer dans l'air, il employait la boîte décrite ci-dessus (1952); pour opérer dans le vide ou dans les gaz à la température ordinaire, il se servait d'une grande cloche de verre placée sur la platine mobile d'une machine pneumatique; une plaque de tôle et un grillage métallique défendaient la platine et la cloche, de la projection des globules incandescents. Enfin, pour opérer dans les gaz comprimés il disposa l'appareil (*fig. 1358*) : Un vase de fonte de 10 litres de capacité, surmonté d'un couvercle mobile, est muni d'une tubulure qui reçoit, par l'intermédiaire d'une boîte à cuir, une tige isolée portant un cône de charbon, et mis en communication avec un des pôles de la pile, par la lame de cuivre *e*. Une crémaillère *c*, isolée par une sphère de verre *i*,

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. XXXVIII, p. 753, et XXIX, pp. 48, 515, et 709.

sert à rapprocher plus ou moins le charbon mobile du charbon fixe qui est au-dessous, et qui communique avec l'autre pôle de la pile, par une lame de cuivre *e'* passant par une tubulure. Le manomètre *m* donne la pression des gaz, que l'on introduit par le robinet *P*; et les tubulures *v, v*, garnies de glaces, servent à voir dans l'intérieur de l'appareil. Un second couvercle, muni de deux boîtes à cuir et soutenant deux charbons, servait aux expériences dans lesquelles un charbon vertical était plongé dans l'arc formé entre deux charbons horizontaux

#### 1951. Expériences sur le charbon. —

Despretz a d'abord observé la volatilisation du charbon dans le vide, soit avec du charbon très-pur obtenu par la calcination du sucre, soit avec du charbon de cornue. La pile était composée de 500 ou de 600 couples, en 5 ou 6 séries parallèles. Dès que le charbon positif s'était usé, il devenait d'un blanc éclatant, et l'on voyait tout à coup un nuage noir, semblable, sauf la couleur, à celui que donne l'iode jeté sur le feu, et une poussière noire se déposait sur les parois du vase, qui était brisé quand il était trop étroit. Cette expérience, répétée un grand nombre de fois, prouve qu'il est plus facile de volatiliser le charbon que de le fondre.

Pour obtenir la fusion du charbon, Despretz a opéré dans l'azote comprimé à 2 ou 3 atmosphères. Il a vu une fine baguette d'anthracite, de graphite, de charbon de sucre ou d'essence de térébenthine, fixée entre les électrodes, se ramollir, se courber, puis se détacher de l'électrode supérieure et se courber en S. Souvent la partie supérieure se gonflait au moment de la rupture, et ressemblait à du mâchefer. La pile était composée de 600 couples, disposés tantôt en 6 séries de 100, tantôt en 12 séries de 50. Le même physicien a vu, sur des fils de différentes sortes de charbon, ayant diverses longueurs, et de 1<sup>mm</sup> jusqu'à 41<sup>mm</sup> de diamètre, la matière paraître se rassembler à la partie inférieure où se faisait la rupture, et les parties séparées présenter un diamètre double et même triple du diamètre primitif. Il est parvenu aussi à souder des baguettes de divers charbons, ramollies par le feu électrique.

D'autres expériences ont été faites en mettant dans un petit creuset en charbon formant l'électrode positive, des fragments ou des poussières de divers charbons. Certains fragments pénétraient dans le creuset et s'y incrustaient, et le fond était couvert d'un amas de globules ayant la couleur grise du graphite. De l'anthracite, du graphite, s'épalaient sur le fond du creuset, comme un verre

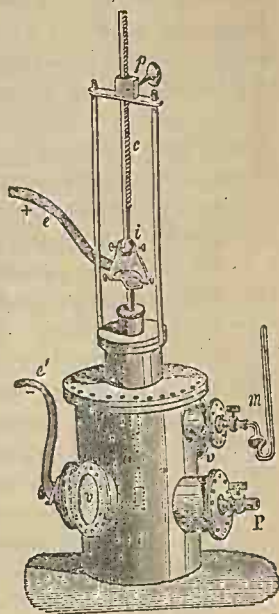


Fig. 1358.

noir. La chaleur était augmentée par un courant d'oxygène. Des diamants se sont transformés en graphite et ont donné aussi de petits globules fondus. En général, tout charbon devient d'autant moins dur qu'il est soumis plus longtemps à cette chaleur, et finit par se transformer en graphite.

Il résulte de ces expériences, et de ce fait, que le graphite cristallise en hexaèdre, tandis que les formes du diamant dérivent de l'octaèdre; que ce n'est pas par fusion ou volatilisation brusque, qu'on peut espérer d'obtenir le diamant. Despretz a alors procédé par volatilisation lente. Il disposa à la partie inférieure du vase (*fig.* 1358), un cylindre de charbon de sucre, et à la partie supérieure, un faisceau de 12 fils de platine très-fins. Il fit le vide, et produisit l'arc électrique au moyen de la *bobine de Ruhmkorff*, appareil que nous décrirons plus tard, qui permet d'obtenir, au moyen de quelques couples, un arc composé d'intermittences très-rapprochées, et sans échauffement intense des électrodes. L'appareil étant resté en action pendant plus d'un mois, les fils de platine se trouvèrent enveloppés d'une légère couche noire qui, examinée avec un grossissement de 30 fois, parut parsemée de petits octaèdres noirs, parmi lesquels il y en avait de blancs, opalins, translucides, ayant l'éclat des diamants bruts. Cette poussière a pu polir rapidement, à l'huile, des rubis, pierres qui ne peuvent l'être que par la poudre de diamant; d'où l'on conclut que les cristaux déposés sur les fils de platine étaient de très-petits diamants.

**1955. Expériences sur diverses substances.** — Despretz a fondu et volatilisé, dans l'arc voltaïque, une foule d'autres corps très-réfractaires. L'oxyde de zinc, la chaux, la magnésie se volatilisent plus facilement qu'ils ne fondent; cependant ils ont été réduits en masses transparentes comme du verre. L'alumine, le rutile, l'anatase, la nigrine, l'oxyde de fer, le disthène, fondent d'abord en globules, puis donnent des vapeurs. Le bore et le silicium ont été fondus facilement dans un creuset de charbon de sucre, en un globule un peu vitreux à sa surface. Le bore est plus fusible, plus volatil, et moins dur que le silicium. On opérait dans l'azote au moyen de 600 couples disposés en 6 séries parallèles. Le titane fond dans les mêmes conditions, et donne des vapeurs se déposant sur les bords du creuset, en globules qui, taillés, présentent une couleur jaune d'or. Le tungstène fond et se volatilise de même; il est d'un gris d'acier, et tellement dur qu'on ne peut le polir qu'avec la poudre de diamant.

Despretz a pu fondre de grandes quantités de certains métaux, dans un creuset de charbon servant d'électrode positive; en quelques minutes, 250<sup>gr</sup> de platine, et, en un instant, 80<sup>gr</sup> de palladium, et aurait pu en fondre beaucoup plus. Il a volatilisé du platine de manière à en couvrir une capsule de porcelaine de 10<sup>cm</sup> fixée au-dessus du charbon supérieur.

**1956. LUMIÈRE DE L'ARC VOLTAÏQUE.** — L'arc voltaïque répand une lumière dont l'œil ne peut supporter l'éclat. À côté, les flammes des lampes ressemblent à des corps rouges et sombres, et projettent des ombres comme les corps opaques. La vivacité de cette lumière dépend surtout de la quantité d'électricité, c'est-à-dire de la grandeur des couples, et fort peu de leur nombre. MM. Fizeau



et L. Foucault<sup>1</sup> ont trouvé sensiblement la même intensité, avec 40 couples et avec 80 couples placés les uns à la suite des autres; tandis que deux séries parallèles de 40 couples leur ont donné une intensité beaucoup plus grande. Despretz est arrivé aux mêmes résultats; il a constaté, de plus, que l'intensité augmente à peu près proportionnellement au nombre des séries de 100 couples disposées parallèlement, du moins jusqu'à la limite de 6 séries, qu'il n'a pas dépassée. Si les couples étaient placés bout à bout, l'augmentation était bien moins prononcée; elle était même à peine sensible de 100 couples à 600.

La lumière de l'arc n'a pas partout le même éclat; Despretz y a remarqué des parties sombres. Quand, les charbons étant horizontaux, on augmente peu à peu leur distance, l'arc passe d'abord en ligne droite, puis on voit un espace obscur au-dessus et au-dessous de la ligne des charbons, et, à la partie supérieure, la lumière se termine par un arc circulaire. Cette espèce de voûte s'élève peu à peu, devient un angle aigu, et l'arc se rompt. Despretz a encore constaté l'existence de bandes *transversales*, alternativement brillantes et sombres. Cette *stratification de la lumière électrique*, dont nous avons déjà vu un exemple (1694), sera, comme nous l'avons dit, étudiée plus tard.

**1957. La lumière prend naissance au pôle négatif.** — M. Neef distingue dans l'arc, deux espèces de lumières: l'une, propre à l'électricité, qu'il appelle *flamme froide*; l'autre due aux particules entraînées quand les électrodes se sont suffisamment échauffées, et qu'il nomme *lumière secondaire*. En examinant au microscope les petites étincelles qui jaillissent entre deux lames de platine qui servaient à fermer et à interrompre le circuit, il a reconnu que la lumière ne se montrait que sur la lame négative<sup>2</sup>. Ce fait important a été confirmé depuis, et Ruhmkorff a remarqué, au moyen de son appareil d'induction, que dans le vide, la boule de platine qui sert d'électrode négative est entièrement entourée, ainsi que la tige qui la supporte, d'une belle lumière violette, tandis que la boule positive laisse échapper une aigrette de lumière pourprée. Nous avons vu qu'il se produit des apparences semblables dans l'œuf électrique (1693). Despretz a reconnu qu'un petit thermomètre plongé dans la lueur violette, monte de quelques degrés; si l'on renverse le courant, ce thermomètre est plongé dans de la lumière rouge, et il baisse.

Ces expériences ayant été faites avec l'arc d'induction, il était nécessaire de les vérifier avec l'arc voltaïque; c'est ce qu'a fait M. Moigno<sup>3</sup>; il a vu constamment la lumière apparaître d'abord au pôle négatif, le charbon positif restant obscur; mais bientôt ce dernier s'échauffait, le transport des particules s'établissait, et la lumière était dès lors beaucoup plus vive au pôle positif qu'au pôle négatif, comme MM. Fizeau et Foucault l'avaient déjà constaté. On peut donc conclure, avec M. Neef, que la lumière prend naissance autour de la

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de M. A. de La Rive, t. IV, p. 318.

<sup>2</sup> Bibl. univ. de Genève (Arch. des S.), t. I, p. 30, et t. XXX, p. 391.

<sup>3</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXII, p. 359.

boule négative, tandis que la chaleur se développe principalement à l'électrode positive.

**1958. Propriétés de la lumière de l'arc voltaïque.** — La lumière de l'arc voltaïque a, avec la lumière du soleil, une grande analogie d'aspect et de propriétés. Peu de temps après l'expérience de Davy, Brande reconnut qu'elle provoque la combinaison du chlore avec l'hydrogène, et qu'elle noircit le chlorure d'argent... Aussi, les photographes peuvent-ils en faire usage pour remplacer la lumière solaire. De plus, Arago et de La Rive ont reconnu que les rayons de cette lumière, comme ceux du soleil, ne présentent pas la *polarisation optique*. La lumière de l'arc rend *phosphorescents*, c'est-à-dire lumineux dans l'obscurité, les mêmes corps que la lumière solaire. Ce résultat n'est pas dû au contact direct de l'électricité; car, d'après Biot et Becquerel, si la substance est exposée à la lumière électrique dans des tubes de verre coloré bien fermés, la phosphorescence ne se produit pas dans les tubes de verre rouge, et est très-prononcée dans les tubes violets. Nous étudierons, dans l'Optique, le *spectre* formé par la lumière de l'arc, et nous verrons en quoi il diffère du spectre solaire. MM. Fizeau et Foucault ont comparé l'intensité de la lumière de l'arc à celle du soleil, et à la lumière Drummond (II, 1299)<sup>1</sup> par des méthodes que nous ferons connaître dans l'Optique. Une pile de Bunsen de 92 couples disposés en deux séries de 46, leur a donné, au charbon positif, une lumière comprise entre  $\frac{1}{2}$  et  $\frac{2}{3}$  de celle du soleil à deux heures, par un ciel très-pur. L'expérience était faite au mois d'août. La lumière Drummond ne donnait que  $\frac{1}{140}$  de celle du soleil. M. Bunsen a trouvé que la lumière de l'arc produit par 48 de ses couples, entre deux charbons distants de 7<sup>mm</sup>, équivalait à celle de 572 bougies. Pendant une heure, la pile avait dépensé 300<sup>gr</sup> de zinc, 456<sup>gr</sup> d'acide sulfurique, et 608<sup>gr</sup> d'acide nitrique ayant pour densité  $\frac{1}{300}$ .

**Éclairage électrique.** — C'est au moyen de l'arc voltaïque qu'on applique ordinairement l'électricité à l'éclairage. Nous nous occuperons de cette manière d'éclairer quand nous parlerons des applications de l'*électro-magnétisme*, qui joue un rôle important dans la plupart des appareils employés pour produire d'une manière pratique l'arc voltaïque.

### § 3. — EFFETS MÉCANIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS

**1959. Changements de structure des métaux.** — Le passage d'un courant peut modifier la structure de certains métaux, soit d'une manière permanente, soit momentanément. Le premier effet se remarque surtout sur le cuivre : on a vu souvent les rhéophores de la pile devenir très-cassants à leurs extrémités, au bout d'un certain temps. M. Dufour a reconnu que le passage

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. IX, p. 370.

prolongé du courant d'un seul couple dans un fil de cuivre, peut diminuer sa ténacité de plus d'un quart. Wertheim, dans ses recherches sur l'élasticité<sup>1</sup> (I, 502), a reconnu, soit au moyen des allongements, soit par les vibrations longitudinales, que le coefficient d'élasticité diminue un peu pendant le passage du courant, et que la diminution, d'autant plus prononcée que ce courant est plus intense, disparaît avec lui, quelque longue qu'ait été la durée de son passage. On ne peut attribuer cette diminution à la chaleur, car un échauffement considérable ne diminue qu'à peine l'élasticité, et, quand on emploie les vibrations, le son remonte subitement dès qu'on supprime le courant.

M. Edlund a prouvé que l'excès d'allongement obtenu dans la tension n'est pas dû à une modification de l'élasticité, mais à une action spéciale du courant. M. Streintz, par des expériences très-précises<sup>2</sup>, a confirmé cette manière de voir, et il a évalué, pour plusieurs espèces de fils métalliques, le rapport entre

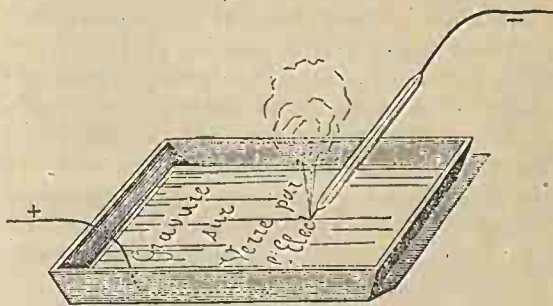


Fig. 1360.

la dilatation galvanique et la dilatation calorifique. Par exemple, il a trouvé pour le fer doux, le platine, le cuivre dur et l'acier dur, les rapports 0,27, 0,25, 0,19 et 0,03.

La ténacité est aussi un peu diminuée pendant le passage d'un courant ; mais il n'est guère possible de décider si ce résultat est dû à son action propre ou à l'échauffement. Il est probable que la résistance électrique du fil a une certaine influence, mais cette influence n'a pas encore été démembrée.

**1960. Actions par arrachement.** — Les courants à forte tension produisent des effets mécaniques très-remarquables, observés par M. G. Planté.

**Gravure sur verre par l'électricité.** — Nous avons vu comment un jet d'électricité peut altérer légèrement la surface du verre (1717). M. G. Planté, en employant des courants intenses, par exemple ceux que donnent ses piles secondaires de 50 à 60 éléments, a imaginé un moyen de graver le verre, bien

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 610.

<sup>2</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. XLIX, p. 143.

préférable à ceux qui exigent l'emploi de l'acide fluorhydrique. Une plaque de verre est placée horizontalement au fond d'une cuve (*fig.* 1360), et recouverte d'une couche d'une solution concentrée de salpêtre. Ce liquide communique avec le pôle positif de la pile par un fil de platine étendu le long du bord de la plaque. On tient à la main l'autre électrode, formée d'un fil de platine entouré d'une matière isolante, excepté à son extrémité, que l'on promène sur la plaque, suivant les traits que l'on veut former. Ces traits sont d'autant plus profonds que le mouvement est plus lent, et d'autant plus déliés que la pointe de platine est plus fine. — Pour opérer sur une surface convexe, on la plonge dans la dissolution, et on la fait tourner de manière à amener sous la pointe de platine l'endroit à graver. On peut opérer avec l'électrode positive, mais le courant doit alors être plus intense. — L'action de l'électricité paraît être ici à la fois calorifique et décomposante ; car la flamme qui apparaît à la pointe présente l'aspect de la lumière électro-silicique (1946).

**Étincelle ambulante.** — Nous avons cité les essais qu'a faits M. Planté pour produire une imitation de la foudre globulaire (1745). Le même physicien vient de publier de curieuses expériences, qui jettent un nouveau jour sur ce phénomène singulier, et auxquelles il a été conduit en observant l'effet produit par l'électricité de la pile secondaire de 800 couples perforant accidentellement une lame de mica de sa machine rhéostatique (1869)<sup>1</sup>. L'un des condensateurs de cette machine étant placé sur un plateau métallique communiquant avec un des pôles de la pile, on touche l'armature supérieure avec l'autre électrode : une décharge se produit ; la lame de mica est percée, et l'on voit un globule très-brillant qui se meut avec lenteur en faisant entendre un bruissement particulier, et traçant un sillon profond, sinueux et très-irrégulier. La couleur du globule indique encore la présence de la lumière électro-silicique. — M. Planté ayant, d'autre part, produit des globules lumineux au moyen des éléments de l'air humide (1745), on voit que le tonnerre en boule pourrait s'expliquer par l'existence d'une sorte de condensateur aérien dont le sol et une couche d'air humide supérieure représenteraient les armatures, séparées par une couche d'air intermédiaire relativement sèche ; cette théorie compléterait celle que M. Planté avait déjà établie d'après ses expériences antérieures.

**1961. Transport des liquides.** — Le premier fait d'un transport de liquide, de toutes pièces, sous l'influence d'un courant, a été observé par M. Porret<sup>2</sup>. Il divisa, au moyen d'une membrane de vessie, un vase de verre en deux compartiments contenant de l'eau, et y plongea les électrodes d'une pile à auge de 80 couples. Il vit l'eau baisser peu à peu du côté positif, et monter du côté négatif. D'autres liquides donnèrent les mêmes résultats, et le transport se fit toujours dans le sens de l'électricité positive. Il faut que le liquide oppose une certaine résistance au courant ; ainsi, de La Rive a constaté que l'acide

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Acad. des sc. de Paris*, t. LXXXV, p. 794, et t. LXXXVI, p. 764.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. II, p. 137.

sulfurique étendu, qui est bon conducteur, n'est pas transporté en quantité appréciable.

Becquerel a produit un transport de liquide de la manière suivante : deux tubes contenant de l'eau et de l'argile délayée retenue par un morceau de gaze, sont plongés verticalement dans de l'eau un peu salée. Ces tubes reçoivent les électrodes d'une auge de 60 couples, et l'on voit l'argile entraînée troubler l'eau au-dessous du tube par lequel entre l'électricité positive.

M. L. Daniel fait passer le courant de 4 à 5 couples à charbon à travers un tube horizontal *t* (fig. 1361) à bouts relevés, de 10 à 15<sup>mm</sup> de diamètre, contenant de l'eau très-peu acidulée, et une petite bulle de mercure, *m*, de 2 ou 3<sup>cm</sup> de longueur. La bulle s'allonge et marche dans le sens du courant ; si l'on renverse ce dernier, la bulle rétrograde. Son extrémité positive est brillante, et la négative terne. — Une colonne non conductrice, comme de sulfure de carbone,

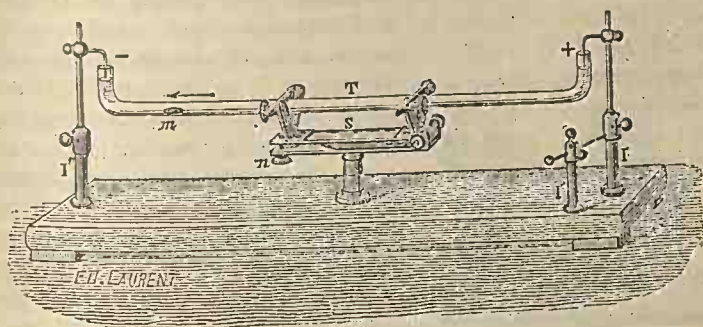


Fig. 1361.

ne se déplace pas dans les mêmes conditions. L'appareil (fig. 1361) construit par M. Ducretet est très-commode pour répéter ces expériences.

**1962. Lois du transport des liquides à travers les cloisons.** — Pour trouver les lois de ce phénomène, désigné quelquefois improprement sous le nom d'*endosmose électrique*, M. Wiedemann<sup>1</sup> renferme le liquide dans un vase *VV* (fig. 1362) et dans un cylindre d'argile poreuse *a*, sur lequel est mastiquée une cloche de verre *c*, surmontée d'un tube *t*. Le vase poreux *a* est entouré d'un manchon de platine *p*, communiquant en *o'* avec l'électrode positive d'une pile de Daniell. Un second manchon, renfermé dans l'intérieur du vase poreux, communique avec l'électrode négative au moyen d'une tige *o*, qui passe par un trou, garni de mastic, de la cloche *c*. Quand le courant passe, le liquide monte dans l'intérieur du tube *et*, et s'écoule par le tube *l* dans le flacon *f*. Après s'être assuré qu'une différence de pression était incapable de faire passer le liquide à

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVII, p. 242.

travers le vase poreux, M. Wiedemann a reconnu que *les quantités de liquide transportées dans des temps égaux sont : 1° proportionnelles aux intensités des courants ; 2° indépendantes de l'épaisseur et de la surface du vase poreux.* On modifiait l'épaisseur des parois par le grattage, et l'étendue de la surface, en la recouvrant en partie d'un enduit imperméable. En opérant avec des liquides différents, on a reconnu, comme J. Napier l'avait déjà fait, que la quantité transportée augmente avec la résistance du liquide.

Les résultats des expériences qui précèdent dépendant du frottement des liquides dans les pores du diaphragme. M. Wiedemann a employé une autre méthode, indépendante de cette influence. Ayant fermé le tube *t*, il a adapté un manomètre à mercure, *m*, à l'extrémité du tube *l*, et a mesuré l'énergie d'action du courant, par la différence de hauteur des colonnes de mercure au moment où cette différence ne variait plus. Les expériences ne pouvaient être faites que sur

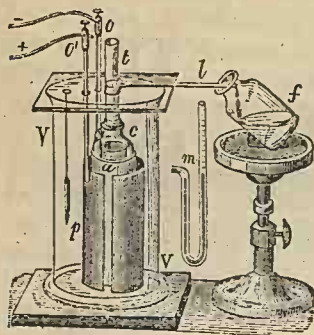


Fig. 1362.

les liquides ne dégageant pas de gaz en se décomposant; aussi, ont-elles été faites surtout avec des dissolutions diversement concentrées de sulfate de cuivre. Elles ont conduit aux lois suivantes: *La force de transport du courant est mesurée par une pression : 1° proportionnelle à son intensité; 2° proportionnelle à la résistance du liquide; 3° proportionnelle à l'épaisseur du vase poreux; 4° la pression est en raison inverse de la surface du vase.* Les deux dernières lois ne sont pas en contradiction avec les résultats trouvés par l'autre méthode, si l'on tient compte des lois de l'écoulement des liquides par les tubes capillaires (I, 327).

En effet, la résistance  $r$  qu'opposent ces sortes de tubes au passage des liquides est proportionnelle à leur longueur, la vitesse d'écoulement étant en raison inverse de cette longueur, qui est ici représentée par l'épaisseur  $e$ . On a donc  $r = ne$ ,  $n$  étant une constante qui dépend de la nature et de la surface du vase poreux. La force qui fait équilibre à l'action du courant est donc égale à la pression  $h$  qu'indique le manomètre, multipliée par la résistance  $ne$ , c'est-à-dire à  $b \cdot ne$ . Donc, pour un même courant,  $h$  doit être en raison inverse de  $e$ . Quant à l'influence de la surface, on voit que  $h$  doit être d'autant plus grand que les pores qui laissent passer le liquide sont plus nombreux.

Il est bon de rappeler ici les expériences de transports produits par la décharge et par le courant des diverses machines électriques, et en particulier celles de M. Quincke, dans lesquelles il n'y a pas de diaphragme poreux (1719). Nous allons voir, en outre, en étudiant les décompositions électro-chimiques, d'autres phénomènes de transport, qui les accompagnent habituellement.

## § 4. — EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS. — ÉLECTRO-CHEMIE.

## I. Décompositions produites par les courants.

**1963. Définitions.** — Les actions chimiques que produisent les courants électriques consistent principalement en décompositions. L'étude de ces actions forme l'*électro-chimie*. On peut regarder comme se rattachant à cette science, les détails que nous avons donnés sur les sources chimiques de l'électricité, et sur la théorie chimique de la pile. L'électro-chimie, dont les premières notions ne remontent qu'à l'année 1800, a fait depuis des progrès tellement rapides qu'elle constitue aujourd'hui une science très-vaste, qui éclaire et féconde plusieurs théories de la chimie, et qui a déjà fourni à l'industrie diverses applications importantes. Le premier corps décomposé par la pile est l'eau. Nous avons dit (1828) comment l'expérience a été faite, par Carlisle et Nickolson. Cruickshank, peu de temps après, décomposa quelques sels, et W. Henry, différents acides<sup>1</sup>. En 1803, Hisinger et Berzélius établirent complètement l'existence du transport aux électrodes, des éléments séparés dans les décompositions. En 1806, eurent lieu les premières expériences de Davy, qui imprimèrent un si rapide élan à la chimie. Enfin, Faraday, vers 1832, découvrit les lois des décompositions électro-chimiques.

C'est à cet illustre physicien que sont dus la plupart des termes dont on fait usage dans l'électro-chimie. Nous avons déjà dit (1828) qu'il désigne sous le nom d'*électrolyte*, toute substance décomposable directement par le courant, et dont les éléments sont mis en liberté et séparés les uns des autres, comme dans la décomposition de l'eau. Si la substance n'est décomposée que *secondairement* par la réaction des éléments d'une autre substance décomposée par le courant, la première n'est pas un électrolyte. Faraday l'appelle *électrolyteale*. Par exemple l'acide nitrique traversé par un courant paraît se séparer en oxygène et en gaz nitreux, mais il est probable que ce n'est là qu'un effet secondaire; l'eau étant d'abord décomposée, son oxygène se rendant au pôle positif, et son hydrogène au pôle négatif, où il réagit sur l'acide nitrique, et le fait passer à l'état de gaz nitreux. Du mot *électrolyte* dérivent plusieurs termes dont il est facile de comprendre le sens : *électrolyser* signifie décomposer par le courant; *électrolyse* ou *électrolyse*, l'action d'électrolyser; etc. Faraday désigne sous le nom d'*électrode* tout point par lequel le courant entre ou pénètre dans un corps, et par conséquent les extrémités des rhéophores de la pile<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts), t. XV, pp. 44 et 38.

<sup>2</sup> Faraday a aussi désigné sous le nom de *cathode* l'électrode négative, et sous le nom d'*anode*, l'électrode positive; il a appelé *ions* les éléments séparés par l'électrolyse; *cathions*, ceux qui se dégagent au pôle négatif, et *anions*, ceux qui se portent au pôle positif; mais ces termes n'ont pas été généralement adoptés.

**1964. Conditions de l'électrolyse.** — Les décompositions produites par les courants dépendent du nombre et de la grandeur des éléments de la pile. Pour que la décomposition ait lieu, il faut évidemment que le courant puisse traverser le corps à décomposer. La propagation est singulièrement facilitée par le fait même de la décomposition; de sorte que, si les affinités à vaincre pour séparer les éléments ne sont pas trop énergiques, le courant peut passer, quoique le corps soit peu conducteur. Si le corps est mauvais conducteur et difficile à décomposer, le courant ne passe pas, à moins qu'il n'ait une forte tension. Il faut donc, pour chaque *électrolyte* placé dans des conditions déterminées, réunir un certain nombre de couples pour que la décomposition commence. Une fois cette condition remplie, la décomposition marche d'autant plus rapidement, que les couples présentent une plus grande surface, c'est-à-dire qu'on fournit une plus grande quantité d'électricité.

La force de décomposition peut vaincre des résistances énormes. Ainsi, M. Gassiot a pu briser, avec explosion, des tubes épais de fer complètement clos, en y décomposant l'eau au moyen d'une faible pile. Du reste, le dégagement d'un gaz par les forces chimiques peut produire de semblables effets, et M. Berthelot a brisé des tubes de verre capables de résister à une pression intérieure de 180 atmosphères, en y dégagant de l'hydrogène au moyen d'eau acidulée et de zinc qu'il y avait introduits. Cela posé, nous allons passer en revue les principales décompositions électrolytiques.

**1965. Décomposition de l'eau.** — Nous avons déjà décrit l'appareil, connu sous le nom de *voltamètre* (1828), au moyen duquel on effectue la décomposition de l'eau; on lui donne des formes très-variées. L'hydrogène et l'oxygène se dégagent séparément sur les électrodes de platine; le premier se rendant seul au pôle négatif, et le second au pôle positif, où ils sont recueillis dans de petites éprouvettes. L'eau distillée peut être ainsi décomposée, mais il faut employer un grand nombre de couples, parce qu'elle est peu conductrice. Quelques couples suffisent quand elle contient un peu d'acide sulfurique, d'acide phosphorique, ou de sulfate de potasse, qui la rendent conductrice et ne sont pas décomposés quand ils sont en très-petites quantités. La chaleur, qui augmente la conductibilité de l'eau, favorise aussi sa décomposition. — Les gaz recueillis sont dans les proportions de 1 volume d'oxygène contre 2 d'hydrogène. Cependant, quand l'opération dure longtemps, ces proportions peuvent être altérées; il manque le plus souvent un peu d'oxygène, qui, à l'état naissant, forme avec l'eau, du *bioxyde d'hydrogène* ou *eau oxygénée*. L'hydrogène peut être ensuite en partie absorbé par l'oxygène de ce composé, qui arrive jusqu'à lui en se répandant dans le liquide.

L'*aluminium* présente une propriété curieuse, signalée par M. Ducretet<sup>1</sup>. Si l'on forme l'électrode *négative* du voltamètre avec une lame d'aluminium, l'autre étant en platine, l'eau est vivement décomposée et le courant passe avec

<sup>1</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. IV, p. 84.



facilité. Mais si l'aluminium forme l'électrode *positive*, il n'y a plus de décomposition, et le courant est presque entièrement intercepté, comme on peut le reconnaître au moyen d'un rhéomètre introduit dans le circuit. Cette propriété ne se présente pas avec l'or, l'argent, le cuivre, le zinc, le magnésium, l'étain, le plomb, etc.; elle est susceptible d'applications importantes, dont nous parlerons en temps et lieu.

**1807. Oxydes alcalins.** — La Décomposition des alcalis, en 1807, est une des plus belles découvertes de Davy<sup>1</sup>. Après avoir essayé vainement de décomposer la potasse en dissolution dans l'eau, au moyen d'une pile de 250 couples, il opéra sur cette substance sèche, rendue conductrice par fusion couples, il opéra sur cette substance sèche, rendue conductrice par fusion ignée, dans une cuiller de platine fixée au pôle positif; il vit paraître à l'électrode négative de platine avec laquelle il touchait la masse en fusion, une flamme jaune qu'il attribua à une matière combustible sortant de la potasse. N'ayant pu recueillir cette matière, il eut l'heureuse idée d'opérer sur un fragment de potasse *ab* (fig. 1363) rendue conductrice par l'humidité, et posé sur une lame de platine, *cd*, fixée au pôle positif d'une pile de 250 couples. Il vit apparaître au pôle négatif des globules d'un éclat métallique, dont la plupart brûlaient avec explosion, quelques-uns se conservant,



Fig. 1363.

mais se recouvrant rapidement d'une couche blanche, en absorbant l'oxygène de l'air. D'autres expériences, faites dans des tubes fermés, lui ont prouvé qu'il se dégage de l'oxygène au pôle positif. Davy reconnut dans les globules produits au pôle négatif, un métal particulier auquel il donna le nom de *potassium*; métal mou comme la cire, plus léger que l'eau, et pouvant la décomposer à la température ordinaire. — Seebeck obtint le potassium à l'abri de l'air, par un moyen qui permet en outre d'employer une pile beaucoup moins forte : on creuse dans le fragment de potasse *ab* (fig. 1363), une cavité qu'on remplit de mercure dans lequel on enfonce le fil négatif de la pile. Le potassium prend naissance au milieu du mercure, et forme avec lui un amalgame, que l'on distille ensuite dans des vapeurs d'huile de naphte, pour vaporiser le mercure. — Si l'on remplit la cavité d'huile de naphte, le potassium apparaît, sous forme de globules, dans ce liquide qui le préserve de l'oxydation; mais il faut alors une pile plus forte, par exemple de 20 à 30 couples à charbon.

Des expériences de Davy et d'autres chimistes, ont montré que les divers alcalis fixes et les substances désignées sous le nom de *terres*, ne sont aussi que des oxydes de certains métaux, qu'on est parvenu à isoler depuis, par des méthodes purement chimiques. Nous citerons en particulier le métal de l'aluminium, que M. Deville est parvenu à obtenir en grandes masses, et qui, peu altérable, léger, très-résistant, s'alliant facilement au cuivre, est des plus précieux pour l'industrie.

<sup>1</sup> Bibliothèque britannique (Sciences et arts), t. XXXIX, p. 2.

Les oxydes anhydres, comme l'oxyde de zinc, les oxydes de cuivre, l'oxyde d'argent..., qui ne sont pas conducteurs, ne peuvent être décomposés à l'état solide ; il faut les dissoudre dans l'ammoniaque, ou bien les fondre par le feu, ce qui les rend le plus souvent bons conducteurs.

**De l'ammonium.** — Davy après avoir découvert que les alcalis fixes sont des oxydes, chercha en vain, à découvrir l'oxygène, dans l'alcali volatil ou ammoniaque. Depuis, Berzelius et Pontin, Seebeck, Trommsdorf,... ont fait des expériences très-curieuses, d'après lesquelles on a supposé l'existence, dans ce composé, d'un radical analogue aux métaux des alcalis fixes. Voici une de ces expériences : on remplit de mercure une cavité pratiquée dans un morceau de sel ammoniac humide communiquant avec le pôle positif d'une pile ; on plonge dans ce mercure une pointe de platine apportant le fluide négatif. On voit bientôt le mercure se gonfler et acquérir un volume 5 à 6 fois plus grand, en prenant une consistance pâteuse. Berzelius a admis qu'il se forme un amalgame d'un métal,  $AzH^4$ , qu'il a nommé *ammonium*, et qui entrerait dans la composition de l'ammoniaque. Les chimistes se sont beaucoup occupés de cet amalgame, et il s'est élevé parmi eux de longues discussions, relatives à l'existence de l'ammonium, qui n'a pu encore être isolé. Cependant on a regardé comme étant l'ammonium pur, un dépôt noir observé récemment sur l'électrode négative de platine, quand on fait passer un courant à travers une dissolution d'ammoniaque au dixième, et qui disparaît promptement après la suppression du courant.

**1967. Acides et composés binaires non oxygénés.** — Quand un acide oxygéné est décomposé par un courant, l'oxygène se dégage toujours au pôle positif, et le corps uni à ce gaz se dépose au pôle négatif. Par exemple, l'acide phosphorique humide, l'acide sulfurique hydraté, donnent du phosphore et du soufre au pôle négatif. On a voulu faire intervenir l'eau dans le phénomène ; mais la décomposition d'oxydes anhydres en fusion, montre qu'elle n'est pas nécessaire. Cependant elle peut jouer un rôle en certains cas, comme, très-probablement, dans la décomposition de l'acide nitrique, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut (1963).

Les acides hydrogénés (acides chlorhydrique, bromhydrique, sulfhydrique...), sont décomposés directement : l'hydrogène se rend toujours au pôle négatif, et l'autre élément, au pôle positif. On opère, soit dans un voltamètre, soit dans un tube en U, dont les branches sont fermées et munies de tubes à recueillir les gaz. — Ajoutons que M. Favre a obtenu la décomposition de l'acide chlorhydrique pris à l'état gazeux.

Les composés binaires métalliques (chlorures, sulfures...), dissous dans l'eau, sont aussi décomposés directement : le métal se portant toujours au pôle négatif. — Quand le métal agit sur l'eau à froid, comme le potassium, la décomposition est suivie d'une action secondaire : au pôle négatif, l'eau est décomposée par le métal, qui forme un oxyde, et l'hydrogène se dégage. — Les iodures sont surtout facilement décomposables : Si l'on imbibe d'une solution d'*iodure de*

potassium, une bande de papier enduite d'amidon, le courant d'un seul couple fait apparaître au pôle positif, une tache bleue due à l'action de l'iode sur l'amidon. — Quand la substance est insoluble, on la fait fondre au feu, et, si elle est alors conductrice, la décomposition a lieu.

L'ammoniaque donne lieu à des *effets secondaires* : l'hydrogène se porte au pôle négatif, et l'azote au pôle positif; là, il rencontre l'oxygène de l'eau décomposée, forme avec lui de l'acide azotique, qui s'unit à l'ammoniaque et produit du sel ammoniac. — Le chlorhydrate d'ammoniaque présente une particularité curieuse : en dissolution saturée, il donne au pôle positif du chlorure d'azote, qui, entraîné par l'oxygène vient produire de petites détonations à la surface, qu'on a recouverte d'essence de térébenthine.

On voit, en résumé, que, dans l'électrolyse des composés binaires, l'oxygène se rend toujours au pôle positif, l'hydrogène et les métaux au pôle négatif. Quant aux composés qui ne contiennent ni oxygène, ni hydrogène, ni métaux, le pôle auquel se rend un élément dépend de celui auquel il est uni. Par exemple, le chlore se rend au pôle *négatif* dans la décomposition de l'acide chlorique, et au pôle *positif*, dans celle de l'acide chlorhydrique.

**1968. Décomposition des sels oxygénés.** — Si l'on fait passer un courant dans une dissolution d'un sel dont le métal n'agit pas sur l'eau à la température ordinaire (sulfate de cuivre, azotate d'argent...), le sel est décomposé, l'acide se porte au pôle positif, avec l'oxygène de la base, et le métal se dépose au pôle négatif. Quand le courant est très-énergique, l'acide lui-même peut être décomposé ; son oxygène se rend au pôle positif, et le corps auquel il est uni, au pôle négatif.

Quand le métal du sel décompose l'eau, on trouve au pôle négatif, la base du sel, et il y a en même temps dégagement d'oxygène au pôle positif, et d'hydrogène au pôle négatif; et nous avons vu comment on peut, avec la teinture de violette, prouver la présence de l'acide et de la base autour des électrodes (1828). Ce résultat peut s'expliquer de deux manières : 1° on peut supposer que l'acide et la base sont simplement séparés, et que leur séparation est accompagnée d'une décomposition d'eau; 2° on peut admettre que les choses se passent d'abord comme avec le sulfate de cuivre; mais que le potassium, mis en liberté au pôle négatif, décompose l'eau, en formant de la potasse, et dégageant l'hydrogène qu'on trouve avec cet alcali au pôle négatif. Cette dernière explication paraît la meilleure; car, si l'on prend pour électrode négative, du mercure renfermé dans un tube recourbé *ac* (fig. 1364), le potassium s'amalgame avec ce mercure, au moins en partie, et échappe ainsi à l'action de l'eau. — Les métaux qui décomposent l'eau à la chaleur rouge (fer, cobalt, nickel, zinc), peuvent aussi former un peu d'oxyde, après s'être déposés à l'électrode négative, et alors il y a dégagement d'un peu d'hydrogène. Nous verrons, en parlant

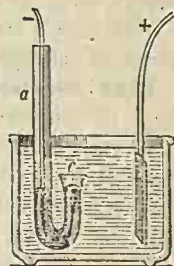


Fig. 1364.

des lois de l'électrolyse, d'autres motifs puissants de préférer la seconde explication à la première.

Quand le métal du sel est capable de former plusieurs oxydes, on peut trouver au pôle positif un oxyde plus oxygéné que la base, formé aux dépens d'une partie de l'oxygène de celle-ci. C'est ce qui a lieu pour les sels de manganèse, qui donnent du peroxyde un pôle positif; pour l'azotate d'argent, avec lequel il se dépose une couche de bioxyde d'argent au pôle positif; pour l'acétate de plomb, avec lequel ce pôle reçoit une couche brune d'acide plombique, pendant que le pôle négatif se recouvre de cristaux de plomb.

Enfin, quand on se sert de piles énergiques, il peut y avoir décomposition de sels engagés dans des masses solides; c'est ainsi que plusieurs physiciens, en décomposant l'eau dans des tubes de verre, avaient trouvé un acide au pôle positif et un alcali au pôle négatif, et avaient pensé que ces matières entraient dans la composition de l'eau. Mais Davy ayant opéré dans des vases de verre, marbre, agate, cire, or, ... reconnut que l'alcali et l'acide provenaient de sels entrant dans la composition du verre, sels qui en se décomposant donnaient de l'acide chlorhydrique et de la soude.

**1969. Décomposition des mélanges.** — Quand l'eau contient plusieurs corps en dissolution, les résultats dépendent de leurs proportions relatives. Ainsi, l'eau seule se décompose quand elle est mêlée d'un peu d'acide sulfurique, et c'est ce dernier corps qui est décomposé quand il contient peu d'eau. Becquerel a reconnu que, en général, lorsque les proportions ne diffèrent pas beaucoup, le corps le moins stable et le meilleur conducteur se décompose de préférence à l'autre<sup>1</sup>. Cependant on reconait toujours l'influence des masses; par exemple, si l'on dissout dans 100 équivalents d'eau, 1 équivalent d'azotate d'argent, puis successivement, 2, 4, 8, 16, 32, 64 équivalents d'azotate de cuivre; l'azotate d'argent est d'abord seul décomposé, et l'azote de cuivre ne commence à l'être que lorsqu'il y en a plus de 60 équivalents; alors les deux métaux se déposent en même temps au pôle négatif, et en même nombre d'équivalents quand la dissolution contient 67 de sel de cuivre contre 1 d'azotate d'argent. S'il y a 87 équivalents de sel de cuivre il se dépose deux fois plus d'équivalents de cuivre que d'équivalents d'argent.

**1970. Substances organiques.** — Les courants peuvent, en certains cas, séparer les principes immédiats des plantes : Davy ayant fait passer le courant d'une pile de 150 couples, à travers une feuille de laurier, trouva, au bout de quelques jours, de l'acide cyanhydrique au pôle positif, et un mélange de chaux, résine et matière verte, au pôle négatif. La feuille était desséchée et comme grillée. Une tige de menthe tenant à la plante, et plongeant dans deux vases pleins d'eau distillée recevant les électrodes, donna, de même, un acide au pôle positif, et de la potasse et de la chaux au pôle négatif. — Peltier, au moyen d'un fort courant, obtint dans une dissolution d'opium, de la morphine

<sup>1</sup> *Traité d'électricité et de magnétisme*, par MM. Becquerel père et fils, t. II, p. 41.

en flocons au pôle négatif, et de l'acide méconique, au pôle positif; d'où on a conclu que la morphine existe toute formée dans l'opium, ce dont on avait pu douter, parce qu'on l'extrait au moyen d'alcalis minéraux<sup>1</sup>. — En général, les sels à base organique, ou à acide organique peuvent être électrolysés, et souvent avec des effets secondaires très variés.

L'alcool absolu étant mauvais conducteur n'est décomposé que par des courants énergiques. L'eau qui entre dans sa composition, est électrolysée, et l'oxygène forme des produits secondaires au pôle positif. En même temps on sent une odeur d'éther, qui n'est que de l'alcool privé d'un équivalent d'eau; et un voltamètre introduit dans le même circuit, donne autant d'hydrogène que l'alcool. Un peu de potasse mêlée à ce dernier liquide le rend conducteur et plus facilement décomposable: M. Connel, avec 60 couples, a obtenu de l'hydrogène au pôle négatif, et au pôle positif, une matière résineuse qui colorait le liquide en rouge; en même temps qu'il se déposait du carbonate de potasse.

L'esprit de bois donne des résultats analogues, mais avec une plus forte pile. L'éther résiste à la décomposition, même quand on y mêle de la potasse<sup>2</sup>,

**Substances animales.** — Un fragment de muscle soumis pendant plusieurs jours au courant d'une forte pile, est privé de ses sels; ses extrémités étant plongées dans des vases pleins d'eau distillée, on trouve dans le vase négatif, des alcalis (potasse, soude, chaux, ammoniaque), et dans le vase positif, des acides (sulfurique, phosphorique, chlorhydrique, azotique). Le morceau de chair devient sec et dur, et si on le brûle, le résidu ne contient aucune trace de matières salines. Les substances vivantes semblent éprouver les mêmes effets: Davy ayant fait communiquer les deux vases, au moyen des doigts bien lavés à l'eau distillée, trouva des acides dans le vase positif, et des alcalis, dans l'autre.

**1971. Electrolyse par l'étincelle de la pile.** — Nous avons vu que les décharges lumineuses de l'électricité sont capables de décomposer les corps (1722); même quand ils sont isolants (éther, huiles grasses, huiles essentielles). L'étincelle des piles à forte tension produit les mêmes effets: M. Melly<sup>3</sup>, en faisant passer, au moyen d'interruptions fréquentes du circuit, des étincelles entre deux fils très-rapprochés engagés dans un tube rempli successivement de divers liquides, a pu les décomposer. Il suffisait d'une pile de 5 à 6 couples de Grove pour décomposer l'huile d'olive, l'essence de térébenthine, l'éther sulfurique, l'alcool absolu, l'alcool à 36°, le naphte, le sulfure de carbone, le chlorure de soufre; liquides que le courant continu d'une pile même plus forte ne pouvait décomposer. Mais il ne put décomposer l'eau pure qu'en employant des fils de cuivre ou des pointes de charbon, dont l'affinité pour l'oxygène s'ajoutait à l'action décomposante de l'électricité, en formant de

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LIV, p. 188.

<sup>2</sup> *Archives de l'électricité*, de A. de la Rive, t. I, p. 401.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 253.

l'oxyde de cuivre ou de l'acide carbonique. Davy, en faisant jaillir l'arc voltaïque dans différents liquides mauvais conducteurs, a pu aussi les décomposer. Mais dans tous les cas, les éléments restaient mélangés. Cela se voit surtout nettement avec certains appareils d'induction, qui permettent d'obtenir de fortes étincelles très-rapprochées. On a conclu de là, que la décharge agit par la chaleur intense qu'elle produit. En effet, Grove a pu, au moyen du platine incandescent, obtenir des décompositions semblables à celles que produit l'électricité sans transport des éléments<sup>1</sup>; il a décomposé, par la chaleur seule, des gaz que décompose une série d'étincelles; et a pu même décomposer l'eau, par exemple, en plongeant dans ce liquide un globule de platine, fondu au chalumeau à l'extrémité d'un gros fil; il se dégage une petite bulle gazeuse formée d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène.

**1972. Circonstances qui influent sur les décompositions électrolytiques.** — Tout ce qui augmente la conductibilité favorise l'électrolyse. Ainsi agit la chaleur, qui facilite la décomposition de l'eau et des dissolutions. L'acide sulfurique concentré n'est pas décomposé; l'eau pure l'est à peine avec de très-fortes piles, et l'on a même attribué ce résultat à l'air dissous, ou à des traces de sels provenant de sa distillation dans des vases de verre; mais si l'on mélange l'acide sulfurique avec l'eau, celle de ces substances qui est en très-grande proportion par rapport à l'autre se décompose, le liquide étant alors bon conducteur.

**Etat physique.** — Les composés secs sont en général mauvais conducteurs; par exemple, la glace, dont une mince couche suffit pour interrompre le courant d'une forte pile. Mais, à l'état de fusion, beaucoup sont conducteurs et peuvent alors être électrolysés. C'est ce que Faraday a expérimenté sur une foule de corps<sup>2</sup>. La substance était desséchée et fondue dans une capsule de platine fixée à l'une des électrodes; quand elle était peu fusible, on la fondait, au chalumeau, sur un petit anneau de platine auquel elle restait adhérente. Une pointe de platine fixée à l'électrode opposée était plongée dans la masse en fusion qui se décomposait. Mais dès que la pointe de platine était enveloppée d'une couche solidifiée, l'action s'arrêtait et un rhéomètre indiquait la cessation du courant.

Parmi les corps sur lesquels Faraday a constaté ce résultat, nous citerons : divers oxydes, potasse, protoxyde de plomb, verre d'antimoine, protoxyde d'antimoine, oxyde de bismuth. — Les chlorures alcalins, ceux de magnésium, manganèse, zinc, plomb, antimoine, argent; et les protochlorures de cuivre et d'étain; les iodures de potassium, zinc, ou plomb; le proto-iodure d'étain, le periodure de mercure; — le fluorure de potassium, auquel M. Beetz a ajouté le fluorure de plomb; — le cyanure et le sulfo-cyanure de potassium; — le sulfure de potassium. — Parmi les sels, le chlorate de potasse, divers azotates, sulfates, phosphates et carbonates; le borax, le borate de plomb, le perborate d'étain, le

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXI, p. 134.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. LV (1834), p. 20.

chromate et le dichromate de potasse; l'acétate et le silicate de potasse; le caméléon minéral. — Chez les corps qui se ramollissent peu à peu, la conductibilité augmente quelquefois graduellement comme la fluidité; il semble donc que la première propriété dépend de la mobilité des molécules. Cependant il y a des corps qui sont conducteurs et électrolysables à une haute température, tout en restant solides. C'est ce que Faraday, M. Buff, M. Beetz, ont constaté sur différentes espèces de verre, et M. Hittorff sur le sulfure d'argent et le sous-sulfure de cuivre. D'un autre côté, la fusion ne rend pas conducteurs certains corps en assez grand nombre, parmi lesquels nous citerons, d'après Faraday; le soufre, le phosphore; l'iodure de soufre, l'orpiment, le réalgar; les acides margarique et oléique, la stéarine; le camphre artificiel, le sucre, le spermaceti, la résine, la gomme arabique; le perchlorure d'étain, l'acide borique. — Il y a même des composés *liquides*, comme le perchlorure d'antimoine, le bichlorure d'étain, les huiles grasses, les huiles essentielles, l'éther, qui ne sont pas conducteurs. On remarque que ces composés ont une formule chimique compliquée.

**1973. Matières mélangées.** — L'affinité chimique des substances mélangées à l'électrolyte, pour les éléments qu'il contient, peut aider à sa décomposition, en provoquant des actions secondaires, comme l'a constaté Faraday, puis Grove qui a vu la présence de l'oxygène ou de l'hydrogène dans l'eau en favoriser l'électrolyse. M. E. Becquerel<sup>1</sup> a constaté qu'un seul couple de Wollaston incapable de décomposer l'eau acidulée, la décomposait, quand il y mêlait du chlore qui absorbe l'hydrogène<sup>2</sup>, ou du sulfate de protoxyde de fer qui absorbe l'oxygène. — Le même physicien a comparé les affinités de différents corps pour l'hydrogène et l'oxygène, au moyen des quantités de ces gaz absorbées dans différents voltamètres placés dans le même circuit, et dont l'eau contenait du chlore, du brome, de l'iode, ou un peu d'acide sulfurique. En retranchant des volumes de gaz dégagés dans l'eau acidulée, les volumes recueillis dans chacun des autres liquides, il obtenait les quantités d'hydrogène et d'oxygène absorbées. Il rangea les trois substances, relativement à leur affinité pour l'hydrogène, dans l'ordre suivant : *chlore, brome, iode*; et dans l'ordre inverse, quant à l'affinité pour l'oxygène; ce qui est d'accord avec les données de la chimie.

**1974. Influence des électrodes.** — Quand l'une des électrodes peut se combiner avec un des éléments de l'électrolyte, la décomposition est facilitée, comme nous en avons déjà vu un exemple dans l'action du mercure sur la décomposition de la potasse (1966), et comme cela a lieu quand l'électrode positive est oxydable. Ainsi, un seul couple incapable de décomposer l'eau acidulée avec des électrodes d'or ou de platine, la décompose quand l'électrode positive est formée d'un métal oxydable. Il suffit même, comme l'a constaté M. Schœnbein<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. I, p. 384.

<sup>2</sup> Si l'on emploie plusieurs couples, l'hydrogène se dégage trop vite pour être entièrement absorbé par le chlore, qui n'arrive pas assez vite au pôle négatif.

<sup>3</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. II, p. 241.

que cette électrode ait été plongée préalablement dans du gaz hydrogène ; seulement, l'action cesse au bout de peu de temps. On obtient des résultats semblables, si l'on recouvre l'électrode négative d'une matière avide d'hydrogène : par exemple, de peroxyde de plomb ou d'argent, d'oxyde de cuivre ou d'étain, d'acide nitrique concentré, et, en général, d'une matière cédant facilement son oxygène. On peut aussi employer des lames de cuivre, fer, palladium, plomb..., oxydées à leur surface par la chaleur ; des lames de platine plongées préalablement dans l'oxygène, dans le chlore ou dans le brome gazeux.

Le *palladium*, qui absorbe l'hydrogène à froid (I, 465), et qui, d'après Graham ; augmente alors de volume, produit des effets curieux, constatés par M. Poggendorf<sup>1</sup>. Si l'on forme l'électrode négative du voltamètre d'une lame mince de palladium, on la voit bientôt se courber en s'éloignant de l'électrode positive en platine ; puis, au bout de 15 à 20 minutes, se redresser et se courber vers le platine, qu'elle touche, ce qui fait cesser la décomposition. La lame de palladium a d'abord absorbé l'hydrogène par sa face interne, puis par sa face extérieure.

**1975. Électrode soluble.** — Quand l'électrode positive est de même nature que le métal d'une dissolution saline saturée, cette électrode se dissout dans l'acide qui se porte à sa surface, et forme un sel remplaçant celui qui a été décomposé, de manière que la dissolution tend à conserver son état de saturation. Il est évident que la quantité de métal qui est enlevée à cette *électrode soluble* doit être tout au plus égale à celle qui se dépose au pôle négatif. Or il arrive quelquefois, notamment pour les sels de cuivre, qu'il y a un peu plus de métal enlevé à l'électrode positive. Ce fait, constaté par Jacobi, a été étudié par M. E. Becquerel<sup>2</sup>, qui a reconnu que la dissolution de *sulfate de cuivre acidulé*, ou de sulfate de cuivre du commerce, qui est toujours un peu acide, donne quelques centièmes de perte de plus au pôle positif que de gain au pôle négatif ; mais, avec du sulfate bien neutre, il n'y a plus que quelques millièmes de différence en faveur de l'un ou de l'autre pôle. Les différences observées doivent donc être attribuées à la présence de l'acide, acide qui fait, comme nous le verrons (2000), que l'*électrolyse* du sel est accompagnée d'une décomposition d'eau, dont l'oxygène à l'état naissant s'unit à du cuivre, pour former un oxyde qui se combine avec l'acide que contenait d'avance la dissolution.

## II. Du transport des éléments aux électrodes.

**1976. Transport des éléments à travers plusieurs dissolutions.** — Une des circonstances les plus remarquables des décompositions électrolytiques est l'apparition des éléments séparément à la surface des électrodes ; si l'on en

<sup>1</sup> *Traité d'électricité et de magnétisme*, par MM. Becquerel père et fils, t. II, p. 28.

<sup>2</sup> *Ann. de Pogg.*, t. CXXXVI, p. 483, et *Ann. de ch. et de phys.*, 4<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 505.



trouve à une certaine distance de cette surface, c'est qu'ils se diffusent dans le liquide. On rend la diffusion évidente en disposant des cloisons membraneuses auprès des électrodes ; les matières mises en liberté ne les dépassent jamais. Berzélius et Hisinger ont, les premiers, appelé l'attention sur ce phénomène ; mais c'est Davy qui en a montré toute l'importance, au moyen d'expériences variées, et a fait voir qu'il peut se produire même à travers une série de dissolutions placée dans des vases différents réunis par des conducteurs humides.



Fig. 1365.

Considérons trois vases *a*, *m*, *c* (fig. 1365), réunis deux à deux par une mèche mouillée, *A*, d'amianté ou de coton, ou par un tube en siphon, *T*, rempli d'eau ou d'argile humide. En *a* est une dissolution d'un sel neutre alcalin ; en *c* et en *m*, de l'eau distillée, et les liquides des trois vases sont colorés avec du sirop de violettes. Dès que le courant est établi, la base du sel apparaît à l'électrode négative, autour de laquelle la liqueur devient verte ; et l'acide, à l'électrode positive, où elle prend la couleur rouge. Le liquide de *m* ne change pas de couleur ; cependant, il a dû être traversé par l'acide se rendant dans le vase *c*, si le vase *a* reçoit l'électrode négative, ou par la base, si ce vase reçoit l'électrode positive.

Si l'on remplit la capsule *m*, d'une solution de potasse, et si la dissolution saline est dans le vase négatif, l'acide apparaît encore au pôle positif, après avoir traversé la potasse sans se combiner avec elle. Si, le sel étant dans le vase positif, le vase *m* contient un acide, la base apparaît de même en *c*, après avoir traversé cet acide. Il faut une pile assez forte et un temps assez long pour que ces effets se manifestent, l'eau conduisant mal l'électricité.

Quand l'acide et la base qui se rencontrent en *m* peuvent former un sel insoluble, ils se combinent et précipitent, et le vase *c* ne reçoit plus l'élément qui devait s'y rendre. Par exemple, s'il y a du sulfate de potasse dans le vase négatif, une dissolution de baryte placée en *m* arrêtera l'acide sulfurique. De même, de l'acide sulfurique placé en *m* arrêtera la baryte provenant de la décomposition d'un sel de baryte placé dans le vase positif. Si la capsule *m* contenait du sulfate de potasse, il s'y précipiterait du sulfate de baryte, et la potasse se montrerait à l'électrode négative.



Fig. 1366.

**Électrodes liquides.** — Quand une base est insoluble ou peu soluble dans l'eau, comme la magnésie, et que le vase moyen est rempli d'eau, cette base s'y arrête en se précipitant. Voici comment Faraday a disposé l'expérience : un vase *V* (fig. 1366) est partagé en deux par une cloison *c* qui ne va pas jusqu'au

fond; on y verse une dissolution de sulfate de magnésie, en ayant soin de ne pas mouiller le vase et la cloison au-dessus du niveau; puis, on verse en *e*, avec précaution, de l'eau distillée qui refoule la dissolution saline en *m*, et se trouve séparée de cette dissolution par la surface de niveau *o*. Une lame de platine coudée *n*, étendue sur la surface de l'eau, communique avec le pôle négatif de la pile; une autre lame *p*, plongée dans la dissolution, communique avec le pôle positif. On voit bientôt la magnésie se déposer à la surface de niveau *o*, l'eau jouant le rôle d'électrode négative. — On opère plus simplement en mettant l'eau et la dissolution dans les deux branches d'un tube en U.

Si l'on établit les communications au moyen d'arcs métalliques, leurs extrémités servent d'électrodes et reçoivent, dans chaque vase, les éléments séparés. Il n'y a que les conducteurs humides qui puissent ne pas jouer le rôle d'électrodes; nous verrons dans quelles conditions (1980).

**1977. Applications à la médecine.** — MM. Vergnès et A. Pocy ont tiré parti du transport qui se fait à travers les tissus vivants, pour extraire des organes, même des os, les substances métalliques qui peuvent y avoir été introduites par l'usage de remèdes contenant des métaux, par absorption cutanée, ou par la respiration de vapeurs ou de poussières métalliques répandues dans l'air de certains ateliers. Le malade est placé dans une baignoire isolée, remplie d'eau acidulée et communiquant avec le pôle négatif d'une forte pile. Il repose sur un banc de bois, et tient dans sa main un cylindre de fer communiquant avec le pôle positif de la pile et entouré de linges mouillés, pour intercepter la chaleur. Les métaux ne tardent pas à quitter les tissus et à venir se déposer sur les parois de la baignoire<sup>1</sup>.

On peut aussi, au moyen d'un courant, introduire diverses substances dans la profondeur des organes. Par exemple, pour l'iode, on applique sur la peau un linge imbibé d'une solution d'iodure de potassium, sur lequel on appuie une lame de platine communiquant avec le pôle *positif* de la pile. On fait communiquer le pôle *négatif* avec des aiguilles de platine enfoncées dans les tissus par le procédé de l'acupuncture, et, au bout de quelque temps, on reconnaît sur ces aiguilles la présence de l'iode qui a traversé les tissus.

**1978. THÉORIE DE GROTHUSS.** — Le phénomène de l'apparition des éléments aux électrodes a toujours excité à un haut degré l'attention des physiiciens. Biot a cherché à l'expliquer par un mouvement de transport direct des éléments; mais il est difficile de concevoir ce transport dans un grand nombre de cas. Nous avons vu (1828) comment Grotthuss, dès 1805, est parvenu à rendre compte des particularités nombreuses du phénomène. Cette explication, qui avait été pressentie par Fourcroy, convient à tous les composés binaires. Elle s'applique également aux sels métalliques, quand on les considère, suivant la théorie des hydracides, comme composés d'un métal et d'un radical formé de

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XL, p. 225, et *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sciences), t. XXVIII, p. 208.

l'acide et de l'oxygène de la base. Par exemple, le sulfate de cuivre  $\text{CuO}$ ,  $\text{SO}^3$ , formerait le composé binaire  $\text{Cu}$ ,  $\text{SO}^4$ , donnant du cuivre au pôle négatif, et le produit  $\text{SO}^4$ , ou  $\text{SO}^3 + \text{O}$ , au pôle positif.

Si l'on considère les sels, suivant la théorie de Lavoisier, comme formés d'un acide uni à une base, l'action est plus compliquée, et il faut faire intervenir les éléments de l'eau<sup>1</sup>. Considérons une série AB de molécules d'un sel (fig. 1367); les triangles représentent les molécules d'acide, et les carrés les molécules de métal; les molécules d'oxygène et les molécules d'eau  $e$ ,  $e'$ ,  $e''$  sont représentées au moyen de ronds blancs ou noirs. La série AB prendra l'état indiqué en  $ma$ . Il se dégagera, au pôle positif, une molécule d'acide  $a$  et une molécule d'oxygène  $o$  venant de la base. La molécule de métal  $n$  s'unira à l'oxygène de la molécule d'eau  $e$ , pour former une nouvelle molécule de base, qui s'unira à la molécule d'acide  $a'$ ; l'hydrogène de l'eau s'emparera de l'oxygène de la molécule de base unie à  $a'$ , et le métal mis en liberté ira se combiner avec l'oxygène de la molécule d'eau  $e'$ ..., et ainsi de suite, de manière qu'il se déposera un atome de métal  $m$ , sans dégagement d'hydrogène, comme le montre l'expérience. On voit pourquoi l'état de dissolution et de fusion favorisent la décomposition; les molécules ayant alors une mobilité qui leur permet de se prêter aux décompositions et recompositions successives qui accompagnent l'électrolyse.



Fig. 1367.

Nous voyons maintenant pourquoi on qualifie d'*électro-positifs* les corps qui se dégagent au pôle négatif, et d'*électro-négatifs* ceux qui se dégagent au pôle positif (1828). L'hydrogène, les métaux, les bases, sont électro-positifs, et l'oxygène et les acides, électro-négatifs. Cependant, comme un même corps peut être tantôt électro-positif, tantôt électro-négatif, suivant la nature de celui auquel il est associé (1967), il faut que l'état électrique des molécules dépende de la nature de ce second élément, ou bien que les éléments soient constitués dans l'état électrique qui précède la décomposition, par l'influence même des électrodes, qui les polarisent. Cette dernière manière de voir, adoptée par De La Rive, satisfait à toutes les conditions du phénomène.

**1979. Cas de plusieurs dissolutions.** — Si, au lieu de traverser une seule dissolution, le courant en traverse plusieurs, il y a réellement transport de certains éléments, mais toujours par des décompositions et recompositions successives. Considérons d'abord deux dissolutions, par exemple, de sulfate de potasse et d'azotate de soude, séparées par une cloison poreuse, ou placées dans un tube en U. Représentons, dans la série NS (fig. 1368), les molécules d'acide par des triangles, et les molécules de métal, par des carrés, les figures étant noires pour l'acide azotique A et le sodium N, et blanches pour l'acide

<sup>1</sup> Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse, 5<sup>e</sup> série, t. VI, p. 415.

sulfurique S et le potassium K; le petit cercle blanc représentant la molécule d'oxygène de chaque base. Une suite de décompositions et de recompositions successives mettra d'abord la série dans l'état indiqué en N'S', et il y aura une molécule d'acide sulfurique libre en S', et une molécule de soude en N'; en a, il se formera une molécule d'azotate de potasse. Les molécules de la série N'S' s'orienteront ensuite comme en N<sub>1</sub>'S<sub>1</sub>' et cette série prendra ensuite l'état indiqué en N''S'', ou N<sub>1</sub>''S<sub>1</sub>'', et enfin l'état indiqué en K'A', où l'on voit, en A', une molécule libre d'acide azotique, et en K' une molécule libre de potasse. La série ne contient plus autant de molécules que dans le principe, mais des molécules du liquide ambiant viennent remplacer celles qui disparaissent, et combler les vides qu'elles laissent au milieu de la série, d'où les actions électriques tendent à les éloigner. On voit que les électrodes ne recevront, au premier moment, que de l'acide sulfurique et de la potasse, c'est-à-dire l'acide ou la base des sels dans lesquels ils plongent; ce qui est d'accord

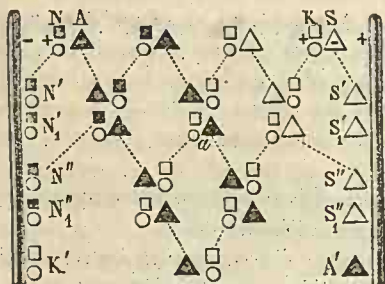


Fig. 1368.

avec l'expérience. Ce n'est que plus tard que l'acide azotique ira se joindre à l'acide sulfurique, et la soude à la potasse. Il serait facile d'étendre le raisonnement qui précède au cas où l'on aurait plus de deux dissolutions différentes les unes à la suite des autres.

Si le second sel est remplacé par une base que l'acide du premier devra traverser pour se rendre au pôle positif, on raisonnera encore

de la même manière : la base du vase moyen (*fig. 1365*) s'unira à la molécule acide mise en liberté au point de jonction des deux liquides, et, par des combinaisons et des décompositions successives avec les molécules de base, cette molécule d'acide cheminera vers l'électrode positive. Si l'acide devait traverser de l'eau pure, une base ou un acide, on raisonnerait de même.

On comprend maintenant pourquoi la dissolution interposée n'arrête pas les éléments qui la traversent. Ce n'est pas, comme on l'a dit, parce que le passage de l'électricité modifie les affinités, mais parce que les molécules qui cheminent passent d'une molécule à l'autre par des combinaisons et des décompositions successives. Les teintures végétales se comportent comme des sels. Par exemple, on peut regarder le sirop de violettes comme formé d'une matière verte jouant le rôle de base, unie à une matière rouge jouant le rôle d'acide. On s'explique facilement alors pourquoi la couleur n'est pas altérée par le passage d'un acide ou d'une base.

**1980. Substances qui peuvent servir d'électrodes.** — Supposons maintenant que les vases *a*, *m*, *c* (*fig. 1365*) soient réunis par des arcs métalliques; les molécules mises en liberté à la surface du métal ne pouvant se

combiner avec lui, ou, si cela a lieu, la combinaison ne pouvant se dissoudre dans le métal, l'action s'arrêtera à la surface; c'est donc là que se formera le dépôt. On peut citer à ce sujet une ancienne expérience du temps de Volta : on suspend horizontalement dans de l'eau acidulée, un arc de platine, dont les bouts ne sont qu'à 2 à 3<sup>mm</sup> des électrodes; l'oxygène et l'hydrogène se dégagent sur les extrémités de cet arc, et si on l'enlève, ils ne se dégagent plus que sur les électrodes. — S'il se forme un sel insoluble, l'action ne peut se propager au-delà, et le liquide dans lequel se forme le précipité sert d'électrode. Il en est de même de l'eau, quand il y arrive de la magnésie dont les molécules ne peuvent se combiner avec elle, la magnésie étant insoluble. L'air même peut servir d'électrode, comme dans l'expérience des décompositions par l'électricité de tension (1723), parce qu'il ne peut dissoudre les éléments qui se dégagent à la surface de séparation.

On peut, du reste, prendre pour conducteur humide ne jouant pas le rôle d'électrode, une foule de matières différentes. Davy a employé de l'amiante, du coton mouillés, de la chair musculaire, et même deux doigts de la main. Dans ces derniers cas, le transport des éléments doit se faire à travers les doigts, ce qui semble difficile à concevoir; cependant la décomposition des sels renfermés dans les muscles, et le transport de leurs éléments aux électrodes (1970), l'extraction des matières métalliques renfermées dans les organes (1977), montrent bien la possibilité d'un pareil mouvement chimique à travers les tissus vivants.

### III. Polarisation des électrodes.

**1981. Dépôts aux électrodes.** — Les lames de platine qui servent d'électrodes acquièrent la propriété de donner un courant quand on les réunit par un fil métallique, après avoir supprimé la pile. Ce *courant secondaire*, découvert, en 1801, par Gautherot, est dirigé en sens inverse de celui que la pile avait fourni. Il se produit encore quand on plonge les lames de platine dans un liquide autre que celui qu'elles ont servi à décomposer, même quand on les a essuyées et lavées à l'eau. On peut montrer l'existence de ce courant, sans employer de rhéomètre : on décompose l'eau dans deux voltamètres V, V' (fig. 1369), réunis dans le même circuit par un fil métallique m. Au bout de quelque temps, on sépare la pile, des fils f, f', et l'on fait communiquer les liquides des vases, au moyen d'une mèche de coton mouillé c. On voit les gaz continuer à se dégager pendant quelque temps sur les électrodes que réunit le fil m; seulement l'hydrogène apparaît là où se dégageait l'oxygène, et *vice versa*.

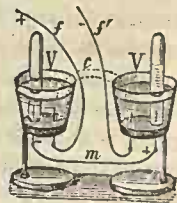


Fig. 1369.

Le courant secondaire est dû aux substances solides, liquides ou gazeuses, déposées, comme un enduit, sur les électrodes, qui sont dites alors *polarisées*;

expression assez mal choisie, parce qu'elle a déjà été employée dans un autre sens (1645)<sup>1</sup>. Ces substances réagissent les unes sur les autres à travers le liquide, et produisent un courant, qui va, dans ce liquide, du dépôt qui joue le rôle de base à celui qui joue le rôle d'acide (1836). Pour le prouver, il suffit de tremper des lames neuves, l'une dans un acide, l'autre dans une base, de les réunir par un rhéomètre après les avoir essuyées et lavées, et de les plonger dans de l'eau; on a aussitôt un courant. Nous avons vu (1853) comment on prouve la production des courants secondaires par les dépôts gazeux. Nous avons aussi indiqué le rôle de la polarisation des lames dans l'affaiblissement des piles voltaïques (1853), et dans les expériences sur l'électricité produite par les actions chimiques (1837).

**1982. De l'unipolarité des flammes.** — Si l'on plonge dans la flamme d'une lampe, entre deux électrodes qui s'y enfoncent, un fil métallique communiquant avec le sol, l'électrode négative se décharge, et l'électroscope indique que la tension de l'électrode positive augmente, comme lorsqu'on fait communiquer le pôle négatif avec le sol. Il semble donc que la flamme ne laisse écouler que l'électricité d'un seul pôle. Pour observer nettement ces résultats, découverts en 1802, par Erman, il faut que la pile soit isolée et d'assez forte tension. Dans la flamme du phosphore, les effets sont inverses, et l'électrode positive se décharge. Ce phénomène a été désigné sous le nom d'*unipolarité*. Ohm est parvenu à l'expliquer par le dépôt de substances isolantes sur l'une ou sur l'autre électrode, suivant la nature des flammes. Cette explication se confirme quand on rapproche les phénomènes d'unipolarité des flammes, de ceux que manifestent certains corps solides ou liquides, particulièrement le blanc d'œuf, le savon. Si l'on enfonce les électrodes d'une forte pile dans un morceau de savon sec, le courant est presque complètement intercepté. Si ensuite on fait communiquer le savon avec le sol, le pôle négatif se décharge, et le pôle positif acquiert le maximum de tension qu'il prend quand le pôle négatif communique avec le sol. Ohm a fait voir que cette propriété du savon n'existe pas au premier moment, mais qu'elle se développe pendant le passage du faible courant qui traverse le savon; cette substance étant décomposée, et déposant à l'électrode positive des acides gras complètement isolants, tandis que l'électrode négative reçoit les bases. Si l'on met le fil négatif bien exactement dans le trou qu'occupait le fil positif au premier moment, c'est ce dernier qui se décharge, le fil négatif se trouvant enveloppé de la couche isolante déposée dans le trou pendant la première partie de l'expérience.

L'explication de Ohm a été confirmée par les expériences de M. Hankel, faites sur la flamme d'alcool, au moyen de 1 ou 2 couples seulement, ce qui lui a permis de mesurer les tensions<sup>2</sup>. Il a constaté que la tension de l'électrode

<sup>1</sup> Il serait à désirer qu'on adoptât un autre terme; par exemple, *chrismalé* (χρῖσμα, ατος, enduit) *Chrismation* remplacerait alors le mot *polarisation*.

<sup>2</sup> *Mém. de Société roy. de Saxe*, t. VI, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3<sup>e</sup> série, t. LIX, p. 484.

*positive* est presque annulée, et celle de la *negative* presque doublée, comme cela doit être, s'il y a une très-grande résistance à la surface de l'électrode *negative*.

**1983. Résistance des diaphragmes métalliques.** — La polarisation secondaire explique l'affaiblissement qu'éprouve un courant quand il traverse des diaphragmes métalliques interposés dans une colonne liquide; comme on peut en faire l'expérience en distribuant le liquide dans plusieurs vases de verre dans lesquels plongent les lames métalliques recourbées. Ce phénomène, signalé d'abord par Ritter, a été étudié, en 1825, par De La Rive, puis par M. Marianini et M. Marié-Davy. Voici les lois trouvées par De La Rive<sup>1</sup>:

1° La résistance au passage dépend de la nature du liquide, et de celle du métal, même quand il n'est pas attaqué; pour le platine, elle est plus grande avec l'acide sulfurique qu'avec l'acide chlorhydrique, et avec ce dernier qu'avec l'acide azotique, surtout concentré. 2° L'intensité du courant peut renverser le rapport des résistances observées avec un même métal et deux liquides différents. Par exemple, quand le courant est intense et les cloisons en platine, la résistance est moindre dans l'acide chlorhydrique que dans l'acide nitrique. Il en résulte que, si l'on augmente le nombre des diaphragmes, ce qui affaiblit le courant, on peut, avec le même appareil, voir le courant l'emporter, tantôt dans l'acide nitrique, tantôt dans l'acide chlorhydrique. 3° Un métal affaiblit d'autant moins le courant, qu'il est plus oxydable; ainsi, le zinc produit moins d'effet que le platine. 4° Un courant éprouve une perte d'autant plus petite en traversant un diaphragme, qu'il en a déjà traversé un plus grand nombre d'autres. 5° La perte est d'autant plus faible que l'étendue des diaphragmes est plus grande, 6° Elle ne semble pas dépendre de l'épaisseur de la couche de liquide qui sépare les diaphragmes. 7° Poggendorff a reconnu que la perte diminue quand la température s'élève.

On avait d'abord attribué l'affaiblissement des courants par les diaphragmes à une résistance spéciale au passage de l'électricité, du métal dans le liquide et réciproquement. Il est probable qu'une semblable résistance existe; mais on a reconnu, Ohm le premier, que la résistance est due principalement à la polarisation des lames, due à la décomposition du liquide les dépôts formés diminuant l'intensité du courant, soit en produisant un courant contraire (1853), soit en arrêtant le passage de l'électricité. Pour confirmer cette explication, De La Rive a fait passer le courant alternativement en sens contraire, de manière à empêcher les dépôts, et il n'y a plus eu d'affaiblissement. Quelques-unes de ces expériences ont été faites avec un appareil d'induction qui permettait de changer le sens du courant 27 fois par seconde. L'intensité du courant ne pouvant, dans ce cas, être mesurée par le rhéomètre, dont l'aiguille serait constamment agitée, De La Rive l'évaluait par l'échauffement de l'hélice d'un thermomètre de Breguet (1934). — M. Worsellmann de Heer<sup>2</sup>, ayant employé un courant instantané,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 203, et t. XXXVII, p. 225.

<sup>2</sup> *Archives de l'électricité*, de A. De La Rive, t. I, pp. 539 et 581.

de manière à pouvoir se servir d'un rhéomètre pour en mesurer l'intensité, puis ayant fait aussitôt passer le courant secondaire par un second rhéomètre, a toujours vu ce dernier courant être d'autant plus intense que les diaphragmes affaiblis avaient davantage le courant instantané.

Nous devons dire cependant que quelques physiciens ont trouvé que la résistance propre au passage forme une grande partie de la résistance observée<sup>1</sup>; mais les uns paraissent n'avoir pas assez rapproché les changements de sens du courant, pour empêcher la polarisation, et les autres ont supposé que le courant instantané qu'ils employaient n'avait pas le temps de polariser les lames; or la décharge d'une bouteille de Leyde suffit pour donner lieu à un courant secondaire. Nous pensons donc, avec De La Rive, que la résistance propre au passage d'un métal dans un liquide, ou réciproquement, n'a que peu d'influence, et que la diminution d'intensité du courant est due principalement à la polarisation secondaire des lames métalliques.

**1984. Anneaux de Nobili.** — Quand le dépôt sur les électrodes est en couche très-mince, il présente des couleurs irisées semblables à celles que donnent les lames excessivement minces, comme nous le verrons dans l'Optique. Nobili, qui, le premier, a remarqué ces couleurs, et leur a donné le nom d'*apparences électro-chimiques*<sup>2</sup>, opérait ainsi : on fait communiquer avec l'un des pôles d'une pile, une plaque horizontale de platine, argent ou acier, *ab* (fig. 1370), garnie d'un rebord en cire, sur laquelle on verse une dissolution électrolytique. On enfonce verticalement dans cette dissolution un fil de platine communiquant avec l'autre pôle, et enveloppé d'une matière isolante, excepté à son extrémité, qui est en pointe très-fine et placée à une distance de 1 à 2<sup>mm</sup> de la plaque; et

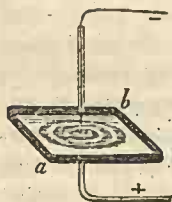


Fig. 1370.

l'on fait passer le courant d'une pile à auges d'une douzaine de couples. Il se forme alors sur la plaque, en quelques secondes, autour de la pointe, des anneaux de différentes couleurs, dus à un dépôt d'oxyde ou de métal, quand la plaque est négative; et probablement à une altération de la surface par les acides, quand elle est positive. Plus brillants, en général, quand la plaque reçoit l'électricité positive, ils sont souvent alternativement clairs et sombres. D'autres fois, comme avec l'acétate de plomb, ils présentent les couleurs de l'arc-en-ciel; mais il ne faut pas trop prolonger l'expérience, car alors le dépôt de peroxyde de plomb deviendrait trop épais pour produire des couleurs. Nobili a fait un très-grand nombre d'expériences avec des dissolutions de divers sels ou de substances animales, et des suc de plantes. Les matières organiques donnent généralement les plus belles couleurs. Si l'on présente à la plaque deux pointes assez rapprochées l'une de l'autre, communiquant avec le même pôle de la pile, on a

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. De La Rive, t. I, pp. 177 et 497.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XXXIV, pp. 280 et 419.



deux systèmes d'anneaux, qui se rapprochent dans les parties voisines. Si, au contraire, la plaque étant isolée, les pointes apportent les électricités contraires, les anneaux se déforment comme s'ils se repoussaient; ce qui s'explique par la réunion, à travers le liquide, d'une partie des électricités passant d'une pointe à l'autre sans arriver jusqu'à la plaque. Une cloison de verre placée dans le liquide entre les deux pointes empêche les anneaux de se déformer. Nobili est parvenu à former des dessins variés au moyen des couleurs déposées sur les plaques; mais il n'a pas publié sa méthode. Il opérerait probablement en faisant mouvoir une ou plusieurs pointes présentées tout près de la plaque, et en employant des mélanges de diverses dissolutions. Plusieurs physiiciens, MM. E. Becquerel, Beetz, Du Bois-Reymond..., se sont aussi occupés des apparences électro-chimiques.

**1985. Passivité du fer, etc.** — Certains métaux oxydables, surtout le fer, acquièrent dans des circonstances spéciales, particulièrement quand on les plonge comme électrodes positives dans de l'eau contenant des acides oxygénés, la propriété de n'être plus attaqués par ces mêmes acides, entre autres par l'acide azotique, même concentré. Ce phénomène singulier a attiré l'attention de plusieurs physiiciens, particulièrement de M. Schœnbein, qui a donné le nom de *fer passif* au fer rendu ainsi inattaquable, et l'a appliqué à la construction de couples énergiques (1859). Voici les principaux résultats qu'il a constatés<sup>1</sup>: après avoir reconnu l'influence d'une électrode positive oxydable sur l'électrolyse de l'eau par un seul couple (1974), il vit qu'un fil de fer pris pour électrode positive ne donnait aucun résultat, quand on le plongeait dans l'eau acidulée du voltamètre pour fermer le circuit; car il ne se dégagait pas d'hydrogène à l'électrode négative en platine.

Faraday explique la passivité du fer par la formation à sa surface, d'une légère couche, ordinairement d'un oxyde, inattaquable par les acides. Dans l'électrolyse de l'eau acidulée, la pellicule inattaquable se forme aux dépens de l'oxygène d'un peu d'eau décomposée au premier instant. Si l'on touche, dans le liquide, le fer passif avec un métal oxydable, on forme ainsi un couple qui décompose l'eau, et l'hydrogène dégagé à la surface du fer détruit la couche d'oxyde. L'électrode négative en platine produit le même effet qu'un métal oxydable, parce qu'elle a été recouverte au premier instant d'une pellicule d'hydrogène. Si l'on réunit les électrodes par un fil de cuivre, ce fil détourne le courant, et forme avec les électrodes, un couple donnant un nouveau courant, qui passe à travers le liquide et détruit la pellicule qui recouvre le fer. Celui-ci est donc attaqué pendant quelques secondes, quand ensuite, le fil de cuivre étant enlevé, le courant traverse de nouveau l'eau acidulée.

Les faits suivants, observés par M. Schœnbein, s'expliquent moins facilement. Les électrodes étant réunies par un fil de cuivre de 1<sup>mm</sup> de diamètre, il n'y a aucune décomposition quand sa longueur est inférieure à 16<sup>cm</sup>. A partir

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. II, p. 267, et t. III, p. 81.

de là, elle a lieu, et avec d'autant plus d'activité que la longueur est plus grande, jusqu'à 5 mètres. Si l'on dépasse cette limite, de quelques décimètres, il n'y a plus dégagement de gaz au moment où l'on fait communiquer les électrodes, mais il s'en produit un quelques secondes après, et plus vivement qu'avec des fils courts. Au bout de quelques secondes, le dégagement cesse, puis se reproduit, et il se fait ainsi des alternatives nombreuses, jusqu'à ce que le fer ait complètement repris l'état passif. Ces résultats dépendent évidemment de la dérivation de l'électricité, en plus ou moins grande proportion, dans le fil de cuivre; car, si l'on emploie des fils de différents métaux, les longueurs nécessaires pour obtenir un même résultat doivent être en rapport avec la conductibilité et la section de ces fils, de manière qu'on ait toujours la même résistance.

Les effets qui précèdent se produisent encore quand on mêle à l'eau un acide oxygéné autre que l'acide sulfurique; mais ils n'ont plus lieu avec les hydracides ou les fluorures, chlorures, bromures et iodures.

M. Schœnbein rend encore le fer passif, en l'employant comme électrode positive pour décomposer l'acétate de plomb. Au bout de 30 secondes, le fer se recouvre d'une mince couche de peroxyde de plomb. On le lave à l'eau, et, en l'employant aux expériences ci-dessus, il donne les mêmes résultats, sauf qu'il ne reprend pas momentanément son activité par les moyens énumérés; et même des fils de fer ordinaire servant d'électrode positive en même temps que lui, perdent leur propriété de devenir actifs.

On peut obtenir du fer passif sans l'intervention directe de l'électricité. Bergmann et Kirwann ont vu le fer plongé dans un sel d'argent, dont il précipite le métal, perdre aussitôt la propriété de le précipiter. Braconnot a reconnu que le fer devient passif dans l'acide nitrique concentré, et Herschell a constaté qu'il faut alors un frottement assez fort pour lui enlever sa passivité. M. Martens, qui a trouvé, de son côté, les résultats observés par M. Schœnbein, a vu, de plus, le fer devenir passif dans l'alcool absolu, l'acide acétique, les solutions alcalines<sup>1</sup>; et M. Reuben-Philips, dans les acides chromique, iodique, chlorique, et dans l'eau oxygénée. Enfin, quand on chauffe au rouge une lame de fer bien décapée, elle prend une teinte bleue et devient passive, en se recouvrant d'une pellicule d'oxyde. Il est vrai que le fer devient aussi passif quand on le chauffe dans l'hydrogène; mais M. Beetz a prouvé qu'il ne se produit rien de pareil quand ce gaz est bien pur et bien desséché, ce qui demande des soins minutieux.

Le fer n'est pas le seul métal susceptible de devenir passif par la formation d'une pellicule mince: cette propriété a été constatée sur le *nickel* par M. Beetz, sur le *bismuth* par M. Andrews, et sur le *cobalt* par Nicklès, qui a montré que le cobalt et le nickel ne conservent la passivité produite par l'acide nitrique qu'autant qu'on les a plongés tout chauds dans cet acide, après les avoir bleuis au feu<sup>2</sup>. Grove et M. Schœnbein ont reconnu que le cuivre devient passif

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. III, p. 574.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 280.

quand il forme l'électrode positive, dans de l'acide sulfurique étendu traversé par un très-fort courant ; alors il ne se dissout pas comme avec un courant modéré, et il intercepte bientôt le passage de l'électricité, en se recouvrant d'une couche d'un oxyde particulier.

1996. PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-CAPILLAIRES. — L'altération produite par la polarisation à la surface d'un ménisque de mercure servant d'électrode, y modifie la tension superficielle, de manière que la forme change en même temps que la constante capillaire (1,308). M. Lipmann, qui a découvert ce fait, en a fait une étude spéciale<sup>1</sup>, et s'en est servi pour expliquer les divergences entre les valeurs de la constante capillaire du mercure trouvées par divers physiciens, divergences que l'on attribuait, faute de mieux, à des impuretés inaperçues de la surface. M. Lipmann a prouvé par plusieurs expériences qu'il y a une relation entre la tension capillaire d'un ménisque de mercure en contact avec de l'eau, et la différence de potentiel électrique des deux liquides.

1° Si l'on enfonce dans une bulle de mercure recouverte d'eau acidulée, et placée au fond d'un vase de verre, une pointe de fer ou de cuivre que mouille l'eau, la bulle se contracte et devient plus convexe, sa surface changeant de nature par un dépôt d'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'eau par l'électricité dégagée au contact du métal et de ce liquide.

2° Le mercure d'un réservoir R (fig. 1371) s'étend dans un tube capillaire *aom*, où son niveau *m* est en contact avec de l'eau acidulée par  $\frac{1}{10}$  d'acide sulfurique, contenue dans un siphon *s*, et dans un large vase V, au fond duquel est une couche de mercure. Des fils de platine,  $\alpha$ ,  $\beta$ , font communiquer au dehors le mercure du vase V et celui du tube capillaire. Quand les fils  $\alpha$ ,  $\beta$ , sont réunis, le potentiel est le même de chaque côté du ménisque *m*, qui prend une position fixe, à laquelle il revient quand on l'a déplacé en comprimant le mercure en R. Cette position est, au contraire, variable et incertaine quand les fils  $\alpha$ ,  $\beta$  sont séparés.

Si l'on établit une différence de potentiel de chaque côté du ménisque *m*, en faisant communiquer les fils  $\alpha$ ,  $\beta$ , avec deux points plus ou moins rapprochés d'un circuit parcouru par le courant d'un couple de Daniell, le ménisque prend une nouvelle position fixe, ce qui indique que la constante capillaire a changé par suite de la polarisation due à l'hydrogène dégagé par le courant, qui doit être trop faible pour décomposer l'eau d'une manière continue.

Dans une autre méthode, qui permet de faire des comparaisons indépendantes du calibrage du tube capillaire, un tube ordinaire vertical *t* (fig. 1372), ouvert en *a*, plonge par son extrémité inférieure, très-effilée, *e*, dans l'eau

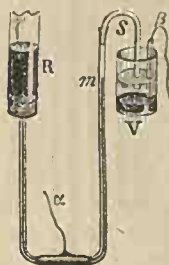


Fig. 1371.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 5<sup>e</sup> série, t. V, p. 494.

acidulée que contient une éprouvette au fond de laquelle est du mercure et un fil de platine  $\beta$ ; un autre fil  $\alpha$  communique avec le mercure du tube  $t$ . La colonne de mercure  $t$ , de 75<sup>cm</sup> de hauteur environ, est soutenue par la tension capillaire en  $e$ , où l'orifice n'a guère que  $\frac{1}{200}$ <sup>mm</sup> de diamètre. Quand les fils  $\alpha$ ,  $\beta$  sont réunis, le ménisque  $e$ , observé au moyen d'un microscope M grossissant 250 fois, reste constant; ce que l'on reconnaît en disposant le microscope de manière qu'un trait horizontal de son micromètre focal paraisse tangent au ménisque. Ce ménisque remonte et prend une nouvelle forme constante, quand on fait passer un faible courant par les fils  $\alpha$ ,  $\beta$ , et l'on peut le ramener à être tangent au même trait, en comprimant de l'air par l'extrémité  $a$ ; l'augmentation de pression nécessaire, mesure l'accroissement de la force capillaire.

M. Lipmann a trouvé, par ce moyen, que la tension, et par conséquent la constante capillaire, augmente à peu près proportionnellement à la force électromotrice de polarisation, jusqu'à ce que la tension ait atteint à peu près 1,47 fois la valeur qu'elle prend quand les fils  $\alpha$ ,  $\beta$ , sont réunis; la différence de potentiel est alors égale à peu près à celle d'un couple de Daniell. Au delà, la tension va en diminuant.

**1987. Électromètre capillaire.** — L'appareil (fig. 1372) constitue un électromètre d'autant plus sensible que le bec  $e$  est plus fin, les changements de tension capillaire étant proportionnels à la tension primitive. Après avoir joint les fils  $\alpha$ ,  $\beta$ , et attendu que le ménisque soit bien fixe, ce qui peut demander plusieurs jours, on dispose le microscope de manière que le trait zéro du micromètre focal paraisse tangent au ménisque. Quand, ensuite, on veut faire une

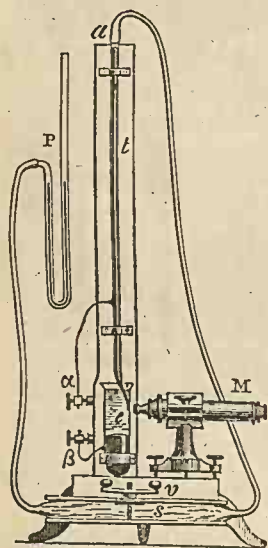


Fig. 1372. —  $\frac{1}{15}$ .

mesure, il suffit de ramener le ménisque à être toujours tangent, en comprimant de l'air en  $a$ . Pour cela, on agit sur une vis à levier  $v$ , qui comprime de l'air logé dans un sac de caoutchouc  $s$ . La pression de cet air est mesurée par le manomètre P. Une table, construite d'avance, donne la force électromotrice correspondante à chaque augmentation de pression. — Cet appareil est tellement sensible, qu'il peut indiquer une force électro motrice moindre que  $\frac{1}{40000}$  de celle d'un couple de Daniell. Il suffit d'en approcher un plan d'épreuve chargé, pour voir le ménisque remonter sensiblement; et il indique l'électricité produite par les contractions musculaires et les mouvements du cœur. De plus, l'exiguïté du ménisque fait qu'il révèle les changements les plus rapides de l'état électrique, changements que les électromètres et rhéomètres ordinaires

ne pourraient manifester. La température, du moins entre 0° et 50°, ne paraît pas influencer ces indications.

**1988. Phénomène inverse.** — Nous avons vu (1986) que la différence de potentiel qui existe à la surface de séparation eau-mercure détermine une déformation de celle-ci, la tension superficielle du mercure augmentant et diminuant en même temps que la différence de potentiel. — Réciproquement, quand on déforme mécaniquement la surface, la différence de potentiel varie dans le même sens que l'étendue de la surface; elle augmente donc quand la surface devient plus grande. Par exemple, si dans l'appareil (*fig.* 1371) on fait varier mécaniquement la position du ménisque *m*, un rhéomètre en rapport avec les fils  $\alpha$ ,  $\beta$ , indique un courant qui va de  $\alpha$  en  $\beta$  par le rhéomètre, si *m* descend, et en sens contraire, s'il monte.

L'expérience est très-simple sous la forme suivante. On met dans deux verres, du mercure recouvert d'eau acidulée. Une mèche de coton mouillé fait communiquer l'eau des deux vases, et des fils de platine, ne touchant pas cette eau, mettent le mercure des deux vases en rapport avec un rhéomètre. Si l'on étend la surface du mercure dans un des verres, en l'inclinant ou en y enfonçant une baguette de bois, le rhéomètre, même peu sensible, indique un courant qui va, par le rhéomètre, vers le mercure déformé, varie régulièrement avec l'étendue de la déformation, se dissipe avec le temps, mais disparaît aussitôt, si l'on rétablit immédiatement l'état du mercure.

On peut obtenir un courant continu, en remplaçant un des deux vases par un entonnoir contenant du mercure, qui en sort goutte à goutte par un bec effilé plongé dans l'eau acidulée de l'autre vase. Quand une goutte se forme et grossit, le mercure de l'entonnoir devient plus négatif que celui du vase dans lequel il tombe, et l'on obtient un courant allant, par le rhéomètre, du vase à l'entonnoir. Ce courant est intermittent, comme la séparation des gouttes; car, si l'on met l'appareil en relation avec un *électromètre capillaire* (*fig.* 1372), on voit le ménisque *e* de celui-ci éprouver des oscillations d'accord avec la séparation des gouttes. En reportant le mercure, du vase dans l'entonnoir, on a un courant indéfini, dans lequel le travail du transport du mercure est transformé en travail électrique. — M. Quincke, en répétant cette expérience avec divers liquides, alcool, eau distillée aérée ou non, eau salée.... a toujours trouvé le courant dirigé dans le même sens.

**1989. Moteur électro-capillaire.** — Comme application des principes précédents, M. Lipmann a imaginé un petit appareil qui transforme le travail électro-capillaire en travail mécanique, et réciproquement. La figure 1373 en représente un modèle construit par M. Dueretet: Deux vases cylindriques de verre *v*, *v'*, contenant du mercure, sont noyés dans de l'eau mêlée à  $\frac{1}{6}$  d'acide sulfurique en volume. Dans ces vases sont des faisceaux de tubes capillaires verticaux *t*, *t'*, plongeant en partie dans le mercure, qui s'y élève jusqu'à une certaine hauteur, la partie supérieure contenant de l'eau acidulée. Les poussées du mercure sur ces deux faisceaux se contrebalancent, quand elles sont égales,

par l'intermédiaire de deux fléaux parallèles, dont un se voit en L, avec lesquels ils sont mis en relation au moyen des tiges de verre  $b$ ,  $b'$ , et de bielles pendantes.

Quand on fait communiquer l'appareil avec un couple de Daniell par les bornes  $p$ ,  $p'$  et les fils de platine  $k$ ,  $k'$ , qui plongent dans le mercure des deux vases  $v$ ,  $v'$ , sans toucher l'eau acidulée, le fléau L s'incline; si le courant entre par le vase  $v$ , la constante capillaire diminue dans les tubes capillaires  $t$ , et dans les espaces qui les séparent, la poussée devient moindre et le faisceau  $t$

s'abaisse, pendant que les effets opposés se produisent dans l'autre faisceau  $t'$ . Le mouvement du fléau L se transmet par le bras  $Lb''$ , dont l'extrémité  $b''$  décrit un arc de cercle, à la manivelle du volant  $r$ . Ce volant, par l'intermédiaire d'un excentrique et de la bielle B, fait osciller un commutateur à bascule d'Ampère B, que nous décrirons plus tard, et qui, à chaque tour du volant, change deux fois le sens du courant; et le fléau oscillant imprime au volant une rotation continue de 100 à 120 tours par minute.

Si, ayant remplacé la pile par un rhéomètre, on fait tourner le volant avec la main, l'aiguille aimantée est déviée dans un sens qui change avec celui de la rotation, et la déviation per-

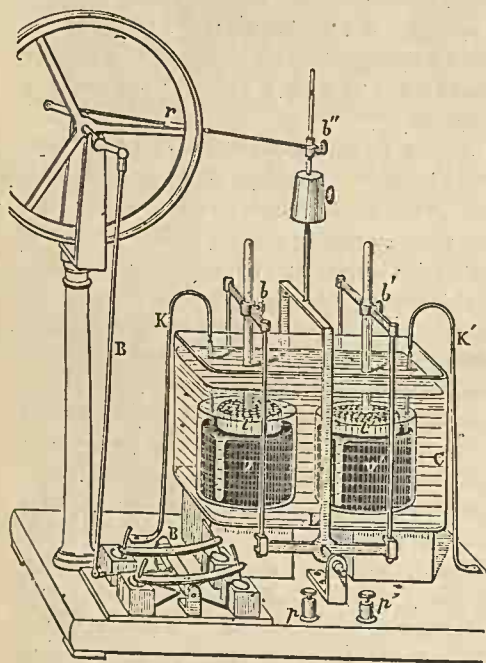


Fig. 1373. —  $\frac{1}{7}$

siste tant que dure le mouvement. L'appareil constitue alors un *électro-moteur* électro-capillaire.

**1990. Mouvements sur le mercure.** — Lorsqu'on fait passer un courant à travers une couche d'un électrolyte recouvrant du mercure, on voit, dans le premier liquide, de rapides tourbillons rendus distincts par les bulles de gaz de l'eau décomposée, ou par des poussières en suspension. Ce phénomène, découvert, en 1801, par Gerboin, sur l'eau pure ou acidulée, a été étudié, en 1809, par Erman, qui a remarqué que la bulle de mercure, quand elle est comprise entre les électrodes, marche de la positive à la négative. Scrullas, W. Herschel, Nobili ont fait ensuite une étude détaillée du phénomène. W. Herschel, en 1824,

a constaté que c'est au contact du mercure que le mouvement est le plus prononcé<sup>1</sup>. Si les électrodes sont en dehors du contour du mercure, le liquide est en repos autour d'eux, et ne se meut qu'au-dessus du métal; c'est donc dans le mercure que se fait le mouvement, et le liquide électrolysé n'y participe que par communication. Ce qui le prouve encore, c'est qu'il suffit d'humecter d'eau acidulée le mercure et le vase qui le contient, pour obtenir une rotation rapide du mercure, quand on fait passer le courant à travers la couche d'humidité. Nobili, en opérant avec des électrodes en pointes, présentées verticalement à une couche de mercure recouverte d'une solution de sulfate de soude, vit des courants rayonner autour des pointes et s'arrêter à des contours correspondants à ceux des *apparences électro-chimiques ordinaires* (1984). Dans l'intérieur de ces contours, le mercure était légèrement déprimé, et il se formait autour de la pointe positive un peu d'oxyde de mercure, qui était transporté par un courant rayonnant, et allait se réduire au pôle négatif. Paalzow ayant amalgamé le mercure avec un métal très oxydable, par exemple le sodium, observa des mouvements beaucoup plus prononcés. Du reste, les effets varient avec la nature des dissolutions. Herschel ayant expérimenté sur un alliage d'étain, plomb et bismuth fondu sous de l'eau sucrée, et Gore sur l'étain, le plomb, le cadmium, le bismuth fondus sous le cyanure de potassium, ils obtinrent des résultats analogues à ceux qu'on observe sur le mercure.

Les phénomènes qui précèdent ont reçu successivement diverses explications. M. Lipmann les rattache aux effets électro-capillaires. Une partie du courant qui traverse l'électrolyte pénètre dans le mercure par certains points, et en sort par d'autres, et produit en ces différents points diverses forces électro motrices de polarisation. Il en résulte des lignes d'égale différence de potentiel, qui sont en même temps des lignes d'égale tension capillaire, et il s'établit des mouvements tangentiels dans le liquide, dépendant des différences entre les états électriques aux différents points.

#### IV. Lois des décompositions électrochimiques.

**1991. Lois de Faraday.** — Les lois des décompositions électrochimiques constituent une des plus belles découvertes de Faraday<sup>2</sup>, auquel la science en doit de si remarquables. Elles ont été généralisées et confirmées par les travaux de MM. Matteucci, Daniell, E. Becquerel, Marié-Davy, et de plusieurs autres physiciens, qui sont parvenus à faire disparaître ou à expliquer les anomalies qui avaient pu faire douter d'abord de leur généralité.

I. *L'action décomposante d'un courant, ou sa puissance chimique, est la même dans toutes ses parties.* Par exemple, si l'on introduit plusieurs

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 280.

<sup>2</sup> *Archives de l'électricité*, de A. de La Rive, t. II, p. 611.

voltamètres dans un même circuit, on trouve, au bout du même temps, des quantités égales d'oxygène et d'hydrogène dans chacun d'eux.

Les résultats sont encore les mêmes quand ces divers voltamètres sont à des températures différentes, et quand l'eau y est rendue conductrice à des degrés différents par de petites quantités d'acides, d'alcalis, de sels. Quand la décomposition n'a pas lieu dans un voltamètre, elle n'a pas lieu non plus dans tous les autres. — La pression ne change rien au dégagement du gaz. M. Leeson a opéré jusqu'à 30 atmosphères, sans que le dégagement parût ralenti.

II. *La quantité de substance décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné.* En effet, si le courant, se bifurquant en *o* (fig. 1374) traverse deux voltamètres identiques *a* et *b*, de manière qu'il passe autant d'électricité dans chacun d'eux, on trouve toujours en *a* et *b*, la même quantité de gaz, égale à la moitié de celle que l'on trouve dans le voltamètre *m*, que traverse une quantité double d'électricité. Si l'un des voltamètres *a* ou *b*, présente plus de résistance que l'autre, la somme des quantités inégales de gaz recueillies en *a* et *b* est toujours égale à la quantité recueillie

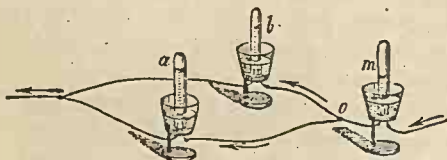


Fig. 1374.

en *m*. L'égalité se remarque, quel que soit le nombre de fils contenant un voltamètre, entre lesquels le courant se subdivise en *o*.

III. *La quantité de substance décomposée en un temps donné est proportionnelle à l'intensité du courant mesurée par le*

*rhéomètre.* Pouillet a fait un grand nombre d'expériences à ce sujet; pour l'eau, il observait le temps pendant lequel il se dégagait 2 centimètres cubes d'hydrogène, et il a toujours trouvé le même nombre, pour le produit de ce temps par l'intensité magnétique du courant. Despretz a constaté le même résultat en employant un grand nombre de couples; il évaluait l'intensité du courant en faisant osciller une aiguille aimantée à une distance constante du fil du rhéomètre<sup>1</sup>.

Pour établir cette troisième loi, il suffit, d'après la seconde, de prouver que les indications du rhéomètre sont proportionnelles aux quantités d'électricité qui passent dans le circuit. Pouillet a procédé à cette démonstration par une méthode directe très-ingénieuse: Il est évident que si l'on fait passer dans un rhéomètre, et par intermittences, un courant d'intensité constante, la quantité d'électricité qui passera pendant 1<sup>s</sup> sera proportionnelle au rapport entre les durées des passages et les durées des interruptions. Pouillet prend donc des roues métalliques à dents rectangulaires (fig. 1375), dont les intervalles sont remplis par du bois. Une de ces roues est introduite dans un circuit contenant

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXI, p. 420.



le rhéomètre, un des pôles de la pile communiquant avec l'axe par le fil *f*, et l'autre avec un ressort métallique *r*, s'appuyant sur le contour uni de la roue. Quand, celle-ci étant en repos, le ressort repose sur une dent métallique, le courant passe, et l'aiguille du rhéomètre indique son intensité. Mais si l'on fait tourner la roue, le courant ne passe plus que par intermittences; étant interrompu quand le ressort *r* repose sur du bois. Cependant, si la rotation est assez rapide, l'aiguille reste en repos, avec une même déviation, quelle que soit la vitesse, mais moindre que pendant le passage continu du courant; car, si les dents de métal et de bois sont égales, il passe moitié moins d'électricité dans le même temps; s'il y a deux fois plus de métal que de bois, il n'en passe que les deux tiers. Or, l'expérience a montré que les intensités déduites des déviations sont proportionnelles aux rapports entre les largeurs des dents de métal et de bois, c'est-à-dire aux quantités d'électricité qui passent en un temps donné. Les quantités d'électricité qui circulent dans un circuit peuvent donc s'évaluer également au moyen du voltamètre et au moyen du rhéomètre, et il suffit, pour passer de l'expression de la quantité d'électricité donnée par l'un de ces appareils, à celle qui serait donnée par l'autre, de savoir combien il y a de centimètres cubes de dégagés dans le voltamètre pendant l'unité de temps, pour une certaine déviation de l'aiguille du rhéomètre.

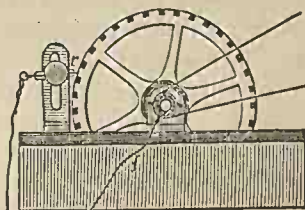


Fig. 1375.

**1992. IV.** *Quand un même courant traverse successivement plusieurs électrolytes, les poids des éléments déposés dans chacun d'eux sont entre eux comme les ÉQUIVALENTS*

*CHIMIQUES de ces éléments.* Cette loi, connue plus particulièrement sous le nom de *loi de Faraday*, a d'abord été établie par de nombreuses expériences faites sur divers composés binaires : oxydes, chlorures, iodures, cyanures, ... renfermant un équivalent de chaque substance<sup>1</sup>. Par exemple, de l'acide chlorhydrique concentré donne la même quantité d'hydrogène qu'un voltamètre à eau placé dans le même circuit, et l'eau mêlée à l'acide n'est pas décomposée, car il ne se dégage pas d'oxygène. Les chlorures, bromures, cyanures, donnent un équivalent de chlore, brome ou cyanogène au pôle positif, et un équivalent de métal au pôle négatif. Il faut avoir soin d'éviter les actions secondaires, et employer des électrodes non attaquables par les matières déposées. Pour éviter les effets secondaires pouvant résulter de la décomposition de l'eau, Faraday opérait souvent sur des composés fondus par le feu.

**Cas des Sels.** — Matteucci a trouvé ensuite que la loi de Faraday s'applique aux sels neutres dont la base contient un équivalent d'oxygène<sup>2</sup>. Quand

<sup>1</sup> *Recherches expérimentales sur l'électricité*, t. I.

<sup>2</sup> *Ann. de ch. et de ph.*, 2<sup>e</sup> série, t. LVIII, p. 78; LXXI, p. 408; et LXXIV, p. 405.

on fait passer à travers plusieurs dissolutions salines : sulfate de cuivre, *a*, acétate de plomb, *b*, azotate d'argent, *c*..., réunies par des arcs de platine (fig. 1376), un courant qui traverse également un voltamètre *V*, on trouve que les poids respectifs des métaux déposés sur les lames de platine, et le poids de l'hydrogène déduit de son volume, sont entre eux comme les équivalents



Fig. 1376.

chimiques de ces substances. — Pour obtenir le poids du métal, on lave et on dessèche la lame de platine sur laquelle il s'est déposé et à laquelle il adhère, on la pèse, puis on enlève le dépôt, soit mécaniquement, soit au moyen d'un acide, et la diminution de poids fait connaître le poids du métal déposé. Si l'extrémité positive de

chaque arc de platine était disposée de manière à pouvoir recueillir l'oxygène, on en trouverait partout le même volume que dans le voltamètre. Cependant, ce volume est quelquefois trop faible, à cause d'actions secondaires.

Pour montrer que le dépôt métallique n'est pas dû à une action secondaire de l'hydrogène d'eau décomposée, Matteucci a opéré sur des sels anhydres en fusion. La substance est fondue dans un tube de verre *T* (fig. 1377) dont le fond est traversé par l'électrode positive. En *n*, est le fil négatif, sur lequel le métal se dépose en petites masses arrondies.

Ainsi, que l'oxyde métallique soit libre ou qu'il soit combiné avec un acide, la quantité de métal déposée dans le même circuit est toujours la même; seulement, dans le cas des sels, un équivalent d'acide se joint au pôle positif, à l'équivalent d'oxygène. Pour constater directement la présence de l'acide, Matteucci a électrolysé des dissolutions de benzoates

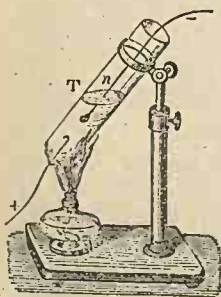


Fig. 1377.

neutres de potasse, chaux, zinc, plomb, argent. L'acide benzoïque n'étant pas soluble dans l'eau, a pu être recueilli à l'électrode positive, et son poids a été trouvé sensiblement égal à son équivalent, pour un équivalent de métal déposé à l'autre électrode. Les petites différences tenaient à la dissolution d'un peu d'acide benzoïque. D'ailleurs, le liquide ne manque pas de redevenir neutre quand, en le chauffant, on dissout l'acide benzoïque en reformant le benzoate. Il semble aussi résulter de là, que le travail chimique du courant est représenté par le poids du métal déposé au pôle négatif, et non par le poids de substance recueilli au pôle positif; ce dernier poids n'étant pas

le même quand l'oxyde décomposé est seul, et quand il est uni à un acide. Nous verrons plus loin une autre interprétation de ce fait (1996).

**Dissolutions mélangées.** — La loi de Faraday s'applique encore au mélange de deux dissolutions de composés binaires ou de sels, quand elles sont

décomposées en même temps. Matteucci a constaté que, dans ce cas, la somme des poids des éléments déposés au pôle négatif équivaut au poids d'un de ces éléments qui se déposerait seul dans un vase séparé placé dans le même circuit. Si donc un des électrolytes mélangés déposait sur le fil négatif  $\frac{1}{3}$  d'équivalent de son métal, l'autre déposerait au même électrode  $\frac{2}{3}$  d'équivalent du sien pendant que le voltamètre recevrait un équivalent d'hydrogène. Le travail chimique du courant resterait donc toujours le même.

**1993. Sels dont le métal décompose l'eau.** — Si le métal d'un sel ne décompose pas l'eau, ce métal se dépose en quantité proportionnelle à son équivalent chimique; mais quand le métal décompose l'eau à froid on trouve aux électrodes, indépendamment de la base et de l'acide, de l'hydrogène et de l'oxygène provenant de la décomposition de l'eau, de manière que le travail chimique du courant paraît être plus grand que celui qui s'accomplit dans un voltamètre traversé par le même courant. Daniell, qui a fait de nombreuses expériences à ce sujet<sup>1</sup>, a constaté qu'il se décompose un équivalent d'eau, pour un équivalent de sel décomposé. La dissolution saline (azotate de potasse; sulfate de cuivre, de soude) était placée dans un vase séparé, par une cloison poreuse, en deux compartiments recevant les électrodes en platine, disposées de manière à recueillir les gaz dégagés. La dissolution étant traversée par le courant de 30 couples de sa pile, Daniell trouva un équivalent d'hydrogène et un équivalent de base au pôle négatif. La base, qui ne pouvait sortir du compartiment, était mesurée par les procédés alcalimétriques. Pendant le même temps, un voltamètre à eau placé dans le même circuit avait reçu la même quantité d'hydrogène. L'expérience ne doit pas durer trop longtemps, car il y aurait, à travers la cloison poreuse, un transport de liquide, du compartiment positif au négatif (1961) et destruction d'une partie de la base mise en liberté.

Daniell a aussi expérimenté avec un appareil formé d'un gros tube en U entièrement rempli de liquide, et dont les deux branches, fermées par des membranes, s'engageaient dans des cylindres de verre. Ces cylindres, remplis de dissolution, étaient fermés à leur extrémité supérieure, par des bouchons auxquels s'ajustaient des tubes à recueillir les gaz dégagés.

Il résulte des expériences de Daniell, que le courant qui décompose un équivalent d'eau dans un voltamètre, ou un équivalent de chlorure de plomb anhydre (fig. 1377) semble décomposer, dans le vase à cloisons, un équivalent d'eau et un équivalent de sel, c'est-à-dire semble accomplir un travail chimique double. Ce résultat s'explique facilement en admettant que le métal du sel dissous est d'abord mis en liberté, puis, que, par une action secondaire, ce métal décompose l'eau en s'emparant de l'oxygène et dégageant l'hydrogène. Nous avons déjà indiqué (1966) les motifs, indépendants des lois de Faraday, qui ont fait adopter cette manière d'interpréter l'électrolyse des sels alcalins.

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. I, p. 394.

**1994. Equivalent d'électricité.** — Les lois qui précèdent définissent l'action du courant, qui est représentée par un travail chimique déterminé. Faraday est parti de là pour mesurer la quantité d'électricité qui parcourt un circuit, au moyen du poids d'eau décomposée, ou par le poids de gaz dégagé dans cette décomposition. On est convenu d'appeler *équivalent d'électricité dynamique*, la quantité capable de décomposer un équivalent d'eau ou 9<sup>mg</sup>, ou de dégager un équivalent d'hydrogène. C'est là ce que l'on prend pour *unité d'intensité absolue du courant*. Le *voltamètre* permet de l'évaluer facilement en nombre d'équivalents d'électricité le traversant pendant un temps donné; mais son emploi exige de nombreuses précautions à cause de certaines anomalies dont nous parlerons plus loin (2003).

Au lieu de rapporter l'équivalent d'électricité à un équivalent d'hydrogène dégagé, on peut, d'après la loi de Faraday, le rapporter à l'équivalent d'autres corps, par exemple à l'équivalent de cuivre déposé sur l'électrode négative. M. Soret a constaté que ce poids déposé est le même, quel que soit le sel de cuivre décomposé, et l'état de concentration de la dissolution. D'après cela, on a étendu le nom de *voltamètre* à tous les appareils pouvant servir à évaluer les quantités d'électricité, par le nombre d'équivalents déposés par un composé quelconque.

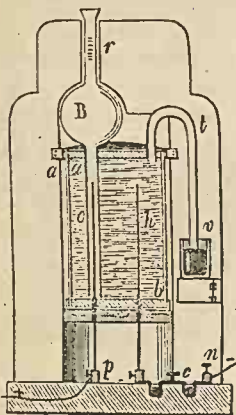


Fig. 1378.

**Voltamètre de mesure.** — La figure 1378 représente le voltamètre de M. Bertin. Des fils de platine *o*, *h* traversent le fond d'un gros tube de verre *ab*, fermé à chacune de ses bases par une garniture de cuivre. Le fil positif *o* est enveloppé d'un tube à boule B, par lequel on remplit *entièrement* l'appareil d'eau acidulée, l'air s'échappant par le tube capillaire *t*, que l'on plonge ensuite dans

du mercure *v*. Quand on veut évaluer l'intensité d'un courant, on le fait entrer en *p*, et sortir en *n*. L'oxygène s'échappe par le tube B, dans lequel l'hydrogène, qui n'a pas d'issue, refoule le liquide. Quand le liquide est arrivé à un repère *r*, on supprime le courant, en enlevant l'arc *c* qui plonge dans du mercure, et le volume de liquide refoulé jusqu'au repère, représente le volume d'hydrogène dégagé pendant le temps de l'expérience. Les intensités de divers courants successifs sont entre elles en raison inverse de ce temps. Après chaque expérience, on retire le vase *v*, l'hydrogène s'échappe par le tube *t*, et le niveau reprend sa première position dans le tube B, pour une nouvelle opération.

**Voltamètre à poids.** — Quand on veut connaître le poids de l'hydrogène dégagé dans un voltamètre, on le déduit du volume, ce qui exige des calculs assez longs relatifs à la température, à la pression et à la vapeur d'eau. Voici comment M. E. Becquerel obtient directement le poids d'eau décomposée : Ce

liquide est contenu dans un tube recourbé (fig. 1379), dans les branches duquel s'enfoncent des électrodes de platine. Les gaz dégagés s'échappent au dehors, après avoir traversé des tubes T, T remplis de ponce sulfurique, destinée à retenir l'humidité qu'ils entraînent. La perte de poids de l'appareil pendant l'expérience, représente le poids de l'eau décomposée.

1995. V. — TRAVAIL CHIMIQUE DANS LA PILE. —

Les lois de l'électrolyse montrent que le travail chimique est le même dans toutes les parties d'un courant. Cette loi s'applique aussi au travail chimique qui s'accomplit dans l'intérieur de chaque couple de la pile qui fait partie du circuit, c'est-à-dire que le travail chimique intérieur qui engendre l'électricité dans chaque couple, est équivalent au travail chimique produit en un point quelconque du circuit extérieur. Il est évident que cette loi suppose qu'il n'y a pas d'actions locales, c'est-à-dire qu'il ne se produit d'action chimique dans la pile qu'autant que le circuit est fermé (1850). Pour mettre cette loi en évidence dans le cas d'une pile à un seul liquide, on dispose les couples comme on le voit (fig. 1380). La lame de platine de chaque couple est renfermée dans un tube plein d'eau acidulée, engagé dans une des trois tubulures d'un flacon renfermant le même liquide. Une lame de zinc amalgamé,  $r, r$ , plonge dans ce liquide, et communique en dehors avec la platine du couple suivant. Le circuit étant fermé, on trouve toujours le même volume d'hydrogène autour de chaque lame de platine ainsi que dans un voltamètre compris dans le circuit.

En outre, pour un équivalent d'hydrogène, chaque lame perd un poids égal à un équivalent de zinc. MM. Boquillon et Silbermann ont expérimenté avec un couple de Smée (1822), de manière à obtenir de grandes quantités de gaz. Le courant produit passait à travers un voltamètre à sulfate de cuivre, et les poids d'hydrogène dégagé dans le couple, et de cuivre déposé dans le sulfate, ont toujours été entre eux comme les équivalents de ces substances. — La pile à gaz (1870) fournit une vérification élégante de la loi qui nous occupe; en effet, Grove a constaté qu'il y a toujours un équivalent d'eau formé dans chaque couple, pour un équivalent d'eau décomposé par le courant de cette pile.

Daniell a opéré sur des couples de différents systèmes, et a toujours trouvé dans chacun d'eux un équivalent de liquide décomposé, pour un équivalent d'eau aussi décomposé dans un voltamètre placé dans le circuit extérieur. Si un

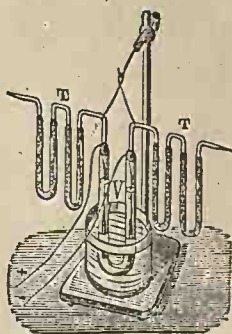


Fig. 1379.

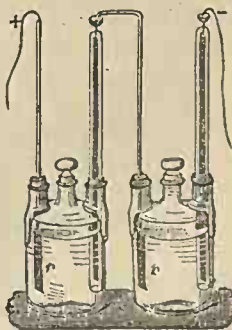


Fig. 1380.

couple était renversé par rapport aux autres, il se comportait comme un voltamètre et dégagait un équivalent d'hydrogène sur la lame de zinc, et un équivalent d'oxygène sur le platine.

Dès 1834, Faraday avait établi cette loi pour un seul couple, et avait reconnu qu'il y faut dissoudre un équivalent de zinc pour produire la quantité d'électricité nécessaire à la décomposition d'un équivalent d'eau. MM. Daniell, Buff, Soret, ont ensuite confirmé la loi; et, en 1835, Matteucci la retrouvait pour chacun des couples d'une pile à plusieurs éléments<sup>1</sup>. Enfin, Despretz<sup>2</sup> l'a vérifiée pour les piles à deux liquides de Bunsen et de Daniell : la quantité d'hydrogène correspondant au poids de zinc dissous, s'est toujours trouvée égale, à  $\frac{1}{100}$  près, à la quantité d'hydrogène d'un voltamètre. La petite différence était en faveur du couple; ce qui s'explique par des actions locales, Despretz ayant reconnu que le zinc amalgamé est toujours un peu attaqué par l'eau acidulée. Il peut aussi arriver, à cause des pertes, qu'une partie de l'électricité ne passe pas par le voltamètre; aussi, Despretz recommande-t-il d'isoler avec soin cet instrument, ainsi que les couples de la pile, et d'opérer autant que possible par un temps sec.

**1996. Conséquences.** 1<sup>o</sup> Il résulte de l'égalité du travail chimique dans chaque couple de la pile et dans le circuit interpolaire que, pour décomposer un équivalent d'un électrolyte, il faut dépenser un équivalent de zinc dans chaque couple; autrement dit, dissoudre un équivalent de zinc pour produire un *équivalent d'électricité*. Par conséquent, si l'on emploie  $n$  couples, on dépensera  $n$  fois plus de zinc que si l'on n'en employait qu'un, sans obtenir un travail chimique extérieur plus considérable.

2<sup>o</sup> Il résulte aussi de la loi, que la quantité d'électricité qui parcourt le circuit extérieur ne dépend pas du nombre des couples, quand il n'y a pas de résistance extérieure sensible; conséquence d'accord avec celle à laquelle nous avait conduit la théorie de la pile (1846); mais cette quantité dépend, toutes conditions égales d'ailleurs, de l'étendue des surfaces attaquées, et Despretz a constaté qu'elle lui est sensiblement proportionnelle. Il faudra donc, dans les opérations de l'électrochimie, employer le moins de couples possible; mais il faudra toujours en réunir un nombre suffisant pour vaincre la résistance électrolytique. Si cette résistance est prononcée, il ne passera que peu d'électricité dans le circuit, la quantité de zinc dissoute dans chaque couple sera aussi plus petite, et toujours en rapport avec la quantité de substance décomposée; mais l'électrolyse marchera lentement, ce qui, dans beaucoup de cas, est un inconvénient; il faudra donc augmenter le nombre des couples. On voit combien ces faits sont favorables à la théorie chimique de la pile.

Despretz a étudié l'influence du nombre des couples de la pile de Bunsen, sur le temps employé à décomposer une certaine quantité d'eau. Ayant réuni

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LVIII, p. 75.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Ac. des Sc. de Paris*, t. XXXIII, p. 485.

successivement en série, 2, 4, 16, 32, 64, 128, 256 couples, il a trouvé que le temps décroît rapidement, de 2 à 4 couples et de 4 à 8; il varie peu de 8 à 16, et d'une manière presque insensible de 32 à 64, et de 128 à 256. On ne gagne donc presque rien, sous le rapport de la rapidité de l'électrolyse, en dépassant le nombre de 8 couples, et l'on augmente la dépense en pure perte. La pile de Daniell a donné des résultats semblables.

3° Nous avons vu (1969) que les mélanges électrolysés peuvent déposer plusieurs substances au même pôle. Dans ce cas, la somme des équivalents de ces substances est égale au nombre d'équivalents que déposerait l'une d'elles, si elle était seule décomposée. M. E. Warburg a fait à ce sujet des expériences curieuses, qui montrent en même temps l'influence de la chaleur sur le partage de la force décomposante de l'électricité entre les substances mélangées<sup>1</sup>. Il fait passer un courant dans un voltamètre contenant un mélange de deux volumes d'eau et trois volumes d'acide sulfurique du commerce. A froid, l'on ne recueille que de l'hydrogène à l'électrode négative, mais à mesure qu'on élève la température, le volume d'hydrogène diminue et est remplacé par une quantité équivalente de soufre. A partir de 140°, il ne se dépose que du soufre, sur le platine poli, et à partir de 90° sur le platine *platiné*. La limite est aussi d'autant moins élevée que l'électrode négative est plus étendue et le courant plus faible. Le liquide, que le soufre rend laiteux, s'éclaircit subitement à 180°, température à laquelle le soufre insoluble se transforme en soufre soluble. — Les dissolutions métalliques donnent des résultats analogues, l'hydrogène est remplacé par des quantités équivalentes de métal d'autant plus grandes que la température est plus élevée.

4° La loi de Faraday peut servir à expliquer les résultats qui suivent. Quand on décompose de l'eau *isolée* dans un vase de verre, au moyen d'une seule électrode à la Wollaston (1724), formée d'un fil de platine enveloppé de verre excepté à sa section extrême, fil qu'on fait communiquer avec une machine électrique positive, il ne se dégage que de l'oxygène à la pointe de platine, et l'on ne voit pas d'hydrogène tant que le liquide reste électrisé. Mais si l'on décharge ce liquide par le fil, qui forme alors une électrode de sortie, on voit l'hydrogène se dégager à la pointe de platine, en volume double de celui de l'oxygène dégagé antérieurement. On doit se demander où était l'hydrogène avant la décharge. S'était-il dégagé et diffusé dans le liquide se comportant comme une électrode à grande surface? M. Lipmann<sup>2</sup> rejette cette explication, en faisant remarquer que s'il en était ainsi, chaque équivalent d'électricité produirait un double travail : celui de la décomposition de l'eau pendant l'entrée de l'électricité, avec dégagement d'oxygène à la pointe de platine, et celui d'une seconde décomposition pendant la sortie, avec dégagement d'hydrogène à la pointe. D'un autre côté, l'eau ne peut servir d'électrode, car aucune décomposition ne

<sup>1</sup> *Ann. de Pogg.*, t. CXXXV, p. 114 et 120; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3<sup>e</sup> sér., t. XVI.

<sup>2</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. VI, p. 41.

peut s'y produire sans l'interposition d'un autre corps, par simple déplacement de charge électrique. Par exemple, si l'on faisait tourner une boule de cuivre électrisée autour d'une masse sphérique d'eau, le mouvement de la première ne demandant aucune dépense de travail, puisqu'il est normal à la direction de la force, le déplacement de l'électricité par induction dans l'eau n'y devrait produire aucun travail de décomposition, autrement celui-ci serait produit sans dépense d'un autre travail, ce qui est impossible.

M. Lipmann admet donc que l'hydrogène *dissimulé* est resté dans le liquide, qui n'éprouverait qu'une demi-décomposition pendant l'introduction du courant, puis une seconde demi-décomposition pendant sa sortie. L'hydrogène *dissimulé* est insensible aux actions chimiques ou physiques qui ne diminuent pas la charge; mais toutes les causes, étincelles, aigrettes, effluves, qui diminuent cette charge, déterminent un dégagement d'hydrogène en rapport avec la diminution produite.

**1997. ÉLECTROLYSE DES COMPOSÉS CONTENANT PLUS DE DEUX ÉQUIVALENTS.** — On avait cru d'abord que les composés contenant plus de deux équivalents ne pouvaient être électrolysés. Mais Matteucci est parvenu

à en décomposer plusieurs, particulièrement le protochlorure de cuivre  $\text{Cu}^2\text{Cl}$ , et le protochlorure d'antimoine  $\text{Sb}^2\text{Cl}^3$ . M. E. Becquerel a trouvé une loi générale de l'électrolyse, qui s'applique à ces sortes de corps. Il n'opérait que sur des dissolutions saturées, de manière à ce qu'il n'y eût pas de dissolvant décomposé (1969). La dissolution était placée dans deux vases séparés

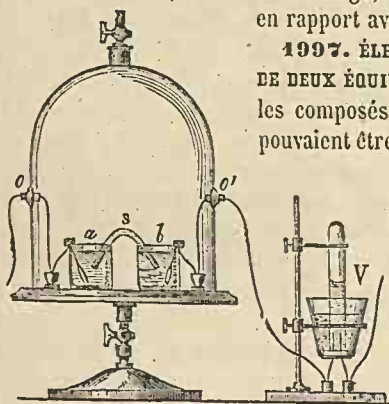


Fig. 1381.

*a, b* (fig. 1381), réunis par un siphon *s*; et recouverts d'une cloche dans laquelle pénétraient, en *o, o'*, les fils rhéophores, et dans laquelle on pouvait faire le vide et introduire différents gaz. Un voltamètre *V*, servait à évaluer la quantité d'électricité. Quelques expériences ont été faites sur des substances fondues par le feu : on y enfonçait simplement les électrodes. Voici la loi trouvée pour les composés binaires.

Pour chaque équivalent d'électricité, il y a un équivalent de l'élément ÉLECTRONÉGATIF déposé au pôle positif. On peut ensuite, au moyen de la formule chimique du composé, calculer facilement la quantité de métal déposée au pôle négatif. Par exemple, avec le perchlorure de fer,  $\text{Fe}^2\text{Cl}^3$ , il y a, pour un équivalent d'électricité,  $\frac{2}{3}$  d'équivalent de fer au pôle négatif, pour un équivalent de chlore  $\text{Cl}$  au pôle positif; avec le chlorure de cuivre  $\text{Cu}^2\text{Cl}$ , il y a deux équivalents de métal mis en liberté. Les expériences ont été faites sur les protochlorures de cuivre  $\text{Cu}^2\text{Cl}$ , d'antimoine  $\text{Sb}^2\text{Cl}^3$ ; sur les perchlorures de fer,



$FeCl^3$ , d'antimoine  $SbCl^3$ ; sur le bichlorure de cuivre  $CuCl^2$ , et sur celui d'étain  $SnCl^4$ ; sur des iodures, des bromures; sur le protoxyde et le bioxyde de cuivre  $Cu^2O$  et  $CuO$  dissous dans l'ammoniaque. Le chlore était évalué en prenant pour électrode positive une lame de cuivre, qu'il attaquait et dont on mesurait la perte de poids.

Dans ces expériences, il faut se mettre en garde contre les *actions secondaires*. Par exemple, avec les perchlorures, il peut se déposer des protochlorures au pôle négatif, ce qui rend le dépôt de métal trop faible. Avec les chlorures dont le métal décompose l'eau, comme le sel marin, il se dégage de l'hydrogène, et l'on trouve de la soude au pôle négatif (1967).

On voit que, d'après la loi de M. E. Becquerel, c'est l'élément *électro-négatif* qui détermine la quantité de substance décomposée par un équivalent d'électricité. Dans la loi de Faraday (1992), on prend, au contraire, pour terme de comparaison, l'élément *électro-positif*. Cette dernière loi peut être regardée comme un cas particulier de celle de M. E. Becquerel; car, lorsqu'il n'y a que deux équivalents en présence, pour chaque équivalent déposé au pôle positif, il en apparaît un au pôle négatif. Mais la loi de Faraday se trouve en défaut quand il y a plus de deux équivalents, tandis que celle de M. E. Becquerel représente tous les cas de décomposition des composés binaires.

Ce dernier physicien a cherché à étendre sa loi au cas des sels neutres, et des sels dont la base contient plus d'un équivalent d'oxygène ou de métal, ou dont l'acide est uni à plus d'un équivalent de base. Pour cela, il adopte la théorie des hydracides et considère les sels comme des composés binaires formés de l'union d'un métal, avec un composé du radical de l'acide et de tout l'oxygène du sel. La loi s'énonce alors ainsi : *pour un équivalent d'électricité, il se dépose au pôle positif un équivalent de l'acide avec tout l'oxygène du sel*. La quantité de métal qui se dépose au pôle négatif se déduit de la formule chimique du composé. Par exemple, avec le sulfate  $SO^3 Cu^2O$ , M. E. Becquerel trouve deux équivalents de cuivre au pôle négatif, pour un équivalent d'acide et un équivalent d'oxygène au pôle positif. Avec l'hypo-nitrite jaune de plomb  $Az^2O^4 2PbO, HIO$ , il se dépose deux équivalents de plomb au pôle négatif, et avec l'hypo-nitrite rouge,  $2Az^2O^4 7PbO, 3HIO$ , il se dépose  $\frac{7}{2} = 3,5$  équivalents de ce métal, pour un équivalent d'électricité.

**Eau oxygénée.** L'eau oxygénée donne deux équivalents d'oxygène au pôle positif, pour un équivalent d'électricité; ce qui s'explique, en la considérant comme composée d'eau unie à de l'oxygène ( $HO, O$ ). L'hydrogène se rend alors au pôle négatif, et l'oxygène au pôle positif, avec celui qu'abandonne l'hydrogène; de même que dans l'électrolyse des sels, le pôle positif reçoit avec l'acide, l'oxygène de la base. Pour appuyer cette explication, M. E. Becquerel fait passer un courant dans l'eau acidulée d'un vase divisé par une cloison poreuse. Quand le courant est trop faible pour que l'eau soit décomposée, l'acide se rend

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XI, p. 126 et 127.

dans le compartiment positif, ce qui indique que l'hydrate d'acide sulfurique est seul décomposé. Si le courant est assez fort pour décomposer l'eau, le compartiment positif reçoit l'acide avec l'oxygène de l'eau, dont l'hydrogène se dégage au pôle négatif.

**1998. Remarques. — Conclusions. —** La loi de M. E. Becquereel est l'expression la plus complète de la manière dont s'accomplit l'électrolyse. Elle a, sur l'énoncé de Faraday, qu'elle comprend comme cas particulier, l'avantage de s'appliquer aux composés qui contiennent plus de deux équivalents. La loi de Faraday montre que, *s'il faut un équivalent d'électricité pour décomposer un équivalent d'un composé binaire, le fait de la combinaison d'un équivalent de chacun des éléments de ce composé, dégage un équivalent d'électricité.* Si l'on veut établir une semblable comparaison dans le cas où il y a plus de deux équivalents, il faut, d'après la loi de M. E. Becquereel, dire que : 1° pour un équivalent d'un corps jouant le rôle d'acide ou d'élément *électro-négatif* se combinant avec un ou plusieurs équivalents d'un autre corps jouant le rôle d'élément électro-positif, il y a un équivalent d'électricité dégagé. 2° Si un équivalent d'un corps tel que l'oxygène, s'est combiné avec un autre corps jouant le rôle de base, et si la *combinaison* s'unit ensuite avec un équivalent du premier corps (l'oxygène) pour former un deuto-sel, la seconde combinaison dégagera un équivalent d'électricité, comme la première. La quantité d'électricité dégagée ne dépendrait donc que du corps qui joue le rôle d'élément électro-négatif dans la combinaison.

Quant à la loi de Faraday, s'il reste encore bien des expériences à faire pour la vérifier dans beaucoup de cas qui n'ont pas été examinés, on l'a trouvée exacte jusqu'à présent pour les composés formés de deux équivalents, en tenant compte des effets secondaires qui, dans certains cas, viennent la déguiser. Il s'est quelquefois présenté des anomalies, mais on a toujours fini par en découvrir la cause. Par exemple, Faraday avait signalé certains composés, comme le *sulfure d'argent*, le *bi-iodure de mercure*, qui, chauffés, laissaient passer, sans déposer leurs éléments, un nombre quelconque d'équivalents d'électricité. Mais M. Hittorff<sup>1</sup> a montré que le sulfure d'argent se décompose, même à froid. A chaud, la décomposition est plus active, mais il y a bien moins d'un équivalent d'argent déposé, par équivalent d'électricité. Cela tient à ce que l'argent déposé forme des filaments par lesquels les électrodes communiquent, de sorte qu'une partie de l'électricité passe sans traverser l'électrolyte. M. Beetz a trouvé, de son côté, que le bi-iodure de mercure fondu se décompose pendant le passage du courant. Nous allons citer d'autres faits qui semblent en opposition avec les lois de l'électrolyse, mais qu'on est parvenu à expliquer.

**1999. Inégalité apparente dans la puissance chimique des pôles.** — Il résulte des lois de l'électrolyse, que le sens du courant ne doit pas avoir

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XX, p. 1544.

d'influence sur les décompositions. Or, il semble en être autrement dans certains cas : Daniell et Miller ayant rempli l'un des compartiments d'un vase séparé en deux par une cloison poreuse, de sulfate de cuivre ou de zinc, et l'autre compartiment, d'eau acidulée, virent le métal se déposer sur l'électrode négative, quand elle était plongée dans la dissolution saline; tandis qu'il ne se dégageait que de l'hydrogène et de l'oxygène, quand elle plongeait dans l'eau acidulée. Dans les deux cas, l'électrode positive recevait, avec l'oxygène, un équivalent d'acide sulfurique. — Les deux compartiments ayant été remplis d'une dissolution saline, on reconnut, en faisant l'essai chimique des dissolutions, que tout le métal déposé provenait du compartiment négatif. La dissolution contenue dans le compartiment positif ne paraissait donc pas avoir été décomposée, quoique traversée par le courant.

Pouillet a observé des résultats semblables avec le chlorure d'or<sup>1</sup> : la dissolution est placée dans une série de tubes en U (fig. 1382) plus étroits dans la partie courbe, et réunis deux à deux par des arcs de platine. Quand ce système est traversé par un courant, l'or se dépose aux électrodes négatives pendant que le chlore se dégage aux électrodes positives. On voit, au bout de quelque temps, les branches négatives des tubes se décolorer, et l'essai chimique prouve que les branches positives n'ont pas perdu de chlorure d'or. Il semble donc que le pôle négatif soit seul efficace pour produire la décomposition. Les chlorures de cuivre, nickel, cobalt, zinc, etc., donnent des résultats semblables. Avec les chlorures alcalins, il y a seulement une différence d'action : le pôle négatif l'emporte sur le pôle positif, avec le chlorure de magnésium; et c'est le contraire, avec les chlorures de potassium, sodium, baryum, etc.

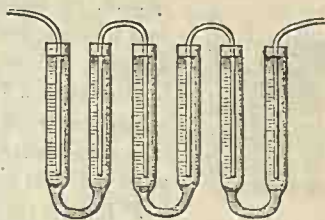


Fig. 1382.

M. Hittorf a constaté que le rapport entre les quantités de métal fournies par les deux compartiments du vase de Daniell, est constant pour une même dissolution, quelle que soit la force du courant; mais ce rapport change avec l'état de concentration. La quantité de métal perdue dans le compartiment négatif était déduite de l'analyse du liquide. En la retranchant du poids de métal déposé au pôle négatif, on calculait la quantité de métal fournie par le liquide du compartiment positif. Ces expériences ont été faites sur les sulfates de cuivre et d'argent, et sur l'acétate et le nitrate d'argent.

**2000. Rôle de l'eau dans l'électrolyse des sels.** — M. d'Almeida a expliqué tous ces faits par l'intervention de l'eau dans l'électrolyse des sels. Les deux portions du liquide, placées dans un vase P (fig. 1383) et dans un flacon intérieur N, communiquaient entre elles par un petit trou a pratiqué

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. LI, p. 257.

dans le col du flacon, de manière que le courant pût passer, mais que les liquides ne pussent se mélanger. D'ailleurs, pour avoir les dissolutions toujours également concentrées près de leur point de réunion, on amenait l'électricité au fond des vases, au moyen d'électrodes entourées de tubes de verre. M. d'Almeida a encore opéré avec un tube en U dont les deux branches étaient séparées par un robinet de verre. Voici les résultats obtenus :

1<sup>o</sup> Dans le cas des sels dont le métal ne décompose pas l'eau à froid, et qui sont maintenus à l'état neutre au moyen d'une *électrode soluble* formée du même métal (1975), la quantité de sel décomposé est la même dans chaque compartiment, et l'eau ne participe pas à la décomposition. — Si la dissolution est acide, le compartiment positif P ne perd pas de métal, et tout ce qui s'en dépose est pris au vase négatif. C'est que le courant passe entièrement à travers l'eau acidulée, qui conduit beaucoup mieux que le sel (100 fois plus pour l'azotate d'argent). L'eau est alors seule décomposée, et le métal qui se dépose au pôle négatif provient d'une action secondaire exercée par l'hydrogène nais-

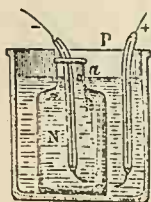


Fig. 1383.

sant, qui se rend à ce pôle et décompose le sel du compartiment négatif, en déplaçant le métal qui se dépose. Les résultats sont très-nets avec l'azotate d'argent; mais, avec les sulfates d'argent, de zinc, de cuivre, il est impossible de maintenir la dissolution à l'état neutre, l'électrode soluble ne se dissolvant pas assez vite pour détruire l'acide à mesure qu'il est mis en liberté; il y a donc toujours un peu d'eau décomposée qui vient altérer les résultats.

2<sup>o</sup> Dans le cas des sels alcalins et terreux, si la dissolution positive est acide, et la négative constamment neutre, celle-ci perd plus de sel que l'autre, le courant se partageant dans le liquide acide, entre le sel et l'eau. Si la dissolution négative est rendue alcaline, et la positive maintenue neutre, la première perd moins de sel que la seconde, une partie du courant se portant sur l'eau que l'alcali rend conductrice. Ainsi, la présence d'un alcali ou d'un acide fait que le sel est décomposé en moindre proportion, une partie du courant agissant sur l'eau, dont l'hydrogène peut ensuite produire des actions secondaires.

Il est facile maintenant de se rendre compte des résultats obtenus par Daniell et Miller et par Pouillet : la dissolution étant supposée neutre, le sel est d'abord seul décomposé; mais l'acide qui est mis en liberté au pôle positif, augmente la conductibilité de l'eau, qui est électrolysée : ce qui apporte une diminution dans la quantité de sel décomposée près de ce pôle. S'il y a en même temps de l'alcali autour de l'électrode négative, la décomposition du sel est la plus grande du côté où la conductibilité a été le moins augmentée par l'acide ou la base; mais la somme de travail chimique réalisée à chaque pôle est toujours la même.

M. Wiedemann<sup>1</sup> a trouvé une autre cause de l'inégalité apparente d'action

<sup>1</sup> Ann. de Poggendorff, t. XCIX, et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 224.

aux pôles; c'est qu'il se fait un *transport mécanique*, du pôle positif au pôle négatif, de l'eau, moins conductrice que le sel dissous; de manière que le liquide est moins concentré au pôle négatif. S'il y a une cloison poreuse, le liquide s'élève autour de ce dernier pôle.

M. E. Bourgoïn a étendu la théorie de M. d'Alméida aux sels à acides organiques<sup>1</sup>: formiates, acétates, benzoates, oxalates, succinates, malates, tartrates, citrates, lactates et camphorates. Seulement, ici, c'est au pôle positif que se présente la plus grande perte, les acides organiques opposant, en général, une grande résistance au passage du courant.

**2001. Nouvelle explication de ce qui se passe dans le voltamètre.**

— M. Bourgoïn a fait d'autres expériences, qui l'ont conduit à cette conclusion inattendue, que l'eau n'est pas un électrolyte, c'est-à-dire qu'elle n'est pas décomposée par les courants. Ce serait la substance qu'on y mêle pour la rendre conductrice qui serait seule décomposée. Cette théorie est basée sur l'accumulation de la matière dissoute dans un des compartiments égaux d'un vase, divisé par une cloison imperméable munie d'un petit trou pour laisser passer le courant. Par exemple, quand l'eau contient de la potasse, cette base serait seule décomposée, l'oxygène se rendant au pôle positif et le potassium au pôle négatif, où il agit sur l'eau en dégageant de l'hydrogène et reformant de la potasse, qui s'accumule ainsi dans le compartiment négatif; et, en effet, l'analyse montre que l'excès de cette potasse correspond à la quantité d'oxygène dégagé dans l'autre compartiment. — Si l'eau est acidulée par l'acide sulfurique, c'est le composé  $\text{SO}^3$ ,  $3\text{H}$  qui serait seul décomposé, en dégageant  $3\text{H}$  au pôle négatif et  $\text{SO}^3 + 3\text{O}$  au pôle positif, autour duquel l'acide s'accumule ainsi. Avec l'acide borique, il n'y a aucun dégagement de gaz, cet acide ne se décomposant pas<sup>2</sup>. On sait aussi que l'eau pure ne peut être électrolysée, ou ne peut l'être que très-difficilement (1965).

Cette manière originale d'interpréter les faits présente plus d'une difficulté à l'esprit, qui a peine à concevoir cette décomposition de matière mélangée en très-petite quantité, à l'exclusion de l'eau, qui formerait une exception singulière parmi les composés binaires liquides et modérément conducteurs. D'un autre côté, l'accumulation de la matière dissoute dans un des compartiments peut s'expliquer par un transport vers le pôle négatif, de cette matière ou de l'eau, suivant le rapport des conductibilités, transport analogue à celui que M. Wiedemann a observé dans le cas des dissolutions salines (2000).

**2002. De la conductibilité propre des liquides.** — Les lois de l'électrolyse supposent que toute l'électricité qui traverse un électrolyte est employée à en opérer la décomposition, et qu'aucune portion ne passe par *conductibilité propre*, comme dans un fil métallique. Cependant Faraday admettait cette sorte de conductibilité, mais très-peu prononcée. Matteucci partageait cette

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XXI, p. 264.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XV, p. 47, et t. XXVIII, p. 119.

opinion<sup>1</sup> : Ayant disposé dans le même circuit deux capsules remplies d'une solution d'iodure de potassium et d'amidon, dans l'une desquelles les électrodes étaient des *fil*s, et dans l'autre des *lames* de platine, il vit le liquide devenir bleu autour des *fil*s, pendant le passage d'un faible courant, et n'éprouver aucun changement autour des *lames*. Des expériences faites sur des dissolutions de sulfate de cuivre ont donné des résultats analogues. — L. Foucault, ayant monté une pile à colonne, en mettant des rondelles de drap entre *tous* les disques, n'obtint pas de courant; mais, ayant doublé les rondelles de deux en deux, il observa un courant dont le sens était le même que s'il avait supprimé les rondelles simples; ce qu'il explique par la conductibilité propre de l'eau acidulée, résistant moins dans les rondelles les plus minces. Despretz<sup>2</sup> a pu faire passer pendant longtemps à travers l'eau un courant déviant de 15 à 20° l'aiguille d'un rhéomètre de 1500 tours, sans apercevoir, même au microscope, de traces de gaz sur les électrodes.

D'un autre côté, de La Rive<sup>3</sup> fait remarquer qu'un seul couple décompose l'eau acidulée; car son rhéomètre, qui marquait d'abord 20 à 25°, reculait bientôt à 5 ou 6°, à cause de la polarisation des électrodes. En faisant le vide, il voyait des bulles très-fines de gaz s'en dégager, et le rhéomètre revenait à 20°. Il admet, ainsi que Becquerel et Poggendorff, que la décomposition a lieu tant que passe le courant; seulement, les gaz dégagés sont en si petite quantité, qu'ils se dissolvent dans le liquide, ou adhèrent aux électrodes. — M. Buff, en opérant au moyen de faibles courants, a toujours trouvé la même quantité de métal déposé dans des dissolutions de sels d'argent ou de cuivre à différents degrés de concentration<sup>4</sup>. Ayant disposé dans le même circuit un voltamètre à eau acidulée et une dissolution d'azotate d'argent, il obtint au bout de 96 heures 0<sup>gr</sup>,645 d'argent, et il ne vit aucun dégagement de gaz dans le voltamètre; le volume d'hydrogène correspondant aurait dû être de 0<sup>cc</sup>,7, quantité qui, en 96 heures, a pu facilement disparaître.

M. Soret, qui a fait beaucoup d'expériences sur divers sels de cuivre, à différents degrés de concentration et à différentes températures, a toujours trouvé les mêmes quantités de cuivre déposées, quoique ces dissolutions eussent des conductibilités physiques différentes<sup>5</sup>. Une dissolution bouillante de sulfate de cuivre lui donna cependant un peu moins de métal que les autres; mais il reconnut qu'elle dissout un peu de cuivre.

Le même physicien a constaté aussi que, dans la décomposition de l'électricité par influence à travers l'eau, il y a électrolyse de ce liquide; voici par quel moyen : Il dispose l'un dans l'autre deux vases de verre à bords vernis et bien

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXVI, p. 223.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XLII, p. 707.

<sup>3</sup> *Archives de l'électricité* de M. A. de La Rive, t. III, p. 459.

<sup>4</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XXII, p. 344, et t. XXV, p. 65.

<sup>5</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 257, et t. XLVII, p. 429.

desséchés, et verse de l'eau dans l'espace qui les sépare, ainsi que dans le vase intérieur, de manière à constituer une bouteille de Leyde, dont les armatures sont formées par le liquide. Des lames de platine plongées dans l'eau des deux armatures, servent à charger l'appareil. Or les électricités qui se déplacent dans ces armatures décomposent le liquide, car les lames de platine sont polarisées quand on a chargé et déchargé plusieurs fois l'appareil. Après 16 charges, les lames de platine, réunies par un rhéomètre, donnaient un courant secondaire indiquant que l'hydrogène s'était déposé sur la lame plongeant dans l'armature négative. L'électricité ne pouvait passer d'une armature liquide à l'autre par les parois du vase intérieur (ce qui aurait constitué un courant); car, en faisant arriver l'électricité sur ces parois, la lame extérieure ne présentait pas de traces de polarisation.

Il semble résulter de toutes ces expériences que l'électricité ne peut traverser l'eau sans la décomposer. Cependant, le fait seul de la transmission de l'électricité à travers le mercure, qui n'est pas électrolysé, prouve que l'état liquide n'est pas opposé à une conductibilité propre; mais la quantité d'électricité qui passe autrement que par électrolyse ne peut être que très-faible, puisqu'elle n'empêche pas les lois de se vérifier avec le degré d'approximation que comportent les méthodes employées. Becquerel remarque qu'il peut se faire aussi que le peu d'électricité qui passe par conductibilité propre, quand le courant est trop faible pour qu'il y ait décomposition, passe par la voie plus facile que lui offre l'électrolyse, dès que la décomposition est commencée, et qu'il n'y ait plus, dès lors, qu'un seul mode de propagation. C'est là un trait de lumière qui peut servir à expliquer bien des anomalies.

**2003. Anomalies dans les voltamètres.** — M. Gassiot<sup>1</sup> et L. Foucault ont reconnu que les quantités de gaz recueillies dans divers voltamètres placés dans le même circuit sont d'autant plus faibles que les surfaces des électrodes de platine sont plus grandes. De La Rive, ayant employé des surfaces inégales dans le même appareil, a vu que la quantité de gaz dégagée sur l'électrode la plus étendue est plus petite qu'elle ne devrait l'être.

M. Jamin, qui a varié ces expériences de manière à rendre les résultats plus saillants<sup>2</sup>, ayant pris pour électrode négative une lame de platine de 15<sup>cc</sup>, et pour électrode positive un fil très-fin, trouva autour de ce dernier 9<sup>cc</sup> d'oxygène, et autour de la lame, 5<sup>cc</sup> d'hydrogène, au lieu de 18. Le sens du courant ayant été renversé, l'oxygène dégagé sur la lame n'occupait que 1<sup>cc</sup>, et l'hydrogène dégagé sur le fil, 9<sup>cc</sup>, 3. Dans une autre expérience, deux voltamètres semblables à celui dont nous venons de parler ayant été placés dans le même circuit, de manière que la lame fût positive dans l'un et négative dans l'autre, le rapport des volumes d'hydrogène et d'oxygène fut, pour l'un, égal à 1,60, au lieu de 2; et, pour l'autre, égal à 4,42. On peut même, avec une lame suffisamment

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. II, p. 610.

<sup>2</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXVIII, pp. 390 et 443.

large, n'avoir aucun dégagement de gaz, tandis qu'il s'en produit abondamment sur le fil. Si l'un des voltamètres porte les deux lames, et l'autre les deux fils, chaque électrode dégagant les mêmes quantités de gaz que dans la disposition précédente, on en recueille beaucoup plus dans le voltamètre à fils que dans le voltamètre à lames.

L. Foucault, ayant mis dans le même circuit deux voltamètres identiques, formés de faisceaux de lames de platine bien dressées, et dont l'un contenait de l'eau distillée, et l'autre de l'eau mêlée avec  $\frac{1}{50}$  d'acide sulfurique, obtint 10 fois plus de gaz dans le second que dans le premier voltamètre.

**200-1. Causes de ces anomalies.** — Les résultats qui précèdent semblent en contradiction avec la loi de Faraday; mais, puisqu'on peut n'obtenir qu'un gaz dans un voltamètre à lames inégales, on doit admettre que celui qui ne se dégage pas se combine avec le liquide ou se condense sur la lame de platine. Faraday, dès 1834, et plus tard M. Meidinger<sup>1</sup>, ont reconnu que l'oxygène est absorbé par l'eau, en formant du *bioxyde d'hydrogène*, en quantité d'autant plus grande que l'électrode positive est plus étendue. On sait que le froid et la présence de l'acide sulfurique favorisent la formation de ce composé; aussi, M. Meidinger a-t-il remarqué qu'il manque d'autant plus d'oxygène que l'eau contient plus d'acide, et M. F. Leblanc, que la température est plus basse. M. Soret a trouvé, de son côté, que les quantités totales de gaz dégagées sont plus faibles dans un voltamètre refroidi que dans un autre à 100° placé dans le même circuit.

Indépendamment de cette action secondaire dans le liquide, l'oxygène est absorbé sur la lame positive. M. Schœnbein, n'y voit qu'une adhérence mécanique du gaz; mais de La Rive admet une véritable oxydation du platine par l'oxygène, qui se trouve dans un état particulier étudié plus loin (2007). En effet, ayant fait passer dans le voltamètre, des courants alternativement en sens opposé, il vit le platine se recouvrir d'une poussière noire de métal désagrégé, qu'il attribue à des oxydations suivies de réductions, répétées à chaque renversement du courant.

Quand, l'électrode négative présentant une grande surface, l'hydrogène disparaît en tout ou partie, il se forme évidemment, à ses dépens, des composés nouveaux; car M. Jamin a observé que la lame négative prend une couleur violacée, et la lame positive une couleur orange. Ces couleurs passent peu à peu au noir. De plus, l'hydrogène recueilli présente des propriétés nouvelles: si l'on introduit dans la cloche graduée qui le contient, un fil de platine qui plonge en même temps dans l'eau et dans le gaz, ce dernier est absorbé peu à peu, quelquefois aux trois quarts. L'hydrogène ordinaire n'est pas absorbé dans les mêmes conditions.

Il peut aussi arriver que la quantité totale des deux gaz soit diminuée par leur recomposition, après qu'ils se sont dissous dans le liquide; ou bien par

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLI, p. 115.



l'absorption d'hydrogène par l'eau oxygénée préalablement formée, comme l'a reconnu M. Meidinger. Matteucci, qui admet l'existence d'une conductibilité propre des liquides (2002) invoque encore, pour les larges électrodes, le passage d'une plus grande proportion d'électricité n'agissant pas électrolytiquement. Avec des fils fins, toute l'électricité se répand par un petit nombre de points, et les molécules d'eau étant plus vivement sollicitées, la propagation se fait presque totalement par électrolyse.

**2005. Précautions à prendre dans l'emploi des voltamètres.** — Il résulte de ce qui précède que, pour obtenir des résultats corrects avec les voltamètres, il faudra employer de l'eau faiblement acidulée, opérer sur de petites quantités, et renouveler le liquide à chaque expérience. Les électrodes devront être formées de fils fins recouverts à leur partie inférieure d'une couche isolante. Il faudra, enfin, éviter d'opérer à une température trop basse. Il vaut mieux ne recueillir que l'hydrogène, qui est moins sujet à être absorbé; ce qui, d'un autre côté, évite la combinaison de ce gaz avec l'oxygène, par un effet que nous avons analysé en parlant de la pile à gaz (1871). Pour empêcher le mélange entre les portions de liquide qui baignent les électrodes, Poggendorff termine en bas les éprouvettes par des cylindres d'argile poreuse fixés au fond du vase. — Les voltamètres à poids (1994), qui ne contiennent que peu de liquide, et dans lesquels les gaz ne séjournent pas, sont moins sujets à erreur que ceux dans lesquels on mesure les volumes.

**2006. Détonation dans les voltamètres.** — Quand les deux gaz dégagés dans un voltamètre se rendent dans un même vase, le mélange explosif qu'ils forment peut détoner quand les lames de platine ne sont plus couvertes par le liquide. La figure 1384 représente le petit appareil au moyen duquel on observe ce phénomène curieux, découvert par M. Bertin<sup>1</sup>. Les gaz dégagés par le courant de 40 à 50 couples de Bunsen se rendent dans l'éprouvette *e* fermée par le bouchon *b*, et quand ils ont refoulé par le tube *t*, l'eau acidulée de manière qu'il n'en reste que peu dans l'éprouvette, le mélange gazeux détone, et l'éprouvette est violemment arrachée du bouchon *b*. Les lames ne sont pas chaudes et la pile ne peut donner que des étincelles d'une longueur insensible; ce qui montre que l'explosion n'est pas produite par la chaleur, mais par l'électricité, imprimant aux lames de platine une propriété particulière jusqu'à présent inexplicée<sup>2</sup>. Quand on n'emploie que 30 couples, il n'y a pas explosion; mais quand les lames de platine sont un peu découvertes, le volume du gaz n'augmente plus, comme si les lames recomposaient par le haut, les gaz qui se dégagent au bas. Des lames de platine platiné donnent les mêmes résultats.



Fig. 1384. — 1/3

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXVI, p. 233.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 450.

Quand, au lieu d'eau acidulée, on emploie de l'eau ordinaire et des lames de platine platiné, il n'y a plus d'explosion, même avec 50 couples; mais il se produit un phénomène singulier : le niveau de l'eau baisse d'abord jusqu'à la base des lames, puis remonte à leur sommet, et oscille continuellement entre ces deux positions. Ces phénomènes n'ont pas encore été expliqués; mais on entrevoit qu'ils ont quelque analogie avec ce qui se passe dans les couples voltaïques à gaz (1871).

#### V. De l'ozone,

**2007. Historique.** — L'électrolyse de l'eau acidulée a amené la découverte d'un produit singulier dont la nature est encore douteuse, et qui a beaucoup occupé les physiciens. Quoique l'étude de ce produit appartienne plutôt à la chimie qu'à la physique, nous avons pensé devoir en parler ici succinctement à cause de ses rapports avec l'électro-chimie, et de l'importance croissante qu'il acquiert chaque jour dans la météorologie.

Vers 1789, Van-Marum, ayant fait passer un grand nombre d'étincelles électriques dans une éprouvette pleine d'oxygène et placée sur le mercure, trouva que ce gaz répandait une odeur pénétrante, rappelant celle de l'acide sulfureux, du phosphore ou du gaz nitreux, et qu'il attribua à la *matière électrique*. Une odeur semblable se remarque près des fortes machines électriques en activité, entre autres de celle de Holtz, et dans les localités qui viennent d'être frappées de la foudre (1739). Van-Marum reconnut aussi que l'oxygène odorant oxyde rapidement le mercure à froid.

Ces faits étaient à peu près oubliés, lorsque M. Schœnbein, vers 1840, remarqua que l'oxygène dégagé dans l'électrolyse de l'eau acidulée possède une odeur pénétrante, et donna le nom d'*ozone* à la substance qu'il supposait mêlée à l'oxygène, et qu'il parvint à obtenir par des procédés purement chimiques, en faisant passer un courant d'air ou d'oxygène *humide* sur du phosphore<sup>1</sup>. L'ozone a été depuis l'objet des travaux d'un grand nombre de physiciens<sup>2</sup>.

**2008. Propriétés de l'ozone.** — 1<sup>o</sup> L'ozone paraît incolore. Son odeur est tellement pénétrante, que 1 millionième dans l'air devient sensible. Cette odeur a été comparée par M. S. Zinno à celle du homard, dont l'ozone aurait aussi le goût, d'après M. Houzeau.

2<sup>o</sup> M. Schœnbein a constaté que l'oxygène odorant rend une lame d'or ou de platine, qu'on y plonge bien desséchée, *négative* par rapport à une autre lame de même métal imprégnée d'oxygène ordinaire; comme on le reconnaît au sens du courant produit quand on enfonce ces lames dans un liquide conducteur : la première lame est polarisée, et il suffit de la chauffer ou de la plonger

<sup>1</sup> *Bibl. univ. de Genève* (1840), t. XXVIII, p. 342, et *Arch. de l'électr.*, t. V, 41 et 337.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXV à LXXVIII, et 4<sup>e</sup> série, t. I à XXVII.

dans du gaz hydrogène pour lui faire perdre sa polarité, qui, sans cela, se conserve assez longtemps. On peut polariser une lame d'or ou de platine de la même manière, en l'opposant froide et sèche à l'aigrette électrique qui s'échappe d'une pointe.

L'acide sulfurique, l'ammoniaque, l'eau de baryte n'ont pas d'action sur l'ozone. Il en est de même de l'eau pure, qui en dissout de 3 à 5 millièmes de son volume.

3° L'ozone détruit les couleurs organiques, et se comporte, dans une foule de réactions, comme le chlore et le brome. Il décompose l'*iodure de potassium*, dont la dissolution absorbe l'oxygène ozoné, en formant de l'iodate de potasse, et il reste de l'oxygène ordinaire. Du papier imbibé de cet iodure jaunit par l'iode mis en liberté. Si le papier est amidonné, il devient bleu, et fournit ainsi un moyen simple de constater la présence de l'ozone.

4° L'oxygène ozoné est un oxydant énergique : *quand il est humide*, il oxyde la plupart des métaux au maximum d'oxydation. Il transforme les acides sulfureux et azoteux en acides sulfurique et azotique, et se comporte, dans beaucoup de cas, comme les peroxydes de plomb, de manganèse et d'argent, et comme l'eau oxygénée. L'air ozoné forme des azotates en présence des bases énergiques et de l'eau. — Il faut citer l'oxydation à froid de l'argent, du mercure, et même du platine servant d'électrode positive. Quand le gaz est sec, il n'y a pas d'oxydation, même sur le cuivre et le zinc. MM. E. Becquerel et Frémy ayant rempli d'oxygène *sec* des tubes contenant de l'iodure de potassium fondu ou un métal sec, et les ayant scellés à la lampe, il n'y eut aucune absorption après qu'ils y eurent formé de l'ozone par une longue suite d'étincelles électriques lancées à travers le gaz.

5° L'ozone oxyde fortement les matières organiques, ou même *organisées*. Il altère rapidement le caoutchouc, le perce et le rend cassant; on ne doit donc pas l'employer dans les expériences sur l'ozone. Cet agent assainit l'air vicié; il a été reconnu comme un désinfectant des plus énergiques. M. Schœnbein a vu l'air d'un ballon infecté par le séjour de viande en putréfaction perdre toute odeur quand il y formait de l'ozone au moyen du phosphore, et ce n'était qu'après la désinfection que l'ozone manifestait sa présence.

6° L'ozone concentré est dangereux à respirer; il produit, ainsi que le chlore, l'inflammation des muqueuses. Une souris ne tarde pas à périr dans un air contenant de l'ozone.

**2009. Production et destruction de l'ozone.** — M. Schœnbein a constaté que l'odeur de l'ozone ne se manifeste, pendant l'électrolyse de l'eau, que dans l'oxygène dégagé, même quand ce gaz se mêle à l'hydrogène. Il faut que les électrodes soient toujours formées d'un métal non oxydable, comme l'or, le platine, et que l'eau soit rendue conductrice par les acides sulfurique, azotique ou phosphorique, ou par certains sels oxygénés. L'ozone ne se produit pas dans

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. XVIII, p. 194.

les dissolutions de chlorures, bromures, iodures. Le gaz ozoné conserve indéfiniment son odeur et ses propriétés, quand on le tient renfermé dans un flacon bien bouché.

On fait disparaître toute odeur et on rend à l'oxygène ses propriétés ordinaires, en jetant dans le flacon de la poussière de charbon, du mercure ou un métal oxydable en poudre. La chaleur détruit aussi l'ozone : si l'on fait passer le gaz odorant dans un tube chauffé à 250° environ, l'ozone est détruit et le volume du gaz devient double. M. Andrews a reconnu que l'ozone se détruit peu à peu dans un tube porté à 100°. Il disparaît instantanément au contact de la vapeur d'eau bouillante.

M. Marignac a reconnu, en électrolysant l'eau dans le vide, que la présence de l'azote n'est pas nécessaire à la production de l'ozone<sup>1</sup>; quand l'expérience avait marché pendant plusieurs jours, et que le quart de l'eau avait été décomposé, il se produisait toujours du gaz odorant. MM. Fremy et E. Becquerel, qui sont arrivés au même résultat<sup>2</sup>, mettaient l'eau acidulée dans un tube recourbé *ab* (fig. 1385). L'oxygène odorant s'échappait par le tube T, contenant les

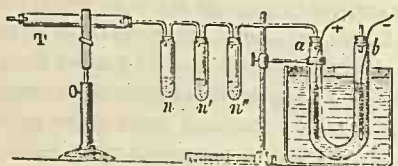


Fig. 1385.

substances soumises à son action, après avoir traversé les tubes laveurs *n, n', n''*. Obtenu ainsi par électrolyse, l'oxygène est très-peu ozoné, car il est à peine absorbable par l'iodure de potassium.

M. Marignac a reconnu que, pour obtenir de l'ozone, sans électricité, en faisant passer de l'oxygène sur du phosphore, il faut que ce gaz soit humide. L'acide carbonique, l'hydrogène, l'azote peuvent remplacer l'humidité, quoiqu'ils ne puissent produire l'ozone avec le phosphore quand ils sont seuls. Quand la lueur du phosphore ne se montre pas dans l'obscurité, il ne se forme pas d'ozone.

En général, toutes les fois que l'oxygène est dégagé à froid, il est ozoné. M. S. Zinno, ayant fait passer de l'oxygène à travers certaines essences, entre autres celle de térébenthine, et ayant ensuite chassé le gaz en chauffant légèrement, a obtenu de l'oxygène ozoné.

M. Marignac a obtenu l'ozone, dans l'oxygène sec et pur, au moyen d'étincelles électriques, ce qui prouve qu'il ne contient pas de composés azotés ou hydrogénés. MM. E. Becquerel et Fremy sont arrivés au même résultat, l'oxygène, purifié avec soin, étant renfermé dans des tubes scellés à la lampe; et ils ont reconnu que la proportion de gaz absorbable par l'iodure de potassium est d'autant plus grande que les étincelles sont plus longues et le volume du gaz plus faible. Cette proportion augmente à peu près proportionnellement au temps

<sup>1</sup> Archives de l'électricité de A. de La Rive, t. V, p. 5.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXV, p. 62.

pendant lequel passent les étincelles, jusqu'à la douzième heure; ensuite, elle diminue; probablement parce que l'étincelle détruit ce qu'elle a produit d'abord. Il faut donc, pour transformer tout l'oxygène, absorber le gaz modifié au fur et à mesure de sa formation. L'oxygène remplissait un petit eudiomètre *ab* (fig. 1386) reposant sur un bain d'iodure de potassium; les étincelles passaient entre deux fils de platine scellés en *a*, et bientôt le liquide remplissait totalement le tube. Une lame d'argent peut aussi absorber tout le gaz, mais moins rapidement que l'iode. L'eudiomètre repose alors sur l'eau, bouillie et couverte d'huile à l'extérieur, pour éviter la dissolution de l'air. Sans lame d'argent, cette eau n'absorbe pas l'oxygène transformé par l'étincelle.

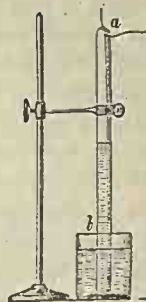


Fig. 1386.

MM. E. Becquerel et Fremy ont encore obtenu l'ozone par l'électrisation à distance, en faisant passer entre les pointes d'un excitateur universel une série d'étincelles glissant sur la surface extérieure d'un tube de verre rempli d'oxygène et scellé à la lampe (fig. 1387); aussitôt, on voit bleuir une bande de papier amidonné et ioduré que contient ce tube. Si l'on remplace l'oxygène par de l'hydrogène, le papier ne se colore pas; ce qui prouve que ce n'est pas l'électricité qui décompose l'iode.

**Dosage de l'ozone.** — Dans ces diverses expériences, il faut pouvoir connaître la proportion d'ozone contenue dans l'oxygène. M. Houzeau y parvient en dosant la quantité de potasse formée dans l'iodure de potassium qui l'a absorbé, après avoir préalablement expulsé l'iode par l'ébullition. — M. Zinno se sert de l'hyposulfite de soude, qui est décomposé par l'ozone; et non par l'oxygène ordinaire. On fait passer le gaz dans une solution titrée d'hyposulfite; il se forme un sulfate et il se dépose du soufre, que l'on recueille sur un filtre, et dont le poids fait connaître la quantité d'ozone. On fait la contre-épreuve en dosant l'acide sulfurique formé, au moyen d'une solution titrée de baryte. — M. P. Thénard a aussi indiqué une méthode très-précise fondée sur l'emploi de l'acide arsénieux et de l'hypermanganate de potasse.

**2010. Préparation de l'ozone.** — Pour obtenir l'ozone en grande quantité, on emploie l'électricité ou les actions chimiques. Voici les principales méthodes :

1<sup>o</sup> Quand on emploie l'électrolyse, qui ne donne que de faibles résultats, on prend de l'eau très-acidulée et refroidie, et l'on opère

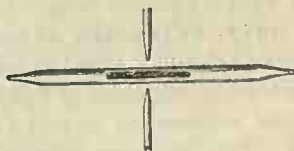


Fig. 1387,

avec des fils fins séparés par une cloison poreuse. M. Planté a reconnu que des fils de plomb donnent des résultats bien supérieurs à ceux que donnent des fils de platine, et qui sont à ceux-ci comme 3 est à 2.

2<sup>o</sup> Quand on veut opérer par décharges électriques, il vaut mieux employer des

décharges obscures (aigrettes, effluves) que des étincelles, celles-ci produisant de la chaleur qui tend à détruire l'ozone. Voici comment procède M. Houzeau : Un tube de verre étroit, à parois très-minces, de 40<sup>cm</sup> de longueur environ, contient un gros fil de platine, ou cuivre, plomb, étain..., qui communique par une extrémité avec un fil de platine traversant le tube et recevant l'électricité positive d'une bobine d'induction. L'électricité négative circule dans un fil métallique enroulé en hélice autour du tube ; on fait passer à travers ce tube un courant d'oxygène pur, avec une vitesse de 1 litre par heure ; et ce gaz, que l'on recueille sur l'eau, sort du tube, fortement ozoné et pouvant contenir plus de 180 milligrammes d'ozone par litre. — M. Houzeau forme un appareil à *double effet* en enveloppant le tube d'un manchon de verre, dans lequel on fait circuler un second courant d'oxygène qui enveloppe le fil en hélice ; on obtient ainsi du gaz ozoné tout aussi concentré et en quantité double. Ce gaz possède un pouvoir décolorant 40 fois plus grand que celui du chlore, enflamme directement le gaz oléfiant, et forme avec la benzine l'*ozo-benzine*, qui détone violemment par le choc ou la chaleur.

3<sup>o</sup> Par procédé chimique : on fait passer un courant d'oxygène dans une série de ballons communiquant entre eux par des tubes, et contenant de l'eau d'où émergent des bâtons de phosphore. Le gaz passe par bulles à travers l'eau des ballons, dont le dernier est un ballon laveur auquel est adapté le tube à recueillir le gaz. — M. Houzeau mêle dans un ballon muni d'un tube abducteur,  $\frac{1}{5}$  en poids de *bioxyde de baryum* pur à de l'acide sulfurique pur, et concentré. L'oxygène ozoné se dégage à froid, mais l'opération peut avoir besoin d'être excitée par un peu de chaleur, ou modérée par refroidissement, suivant l'état des substances mélangées.

**Applications.** — On a fait quelques applications industrielles de l'ozone. M. Wiedemann, en 1869, à Boston, a monté une usine où il emploie l'ozone pour enlever le goût empyreumatique du whisky fabriqué avec l'orge ou le maïs. En ajoutant au liquide sept fois son poids d'eau, et le traitant de la même manière, il obtient du vinaigre, qui trouve immédiatement son emploi. — M. Pasteur a proposé l'emploi de l'ozone, pour vieillir le vin.

**2011. De la nature de l'ozone.** — La nature de l'ozone est encore enveloppée d'obscurité. Quand on considère les nombreuses propriétés de cet agent, les réactions énergiques qu'il produit, les circonstances variées dans lesquelles il prend naissance, on ne peut s'empêcher de songer à cet ancien *phlogistique* (II, 1287) qui servait autrefois à expliquer toute une classe de phénomènes, et dont les découvertes de Lavoisier ont fait rayer le nom de la science.

M. Schœnbein a d'abord regardé l'ozone comme une substance particulière mêlée à l'oxygène, ou même comme le résultat de la décomposition de l'azote, qu'il supposait nécessaire à sa production. Il l'a ensuite considéré comme un suroxyde d'hydrogène. MM. Marignac et de La Rive, en 1845, ont admis que l'oxygène ozoné est de l'oxygène ordinaire amené, par l'électricité, à un état moléculaire dans lequel ses affinités sont surexcitées. M. Schœnbein n'a pas

tardé à partager cette opinion, qui a été corroborée plus tard par des expériences nombreuses, parmi lesquelles celles de MM. E. Becquerel et Fréiny, qui ont même proposé de remplacer le mot *ozone* par celui d'*oxygène électrisé*. M. Schönbein a plus tard supposé deux états de l'oxygène actif; l'un négatif, qui serait l'*ozone*, l'autre positif qu'il nommait l'*antiozone*, mais dont l'existence n'a pas été confirmée. — D'autres physiiciens ont admis trois sortes d'ozone, suivant la provenance. Celui qu'on obtient par électrolyse serait un suroxyde d'hydrogène. Mais M. Andrews et M. Soret ont prouvé que ce produit ne peut contenir d'hydrogène; car, ayant fait passer plusieurs litres d'oxygène sec provenant de l'électrolyse de l'eau, dans un tube où l'ozone était détruit par la chaleur, suivi d'un tube en U contenant de l'acide phosphorique, le poids de ce dernier n'augmenta pas, tandis qu'il eût dû gagner un poids très appréciable, si l'ozone eût été le composé  $\text{HO}^3$ . M. Soret est arrivé de son côté aux mêmes résultats.

Il résulte de ces expériences et de beaucoup d'autres, et surtout de la formation de l'ozone dans l'oxygène pur et sec renfermé dans un tube fermé, qu'il n'y a qu'une espèce d'ozone, que ce produit n'est pas composé de plusieurs substances, et qu'il ne peut être qu'une modification de l'oxygène. Cette opinion, aujourd'hui généralement adoptée, est basée principalement sur deux faits capitaux qu'il nous reste à faire connaître: la contraction qu'éprouve l'oxygène en se transformant en ozone, et le grand pouvoir absorbant de l'oxygène ozoné pour les rayons de chaleur.

1<sup>o</sup> MM. Andrews et Tait ont découvert que l'ozone est plus dense que l'oxygène. Ce dernier gaz était renfermé dans un tube fermé muni d'un petit manomètre à acide sulfurique concentré. Deux fils de platine pénétrant dans le tube à travers le verre, servaient à y faire passer de l'électricité par décharges obscures. On voyait la pression diminuer à mesure que l'ozone se formait. On fermait ensuite l'ouverture extérieure du manomètre, on détruisait l'ozone en chauffant le tube à  $200^{\circ}$ , et après le refroidissement, on ouvrait le manomètre, qui indiquait la pression primitive. — M. Babo remplissait d'oxygène sec les deux branches d'un gros tube en U dont la partie courbe contenait de l'acide sulfurique; il scellait les branches à la lampe, et développait de l'ozone dans l'une d'elles, au moyen d'effluves électriques. L'acide sulfurique montait dans cette branche, pour reprendre son premier niveau quand on avait détruit l'ozone par la chaleur.

2<sup>o</sup> Nous avons vu comment M. Tyndall a trouvé que les gaz composés absorbent fortement la chaleur rayonnante, contrairement aux gaz simples, qui sont très diathermanes (II, 867). Ayant opéré sur de l'oxygène ozoné, obtenu par électrolyse dans un voltamètre entouré d'un mélange réfrigérant et muni d'électrodes à fils fins, il trouva une absorption 136 fois plus forte que celle de l'oxygène ordinaire. Cette absorption était plus faible quand il avait préparé l'ozone au moyen d'électrodes à grande surface, qui en produisent moins. L'oxygène ozoné absorbe donc la chaleur rayonnante en grande proportion,

comme les gaz composés. M. Tyndall avait conclu de là, le premier, qu'il y a condensation des atomes dans la molécule d'ozone, tandis que l'on supposait auparavant que c'était dans l'oxygène ordinaire que les atomes étaient groupés et qu'ils se séparaient quand l'ozone se formait.

Plusieurs physiiciens ont cherché à évaluer la densité de l'ozone, ou le degré de contraction qui accompagne sa formation, afin d'en déduire le mode de groupement des atomes. Sans entrer dans le détail des expériences faites à ce sujet, nous citerons le résultat auquel est arrivé M. Soret en s'appuyant sur la loi des vitesses de diffusion des gaz, au moyen de laquelle on peut comparer leurs densités, qui sont en raison inverse des carrés de ces vitesses (I, 451). Le chlore était pris pour terme de comparaison, après avoir été mélangé à une proportion d'oxygène égale à celle que contenait l'ozone. M. Soret a trouvé ainsi pour densité de l'ozone par rapport à l'air, 1,653, ou à peu près une fois et demie la densité de l'oxygène ordinaire. Le volume de ce dernier gaz se réduit donc dans le rapport de 3 à 2 quand il passe à l'état d'ozone. On a conclu de là que la formule atomique de l'ozone doit être  $OO_3$ , représentant un bioxyde d'oxygène, formé de 3 volumes condensés en deux, et reproduisant trois volumes quand on détruit l'ozone. Les affinités énergiques de l'oxygène ozoné s'expliquent par l'état naissant des atomes du groupe moléculaire, qui se décompose en présence des substances avec lesquelles ces atomes doivent se combiner; aussi, M. Zinno admet-il qu'il n'y a pas de différence entre l'ozone et l'oxygène naissant, et, en effet, toutes les expériences prouvent l'identité de leurs effets.

Ajoutons enfin, qu'il paraît que d'autres corps peuvent, comme l'oxygène, présenter des propriétés nouvelles quand ils sont obtenus par électrolyse; du moins, c'est ce que M. Ozan a cru pouvoir conclure de certaines expériences sur l'hydrogène, qui présente, comme nous l'avons vu, des propriétés singulières dans le voltamètre (2003).

**2012. OZONE ATMOSPHÉRIQUE.** — M. Schœnbein a constaté que le papier ioduré et amidonné, de blanc devient souvent bleu, quand on l'expose à l'air libre, d'où il a conclu que l'atmosphère contient habituellement de l'ozone. Plusieurs physiiciens se sont mis dès lors à observer les variations de l'ozone contenu dans l'air, en se servant du papier de M. Schœnbein et d'une échelle de teintes divisée en dix degrés, allant du blanc au bleu foncé. Mais la coloration de ce papier peut être modifiée par tant de causes diverses que l'existence de l'ozone dans l'atmosphère a été longtemps regardée comme douteuse. Par exemple, M. Cloez a montré que des exhalaisons d'arbres résineux, des traces d'acide azotique ou hypoazotique, d'essences de térébenthine, citron, menthe, lavande ayant eu le contact de l'oxygène; l'air humide même, sous l'influence d'une vive lumière, bleuissent assez rapidement le papier ioduré. Le chlore, le brome en chassant l'iode, agissent de la même manière. La preuve de l'existence de l'ozone atmosphérique était donc encore à trouver.

M. Bérigny, après avoir fait ressortir les défauts des divers papiers ozonos-



copiques généralement employés, en a adopté un préparé par M. Jame, de Sédan, par un procédé qu'il n'indique pas, et a construit après de nombreuses expériences faites avec le concours de MM. Richard et J. Salleron, une échelle ou *gamme ozonométrique*, de 21 teintes, passant du blanc au noir par les divers tons du violet. — M. Schænbein a, de son côté, indiqué un papier imbibé de *protoxyde de Thallium*, qui brunit par l'ozone, en se transformant en peroxyde, et n'est pas coloré par l'acide hypo-azotique.

M. Andrews a prouvé directement que le principe actif de l'air n'est autre que l'ozone, en faisant passer, sur du mercure dans un tube en U, 80 litres d'air agissant sur le papier; le mercure était sensiblement oxydé. Si l'air passait d'abord à travers un ballon chauffé à 250°, il n'oxydait plus le mercure, l'ozone étant détruit à cette température.

**Expériences de M. Houzeau.** — M. Houzeau a fait de nombreuses expériences sur l'ozone et sur les procédés ozonométriques<sup>1</sup>. En 1856, il a imaginé un papier sensible, au moyen duquel on ne peut être induit en erreur par les diverses exhalaisons que peut contenir l'air. La bande de papier est trempée dans de la teinture de tournesol, rougie par de l'eau assez faiblement acidulée par l'acide sulfurique pour donner au papier une teinte *rouge-vineux*. Un tiers de la bande est ensuite imprégné d'une solution neutre d'iode de potassium au centième. Ce papier est bleui par l'ozone; non plus par le déplacement de l'iode, mais par l'action de la potasse formée, ramenant au bleu la teinture de tournesol. La partie non iodurée sert de terme de comparaison, et décèle la présence dans l'air de vapeurs acides ou alcalines qui la rougissent plus fortement ou la ramènent au bleu. Le chlore, le brome ne peuvent agir sur la partie iodurée, le chlorure ou le bromure qu'ils forment étant neutres. — Des expériences comparatives ont prouvé à M. Houzeau que la teinte bleue que prend la partie iodurée n'est pas due à l'oxygène ordinaire de l'air, ni à des vapeurs nitreuses ou d'eau oxygénées. Il faut donc admettre que cette teinte indique la présence de l'ozone dans l'air. Cette conclusion a été confirmée par les faits suivants :

1° L'air de la campagne, quand il bleuit le papier ioduré, désinfecte, comme l'ozone, les objets soumis à son action. — 2° Cet air décolore une bande de papier de tournesol suspendue à l'abri du soleil et de la pluie, et d'autant plus complètement que cet air bleuit plus rapidement le papier ioduré. C'est à cette propriété qu'est due, au moins en partie, l'action de l'air dans le blanchiment des toiles, de la cire, exposées à l'air humide. — 3° L'odorat peut reconnaître l'odeur d'ozone, en été comme en hiver, même dans l'air qui n'en contient pas assez pour bleuir le papier sensible. Il suffit pour le constater, de passer d'une chambre qui ne contient pas d'ozone, dans la campagne; et l'odeur ressentie n'est pas un effet de contraste, car on n'éprouve rien de pareil quand on passe dans une vaste enceinte fermée contenant de l'air aux mêmes conditions de température et d'humidité que l'air extérieur.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXII et LXVII, et 4<sup>e</sup> série, t. XXVII.

**2013. Origine de l'ozone atmosphérique.** — On admet généralement que l'ozone contenu dans l'atmosphère est produit par les effluves électriques qui la traversent aux époques des orages, ou qui sont apportées par l'air des hautes régions. Les végétaux, en décomposant l'acide carbonique dans l'acte de leur respiration, versent dans l'air, de l'oxygène qui, dégagé à froid, doit être ozoné (2009), ce qui explique l'influence des plantes sur la salubrité de l'air, l'ozone détruisant les miasmes en les oxydant. Les végétaux qui se développent rapidement, comme l'eucalyptus, le soleil (*Helianthus annuus*) sont surtout efficaces, et l'on s'explique ainsi leur influence pour assainir les contrées marécageuses.

**2014. Observations ozonoscopiques.** — Beaucoup d'observateurs se sont appliqués à l'étude des variations de l'ozone dans l'atmosphère; nous citerons MM. Berignÿ à Versailles, Bœckel, Houzeau à Rouen; Mollat, Poey à la Havane, Pouriau, Scoutetten,..... — Pour observer l'ozone de l'air, M. Houzeau suspend du côté du nord, dans un endroit bien découvert, une assiette renversée, au moyen d'un cordon qui en traverse le fond et est attaché en dedans à un morceau de liège. La bande de papier de tournesol en partie iodurée, est fixée au liège au moyen d'une épingle, l'extrémité iodurée en bas. La teinte produite n'étant pas stable, il faut la noter dès qu'on enlève la bande. M. Houzeau emploie les termes suivants : *zéro, bleu- faible, bleu, très-bleu*. On ne doit conclure à la présence de l'ozone qu'autant que la partie non iodurée n'a pas changé de teinte.

**Résultats généraux.** — Les conclusions auxquelles sont arrivés les physiiciens qui ont fait des observations suivies sur l'ozone atmosphérique présentent assez souvent des divergences, qui dépendent en partie des papiers sensibles employés, du climat, des mouvements de l'air, et aussi des fluctuations perpétuelles qu'éprouve l'ozone, se produisant et se détruisant sans cesse sous l'influence de causes variées. Nous nous contenterons donc de citer les faits généraux sur lesquels on est à peu près d'accord.

1<sup>o</sup> On ne trouve pas d'ozone dans les appartements; dans les rues populeuses des villes, où la partie non iodée rougit ordinairement; au fond des vallées; dans les régions marécageuses, ou contenant des matières en putréfaction; et, en général, partout où il y a des miasmes, des exhalaisons qui détruisent l'ozone en s'oxydant à ses dépens, et sont détruits par lui. — D'après un certain nombre d'observations citées par M. Zinno<sup>1</sup>, faites en France, Angleterre, Suisse, Italie, à la Havane, l'ozone disparaît, ou du moins ne se montre qu'en très-petite quantité, pendant les épidémies de choléra, ce qui paraît dû à la destruction de l'ozone par des miasmes surabondants, et au défaut de production provenant de la sécheresse et de l'absence d'électricité. — Il y aurait, au contraire, augmentation d'ozone pendant le règne des affections catharrales.

<sup>1</sup> Une traduction du mémoire de M. Zinno se trouve dans le n<sup>o</sup> 48 (*l'ozone*) des actualités scientifiques de M. l'abbé Moigno.

2° La proportion d'ozone en un même lieu augmente à mesure qu'on s'élève. Elle est prononcée en mer, et en pleine campagne, surtout s'il y a beaucoup d'arbres; ce qui explique l'influence favorable sur les malades, du séjour des montagnes, de la campagne et du bord de la mer. La quantité *maximum* est, d'après M. Houzeau,  $\frac{4}{450000}$  du poids de l'air, ou  $\frac{4}{700000}$  de son volume.

3° L'humidité favorise le développement de la teinte bleue sur le papier sensible. Il en est de même de la pluie et du vent, qui apportent l'ozone des régions supérieures ou latérales. On a reconnu, dans l'Atlantique, par 53° de latitude nord, que les courants venant de l'équateur contiennent plus d'ozone que ceux qui viennent des pôles.

4° MM. Bérigny, à Versailles, Houzeau, à Rouen..., ont reconnu qu'il y a maximum dans la proportion d'ozone pendant les bourrasques venant de l'Atlantique, qui amènent des masses d'air chargées d'électricité (1757).

5° La quantité d'ozone varie avec les saisons. À cet égard, les mois sont rangés dans l'ordre suivant : *mai, mars, avril, juin, août, juillet, septembre, janvier, décembre, octobre, février, novembre*; mai en donnant le plus, et novembre le moins. Il est à remarquer que le premier mois est celui où la végétation est le plus active, et le dernier, celui pendant lequel les plantes perdent leurs feuilles, qui, en se décomposant sur le sol, produisent des exhalaisons qui détruisent le peu d'ozone qui pourrait se former.

Ce que nous venons de dire sur l'ozone atmosphérique montre quel rôle important cet agent joue dans la nature. Son action sur les êtres organisés, sur la respiration, sur les humeurs du corps des animaux, actions qui ont été expérimentées avec quelque détail, donnent à l'étude des variations de l'ozone atmosphérique une importance majeure au point de vue de la climatologie, de l'hygiène publique et de l'art de guérir. Les résultats généraux auxquels on est déjà arrivé, malgré la nouveauté du sujet et l'imperfection des premiers réactifs employés, sont bien faits pour encourager les observateurs persévérants à continuer une étude dont l'utilité s'affirme de plus en plus.

## VI. Applications de l'électro-chimie. — Galvanoplastie.

**2015. Historique.** — La *galvanoplastie* ou *galvanoplastique* est l'art de déposer, par électrolyse, sur des corps servant d'électrode négative, les métaux contenus dans une dissolution, soit en couche mince adhérente, pour protéger ces corps ou leur donner un nouvel aspect, soit en couche épaisse cohérente, pour en reproduire sur un moule les formes et les reliefs, ce qui est l'objet de la *galvanoplastie* proprement dite, qui forme ainsi une branche de la galvanoplastie générale, et dont nous allons d'abord nous occuper.

**I. Galvanoplastie.** — On avait remarqué, dès le temps de Volta, que le métal déposé au pôle négatif était parfois dense et compacte au point de reproduire fidèlement les éraillures d'une lame de platine. De la Rive avait insisté

sur ce fait, dont on n'avait cependant tiré aucun parti, lorsque, en 1837, Jacobi, à Saint-Petersbourg, eut l'idée d'en faire des applications. Il opéra d'abord sur des planches de cuivre gravées, dont il reproduisit en relief les traits en creux.



Fig. 1388.

Ayant pris cette reproduction, à son tour, pour électrode négative, il obtint une copie fidèle de la planche gravée. — Vers la même époque, Spencer, en Angleterre, reproduisait des clichés au moyen de dépôts de cuivre; mais tout ce qu'il a publié à ce sujet est postérieur aux communications officielles de Jacobi. Les premiers essais de Spencer ont été faits sur des caractères typographiques; il en prenait d'abord la contre-épreuve par le dépôt de cuivre; puis, se servant de celle-ci comme moule, il obtenait une copie exacte, qui lui servait à imprimer. Il expérimenta ensuite sur une médaille, dont les plus fins détails furent reproduits avec une perfection admi-

nable, qui défait le microscope.

Pour obtenir un dépôt de cuivre compact et malléable, il faut 1<sup>o</sup> que le courant soit d'intensité constante, et ni trop fort, auquel cas le dépôt serait pulvérulent ou très-fragile, ni trop faible, ce qui le rendrait cristallin et cassant. 2<sup>o</sup> La solution de sulfate de cuivre doit être toujours saturée, afin que sa conductibilité ne change pas; ce qu'on obtient en y mettant des cristaux de sulfate de cuivre, ou bien en prenant pour électrode positive une plaque de cuivre, que l'acide mis en liberté dissout peu à peu de manière à remplacer le sel décomposé. Cette première application de l'électrode soluble (1975) fit prendre un rapide essor à la galvanoplastie. On emploie du sulfate de cuivre en beaux cristaux, que l'on dissout à froid; on y mêle un peu d'acide sulfurique, le dépôt étant cristallin quand la dissolution est neutre.

**2016. Appareils.** — On les divise en *appareils simples*, qui fournissent eux-mêmes l'électricité, et *appareils composés*, dans lesquels on emploie une pile proprement dite. Ces appareils, perfectionnés et modifiés de diverses manières, ne présentant entre eux que des différences de détail, il nous suffira d'en décrire quelques-uns.

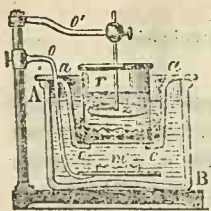


Fig. 1389.

**Appareil simple.** — Il consiste essentiellement en un vase divisé en deux par une cloison poreuse (fig. 1388); d'un côté, se trouve une solution de sulfate de cuivre; dans laquelle plonge le moule *m*, la face à reproduire tournée du côté de la cloison; dans l'autre compartiment est de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, dans laquelle plonge une lame de zinc, *z*, communiquant avec le moule. L'action chimique exercée sur le zinc développe de l'électricité, et le sulfate décomposé dépose

son cuivre sur le moule. Une corbeille, *c*, contient des cristaux destinés à entretenir la saturation.

**Electrotype pour les médailles.** — Un cylindre de verre *acca* (fig. 1389)

s'appuie, par un rebord *aa*, sur le contour du vase AB rempli de la solution de sulfate de cuivre. Ce cylindre est muni à sa partie inférieure, d'un autre rebord *cc*, sur lequel s'appuie un second cylindre de verre, *r*, fermé en bas par une membrane, et contenant de l'eau acidulée dans laquelle plonge la lame de zinc *z*. Le moule, *m*, est placé au-dessous de la membrane, et communique avec le zinc par les tiges de métal *o*, *o'*. Des cristaux de sulfate de cuivre sont placés autour du cylindre *r*. — On peut remplacer le cylindre *acca* par un anneau de bois soutenu par des montants accrochés au bord du vase AB. — La figure 1390 représente une disposition souvent employée. Le zinc *Z* est plongé dans l'eau acidulée d'un vase poreux qui s'enfonce dans la dissolution de sulfate de cuivre, dont l'état de saturation est entretenu au moyen de cristaux placés en *c*, *c'*. Les moules, suspendus à des tringles métalliques *T* portées par le zinc, sont distribués autour du vase poreux.

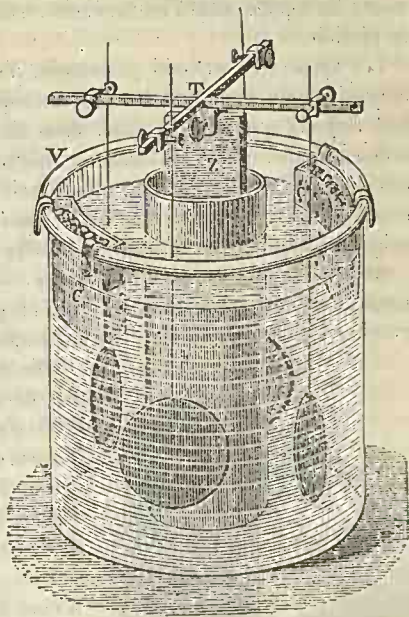


Fig. 1390.

Il faut, pour obtenir un dépôt bien malléable, que la surface du zinc diffère peu de celle du moule. Si la première est trop petite, le dépôt est cristallin; dans le cas opposé, il est pulvérulent et sans cohérence.

**Appareils composés.** — Une cuve en bois AB (fig. 1391) contient la dissolution de cuivre. Le moule *mm*, placé au fond, communique avec le pôle négatif d'une pile à courant constant P. La lame de cuivre *cc* forme l'électrode soluble; elle est soutenue par une toile *h*, qui empêche les impuretés du cuivre *cc*, de tomber sur le moule.

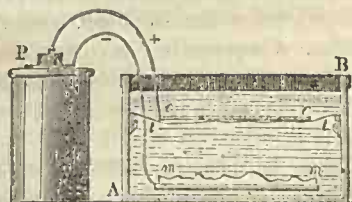


Fig. 1391.

La figure 1392 représente une disposition avec laquelle on opère en même temps sur plusieurs moules suspendus verticalement. Sur les bords de la cuve AB, s'appuient des baguettes métalliques *ab*, *ce*, communiquant avec le pôle négatif d'une pile, et auxquelles on suspend les moules. Une troisième baguette soutient

une ou plusieurs lames de cuivre placées entre les deux séries de moules, et communiquant avec le pôle positif. Il est à remarquer qu'il se forme souvent, à l'extérieur du dépôt de cuivre, des stries verticales produites par les mouvements du liquide, dont l'homogénéité, sans cesse détruite, tend sans cesse à se rétablir.

Les appareils composés permettent d'opérer sur des moules de grandes dimensions, en employant des piles à couples nombreux et à grande surface. Il faut toujours que cette surface, dans chaque couple, soit en proportion avec celle du moule, et que l'intensité du courant soit constante. On se sert souvent des piles de Daniell et de Bagnation; mais quand on veut faire passer le même courant à travers plusieurs appareils placés les uns à la suite des autres, ce qui exige une plus grande tension, on préfère les piles à charbon.

**2017. Dépôts de divers métaux.** — Le cuivre n'est pas le seul métal employé dans la galvanoplastie; l'or, l'argent, le platine donnent d'aussi bons résultats. Pour l'or et l'argent, on emploie le plus souvent un mélange de 1 partie de chlorure d'or ou d'argent, et de 10 de cyanure de potassium dissous dans 100 d'eau; et pour le platine, le double chlorure de platine et de potassium. On a aussi cherché à déposer le zinc, le plomb, l'étain. Pour le premier, on emploie le sulfate; pour le second, l'acétate très-étendu et acidulé, et pour le troisième, une dissolution d'étain dans l'eau régale, acidulée par l'acide nitrique. Mais ces métaux, surtout les deux derniers, forment difficilement des dépôts convenables.

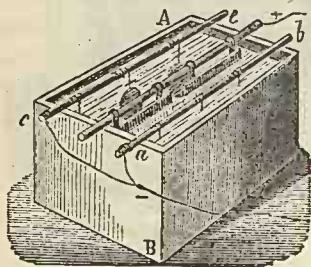


Fig. 1392.

**2018. Des moules.** — Les moules se font en métal, ou en matières non métalliques. Les moules de métal s'obtiennent souvent par dépôt électrochimique de cuivre sur l'objet lui-même. On a ainsi une contre-épreuve, dans laquelle on dépose ensuite du cuivre pour obtenir une copie de l'objet. On fait encore des moules en plomb, soudure des plombiers, alliage fusible de d'Arcet, alliage d'imprimerie: on coule l'alliage en fusion sur une surface horizontale, et l'on applique dessus l'objet à mouler. Enfin, quand cet objet est dur et résistant, comme une médaille, on en prend l'empreinte, avec du plomb, par une forte pression.

Avec les moules métalliques, on a à craindre l'adhérence du dépôt. Pour éviter cet accident, on graisse légèrement la surface, ou mieux on la saupoudre de plombagine en poudre impalpable. M. Spencer la lave avec une eau alcaline. On peut encore l'exposer à la vapeur de l'iode, comme pour préparer une plaque daguerrienne. Enfin, M. Boquillon a imaginé de la plonger un instant dans la fumée d'une flamme de résine, qui dépose une couche blanchâtre presque imperceptible; c'est ce qu'on appelle *voiler* ou *flamber* le moule. Le côté qui ne

doit pas recevoir de cuivre est recouvert d'une couche de cire : et, s'il y a lieu, un rebord en carton ou en plomb limite le contour du dépôt.

Pour les moules non métalliques, on rend la surface conductrice, au moyen d'argent, ou mieux de plombagine, en poussière impalpable, que l'on applique en couche imperceptible, au blaireau ou à la brosse. C'est ce qu'on appelle *métalliser* la surface. Ces moules se font en plâtre, que l'on rend imperméable en les trempant dans la stéarine fondue ; en cire d'Espagne, cire d'abeille, stéarine, gélatine. Le soufre donne des empreintes très-fidèles, mais il faut le vernir pour l'empêcher de s'unir au métal qui se dépose. M. Gueyton, qui a beaucoup perfectionné la galvanoplastie, fait les moules en gutta-percha, substance qui convient surtout aux objets en ronde bosse, sa flexibilité se prêtant facilement à la dépouille. Enfin, M. Mayo recommande comme donnant un moulage supérieur, un mélange de cire blanche et de blanc de plomb très-fin ; et M. Lockey, un mélange de 1 partie de cire ; 1 de stéarine et  $\frac{1}{2}$  de plombagine en poudre. Cette dernière composition se moule très-nettement, se détache d'elle-même au bout d'une demi-heure, et ne gâte pas le bronze des médailles.

M. A. Martin, au moyen de la gélatine, qui a la propriété de gonfler dans l'eau et de se contracter dans l'alcool, obtient à volonté des amplifications ou des réductions d'un même modèle, en opérant des moulages successifs. La stéarine éprouvant un retrait prononcé en se solidifiant, M. Blandely s'en est servi de son côté pour obtenir des réductions du modèle.

**2019. APPLICATIONS DE LA GALVANOPLASTIE.** — La galvanoplastie sert à reproduire en cuivre, or, argent....., des médailles, timbres, cachets..... Quand on veut reproduire une médaille, on prend des copies de ses deux faces, que l'on soude ensuite sur celles d'un disque d'épaisseur convenable.

**Vases, statues, etc.** — On reproduit les bas-reliefs, statues, vases..., avec une grande économie, et avec une fidélité de détails admirable. Pour les bas-reliefs de grandes dimensions et à fortes saillies, on arme l'électrode positive, de branches qui s'enfoncent dans les cavités du moule. Sans cette précaution, le courant passerait de préférence par les parties saillantes, et le dépôt ne se ferait que sur les reliefs du moule, ou y serait plus épais que dans les creux. C'est ainsi qu'ont été obtenus les bas-reliefs du piédestal de la statue de Guttemberg, à Strasbourg.

Pour les vases, les statuettes, on en prend le moule, en plusieurs parties, avec du plâtre ou de la stéarine, on ajuste et on soude ces parties avec de la cire, après les avoir *métallisées* en dedans ; et on les plonge dans la dissolution, de manière que le liquide remplisse la cavité intérieure, qui reçoit l'électrode positive. Cette électrode envoie des ramifications dans les parties les plus enfoncées. On la forme souvent d'une lame de plomb criblée de trous et pliée de manière à être partout à la même distance de la surface du moule.

On trouve dans le commerce, une foule de statuettes, figurines, vases ornés, obtenus par ce moyen. La surface de ces objets peut être dorée ou argentée par des procédés dont nous parlerons bientôt (2025).

Pour les grandes statues, les différentes parties du moule en plâtre, rendues imperméables par la stéarine et métallisées en dedans, sont réunies de manière à former une espèce de vase dans lequel on verse la dissolution, et par la surface intérieure duquel on fait arriver le fluide négatif. M. Christophe a reproduit ainsi, entre autres, le *Pensieroso* de Michel-Ange, statue de 3<sup>m</sup> de hauteur.

Souvent on reproduit les grandes pièces, par parties que l'on soude ensuite à l'étain ou à l'argent, puis on recouvre chaque soudure avec du cuivre. Pour cela, on l'entoure d'un rebord en cire, de manière à former une espèce de rigole, dans laquelle on verse une solution de sulfate de cuivre. On fait ensuite déposer le cuivre sur la soudure, au moyen d'un courant.

**2020. Electrotypic.** — On donne ce nom à la partie de la galvanoplastie qui a pour objet la reproduction des planches gravées, des clichés, gravures sur bois, compositions d'imprimerie. Nous avons dit (2015) comment on peut reproduire autant de fois que l'on veut une planche gravée sur cuivre, de manière que le tirage ne soit plus limité par l'usure de la planche. On reproduit ainsi les planches en taille douce pour les estampes, les timbres-postes, les cartes à jouer, les cartes de géographie, et c'est ainsi qu'a été tirée la grande carte géologique de la France. — Les planches d'acier ne pouvant être plongées dans la solution de cuivre, on en fait la contre-épreuve en argent, sur laquelle on dépose ensuite le cuivre. On peut, du reste, obtenir cette contre-épreuve avec la cire, le plâtre, ou encore au moyen d'une lame de plomb que l'on comprime sur la planche gravée, en les faisant passer ensemble entre les cylindres d'une presse à imprimer en taille douce. Ce procédé, qui convient aussi aux planches gravées sur cuivre, est encore appliqué à la reproduction de feuilles de plantes, de fleurs....., qu'on place entre une lame de plomb et une lame de cuivre, et qu'on presse fortement; le plomb prend l'empreinte de ces objets, et sert de moule pour obtenir une contre-épreuve en cuivre, qui donne, par un second dépôt, une plaque gravée en creux. Il est évident que les objets ainsi reproduits sont écrasés et déformés.

Smée a employé le courant de sa pile, pour obtenir des planches de cuivre pur, qu'il n'y a plus qu'à polir, pour les employer à la gravure au burin ou à l'eau forte, et qui sont préférables au cuivre du commerce, dans lequel on trouve souvent de l'étain ou d'autres métaux, qui surprennent la main du graveur, ou rendent l'action de l'eau forte irrégulière.

Une application courante est la reproduction des gravures sur bois. Après avoir pris, en gutta-percha, le moule de la surface gravée, on y dépose une couche de cuivre de 0<sup>mm</sup>, 5 d'épaisseur environ, sur laquelle on coule de l'alliage des caractères d'imprimerie, de manière à former une plaque de 3 à 4<sup>mm</sup> d'épaisseur, qui est ensuite clouée sur une tablette de bois. On donne ainsi à l'ensemble une épaisseur totale égale à la hauteur des caractères d'imprimerie. Au moyen de ces clichés, désignés souvent sous le nom de *galvanos*, on peut obtenir un tirage illimité, le même bois gravé pouvant être ainsi reproduit un grand nombre de fois par la galvanoplastie.



**Procédé Gillot.** — Ce procédé économique est très employé dans la typographie. 1° On décalque une épreuve fraîche de lithographie sur la surface polie d'une plaque de zinc. 2° On plonge cette plaque, dont le revers est préservé par un vernis, dans de l'eau acidulée par l'acide nitrique, qui attaque et creuse légèrement le zinc partout où il n'est pas recouvert par l'encre du dessin, dont les traits restent en saillie. 3° On remplit les creux d'un vernis, et l'on dépose par la galvanoplastie, du cuivre sur les traits saillants, que le vernis ne cache pas, et l'on a ainsi une planche en relief que l'on fixe sur une tablette de bois et que l'on emploie comme les galvanos. Aujourd'hui on se dispense habituellement de la troisième opération.

**Galvanographie.** — On dessine sur une planche de métal, au moyen d'une encre formée d'un mélange d'essence de térébenthine et de gomme laque, et l'on dépose une couche de cuivre sur cette planche. L'épaisseur des traits forme sous la couche déposée, des lignes en creux; on détache la couche et l'on s'en sert comme d'une planche gravée en creux pour tirer des épreuves. M. Hoffmann a trouvé une encre tellement fluide qu'on peut former des traits et obtenir des dessins d'une finesse remarquable. La *galvanographie*, imaginée vers 1840 par le prince de Leuchtenberg, présente plusieurs avantages: on n'a pas à dessiner à rebours, et l'on peut corriger sans endommager la plaque.

**Procédé Dulos.** — 1° On dessine ou on décalque une épreuve fraîche, sur une planche de cuivre argentée. 2° on dépose par galvanoplastie une mince couche de fer, qui respecte les parties couvertes d'encre. 3° On enlève l'encre au moyen de benzine ou d'essence de térébenthine. 4° On étend sur la planche, du mercure, qui adhère à l'argent découvert sous les traits du dessin, et forme des lignes brillantes en saillie capillaire, quand on a enlevé l'excédant de mercure au moyen d'un léger pinceau. 5° On coule de la cire ou du plâtre sur la planche, et l'on a un moule où les traits du dessin sont reproduits en creux. Il ne reste plus qu'à reproduire ce moule en cuivre par une double opération galvanoplastique, et l'on obtient ainsi une planche en creux propre à l'impression en taille douce.

**Electro-tint.** — Pour appliquer ce procédé, imaginé par M. Kohbeell, on dessine sur une plaque de cuivre, au moyen d'un vernis translucide qu'on applique au pinceau, en couches plus ou moins épaisses, suivant les tons que l'on veut obtenir. On dépose ensuite une couche de cuivre sur ce dessin, et l'on a une planche gravée en creux, qui donne des épreuves présentant l'aspect d'un dessin au lavis.

**2021. Gravure galvanique au pôle positif.** — On a tiré parti de la dissolution de l'électrode *positive* pour graver de différentes manières des planches de métal. Voici comment Smée obtient la gravure en taille douce sur cuivre. La planche étant recouverte d'un vernis dans lequel on a tracé les traits du dessin, au lieu de graver le métal à l'eau forte on fait servir la planche d'électrode *positive* soluble, dans une dissolution de sulfate de cuivre. Le métal est attaqué au fond des traits, qui sont gravés d'une manière plus nette et plus

régulière que par l'eau forte, quand l'électrode négative est de même grandeur que la planche.

Le prince de Leuchtenberg a obtenu la gravure en-relief, en prenant une planche de cuivre pour électrode positive, après l'avoir couverte de dessins, comme pour la galvanographie (2020); les parties recouvertes d'encre ne sont pas attaquées et restent en relief. — On arrive au même résultat, en déposant, par électrolyse, de l'or au fond des traits tracés dans le vernis qui recouvre le cuivre, enlevant le vernis, et faisant servir la planche, d'électrode positive. Les parties dorées, non attaquées, restent en relief.

**Planches daguerriennes.** — On a essayé de graver les planches daguerriennes, de manière à pouvoir en tirer des épreuves à l'encre. Sur ces planches, en cuivre argenté, les ombres du dessin sont produites par la surface brillante de l'argent, et les clairs, par des gouttelettes microscopiques de mercure, d'autant plus nombreuses que la teinte est plus blanche. On a d'abord essayé de déposer une couche de cuivre sur la plaque; mais les creux formés par les gouttelettes de mercure sont trop peu profonds. Plus tard, M. Berres, de Vienne, a cherché à attaquer la plaque par l'eau forte; enfin, Grove est parvenu à graver ces sortes de plaques en les faisant servir d'électrode positive après avoir enduit le revers de gomme laque. Un mélange de 2 volumes d'acide chlorhydrique de densité égale à 1,1, dans 1 volume d'eau, convient bien pour cette opération; ce liquide attaque l'argent beaucoup plus que le mercure, de sorte que la planche donne immédiatement des épreuves directes. L'électrode négative est formée d'une lame de platine de même grandeur que la plaque, dont on la tient éloignée de 5<sup>mm</sup> seulement, pour que l'action soit uniforme. Un seul couple à acide nitrique suffit, et l'opération ne doit pas durer plus de 30 secondes. La plaque, lavée à l'eau distillée, présente un beau dessin de couleur brune, produit par l'oxychlorure qui s'est formé. On enlève cette substance, par un lavage dans de l'eau légèrement ammoniacale, et l'on peut ensuite tirer des épreuves à l'encre, ou prendre avec le cuivre, des copies galvanoplastiques de la planche. Grove cite un écusson reproduit ainsi, de 2<sup>mm</sup>,5 de hauteur, sur lequel il y avait 5 lignes d'inscription qu'il pouvait lire facilement au microscope, sur l'épreuve.

**2022. Galvanisation.** — Au lieu de prendre copie d'un objet, on peut se proposer de le recouvrir d'une couche de métal assez mince pour ne pas altérer sensiblement les détails de sa surface, et assez épaisse pour ne pas se briser et se détacher par fragments. Ces objets sont alors dits *galvanisés*. On commence par *métalliser* leur surface au moyen de plombagine, puis on les plonge dans la dissolution, en les faisant communiquer avec le pôle négatif d'une pile. On recouvre ainsi d'une couche de cuivre, or, argent, des plâtres, statuettes; des objets en osier, verre, faïence; des étoffes même. M. Soyer a présenté à l'Institut le cadavre d'un enfant recouvert d'une couche de cuivre, par ce procédé.

**Cuivrage de la fonte.** — On préserve les objets de fer ou de fonte destinés à être exposés à l'air, en déposant à leur surface une couche de cuivre. M. Oudry a établi une usine où cette opération se fait en grand. La pièce, mise en commu-

nication avec le pôle négatif de la pile, est plongée dans la solution de sulfate de cuivre, après avoir été enduite d'une couche de peinture au minium, pour préserver la surface de l'oxydation que produirait l'acide qui se sépare du sulfate. Par ce moyen, M. Oudry a revêtu d'une couche de cuivre de 1<sup>mm</sup> environ, les fontaines en fonte qui décorent les Champs-Élysées et les places de Paris, entre autres les fontaines colossales des places Louvois et de la Concorde. Des milliers de colonnes à gaz, d'ornements d'architecture, notamment au nouvel Opéra de Paris, ont été ainsi protégés contre l'action de l'air. Les détails des surfaces sont un peu effacés, mais l'inconvénient, peu marqué pour les grandes pièces, l'est encore moins qu'avec la peinture à l'huile, le cuivre se déposant sous une épaisseur un peu plus grande sur les saillies que dans les creux.

Pour les objets de petites dimensions, cette altération des détails n'est plus négligeable. M. F. Weil la fait disparaître, en déposant le cuivre en couche adhérente, et par conséquent aussi mince que l'on veut, sur la surface *bien décapée*, et plongée dans une dissolution de sulfate de cuivre contenant de l'acide tartrique et rendue fortement alcaline par la potasse ou la soude<sup>1</sup>.

On peut déposer sur les corps, différents alliages, mais les dissolutions ne doivent pas renfermer les métaux dans les proportions de l'alliage qu'on veut obtenir, à cause de l'influence des masses (1969). De plus, ces proportions dépendent de l'intensité du courant, et elles changent à mesure que le dépôt se forme. De Ruolz a recouvert des pièces de fer, d'un bronze semblable à celui des canons, au moyen d'une dissolution de cyanure de potassium, cyanure de cuivre et bioxyde d'étain. On peut recouvrir de *laiton*, le fer, la fonte, l'acier, le zinc, le plomb, l'étain et leurs alliages, au moyen de différents mélanges. MM. Brunel, Bisson et Gangain ont indiqué une dissolution contenant 50 parties de carbonate de potasse, 2 de chlorure de cuivre, 4 de sulfate de zinc, 25 d'azotate d'ammoniaque. En substituant un sel d'étain au sulfate de zinc, on obtient un dépôt de bronze. On a recouvert, par ce moyen, de grandes statues de zinc, de manière à leur donner l'aspect du bronze. — M. Weil obtient des résultats remarquables en ajoutant à la solution de sulfate de cuivre, du perchlorure d'étain ou du stannate de soude.

**2023. II. DÉPÔTS DE MÉTAUX EN COUCHES MINCES ADHÉRENTES.** — L'art de dorer, argenter... au moyen de la pile, a été inventé à la suite de recherches directes, provoquées par le désir de substituer à la méthode meurtrière du mercure, des procédés n'offrant aucun danger pour la santé des ouvriers. On sait que, pour dorer ou argenter par le mercure, on étend sur la surface bien décapée du cuivre, du bronze, une couche d'un amalgame d'or ou d'argent; on chauffe pour faire évaporer le mercure, et le métal précieux reste adhérent à la surface. Or, les vapeurs de mercure sont un danger pour les opérateurs, malgré les fourneaux perfectionnés de d'Arcet, à cause de l'insouciance des ouvriers, qui ne se plient qu'avec répugnance aux précautions indiquées.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 374.

C'est en 1823 que de La Rive fit les premiers essais de dorure galvanique. Brugnatelli, dès 1805, avait bien doré des médailles en les plongeant dans une dissolution d'or, pendant qu'elles communiquaient avec le pôle négatif d'une pile; et Becquerel, lors de ses recherches sur la réduction de divers minerais par l'électricité, avait aussi obtenu des dépôts métalliques adhérents; mais ces essais n'avaient pas été poursuivis. De La Rive ne parvint d'abord à dorer que le platine; les autres métaux étaient attaqués par la dissolution, ce qui empêchait l'or d'adhérer. Plus tard, encouragé par les résultats obtenus dans la galvanoplastie, il reprit ses recherches et parvint à dorer l'argent et le laiton par le moyen suivant : le métal à dorer était suspendu dans une dissolution neutre et très-étendue de chlorure d'or, que contenait une vessie plongée dans de l'eau légèrement acidulée par l'acide sulfurique. L'électricité était fournie par un manchon de zinc entourant la vessie, et unipar un fil d'argent, au métal à dorer. La dorure obtenue par ce moyen n'avait pas toute la solidité désirable, mais le principe était trouvé. M. Elsner fit faire un grand pas à la question en montrant que le défaut d'adhérence provenait de ce que le métal à dorer était attaqué par l'acide mis en liberté dans l'électrolyse. M. Böttger, ayant alors employé une dissolution de chlorure double d'or et de potassium, parvint à dorer le fer et l'acier. Au mois de janvier 1841, M. Perrot, de Rouen, présenta à l'Académie des sciences des objets d'argent, cuivre, acier, fer, parfaitement dorés, et du fer recouvert d'une couche adhérente de platine, cuivre, zinc. C'est vers cette époque que nous trouvons les premières publications de Ruolz, qui, le premier, a posé nettement les conditions de la réussite. Connu comme compositeur de musique, il se fit industriel à la suite de revers de fortune, et chercha avec persévérance les moyens de dorer par la pile. Il résolut complètement le problème, découvrit plusieurs dissolutions efficaces, et étendit le procédé à d'autres métaux que l'or : à l'argent, au platine, au cuivre, au zinc, etc. La description de ses procédés a été lue à l'Académie des sciences en août 1841. Au moment où il se préparait à exploiter sa découverte, des industriels anglais, les frères Elkington, exhibèrent un brevet pris en France pour la même invention, et antérieur de quelques jours à celui de Ruolz. MM. Elkington exploitaient à Birmingham, depuis 1836, un procédé de dorure sans mercure, imaginé par M. Wright, dit *dorure au trempé*, qui ne s'appliquait qu'aux alliages du cuivre, et de nouvelles recherches les avaient mis en possession de procédés semblables à ceux de Ruolz. Heureusement que M. Ch. Christoffe, qui avait acheté le brevet de Ruolz, fit l'acquisition de ceux que MM. Elkington avaient pris en France, et fonda à Paris la maison célèbre que tout le monde connaît. Nous devons ajouter que M. Boquillon a revendiqué, de son côté, la découverte de plusieurs conditions nécessaires au succès des opérations.

**2024. Dorure au trempé ou par immersion.** — Ce procédé, dans lequel on n'emploie pas directement l'électricité, ne convient qu'au cuivre et à

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXXIV, p. 398.

ses alliages. Depuis longtemps, les horlogers doraient de petites pièces de cuivre et même d'acier, en les plongeant dans une solution bien neutre de chlorure d'or; mais l'acide mis en liberté déterminait une oxydation dont les effets ne tardaient pas à se montrer. Pour éviter cet inconvénient, il fallait employer une solution alcaline pouvant neutraliser l'acide abandonné par l'or. On connaissait, depuis Macquer, la dissolution de l'or dans les carbonates alcalins; et Proust, puis Pelletier et Duportal, avaient pu dorer avec une semblable dissolution; mais ces résultats n'étaient pas passés dans la pratique.

Voici comment on prépare le bain d'or : on dissout 155 gr. d'or dans un mélange, à poids égaux d'eau, d'acide azotique (densité, 1,45) et d'acide chlorhydrique (densité, 1,15), chaque substance pesant 135 gr. On chauffe pour clarifier, on décante et l'on verse dans un vase de fer. On étend de 18 litres d'eau, on ajoute 9 kil. de carbonate de potasse, et l'on fait bouillir pendant deux heures. Le bichlorure d'or se transforme alors en protochlorure, ce qui donne une teinte verdâtre à la dissolution. Du sel d'oscille, d'autres matières organiques, les impuretés que peut contenir le carbonate de potasse, favorisent la réaction. La qualité principale de cette dissolution est d'être alcaline, de sorte que le cuivre n'est pas attaqué par l'acide mis en liberté.

Pour dorer le cuivre ou le laiton, il suffit de les plonger un instant dans la dissolution bouillante. On lave ensuite à grande eau, et l'on sèche dans la sciure de bois chaude. Ce procédé ne donne qu'une très-mince dorure, bientôt usée par le frottement, et ne pouvant remplacer la dorure au mercure, qui dépose de 50 à 250<sup>ms</sup> d'or par décimètre carré, tandis que la dorure au trempé n'en précipite que 27 à 42.

Becquerel a obtenu par simple immersion, sur le cuivre, le laiton, le maillechort, le fer, des dépôts minces de métaux autres que l'or : platine, argent, cobalt, nickel, palladium, iridium, cuivre, antimoine, bismuth, étain, plomb<sup>1</sup>. Il se servait du double chlorure alcalin du métal à déposer, et il opérât comme pour dorer, et à des températures variant de 60 à 100°.

**2025. Dorure galvanique.** — La dorure galvanique offre l'avantage de s'appliquer sur toutes sortes de métaux, et en couches aussi épaisses que l'on veut. Les dissolutions dont on fait usage ordinairement sont les doubles cyanures alcalins. On emploie, le plus souvent, un bain formé de 1 partie de chlorure d'or et de 2 parties de cyanure simple de potassium dissous dans 100 parties d'eau. Becquerel signale aussi les borates comme donnant une bonne dorure, et M. Roscleur, les hypophosphates.

**Appareils.** — Tantôt on opère avec des *appareils simples*, tantôt avec des *appareils composés*. Avec les premiers, on dispose l'expérience comme le faisait de La Rive (2023); seulement, la vessie est remplacée par un vase poreux. On emploie souvent la disposition (fig. 1390); les objets à dorer ou argenter sont suspendus par des fils de cuivre à un cerceau appuyé sur les bras T.

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XVIII, p. 449.

Comme le vase poreux laisse passer, par endosmose, un peu de la solution d'or, on emploie pour les objets délicats la disposition suivante : V (fig. 1393) est un vase de porcelaine à plusieurs tubulures, dont chacune est bouchée avec du kaolin humide ou de l'argile dépouillée de carbonate de chaux, retenus à l'extérieur par un linge. Le vase V reçoit la solution d'or et l'objet à dorer *o*. Ce vase est plongé dans de l'eau acidulée, et enveloppé d'un manchon de zinc, *zz*, qui fournit l'électricité, et est uni par un fil *f* à l'objet à dorer.

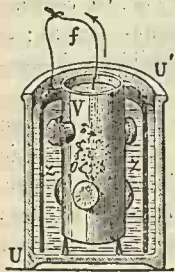


Fig. 1393.

La figure 1394 représente un *appareil composé*. PP' est la pile, formée souvent de 4 à 6 couples de Daniell. La dissolution est contenue dans une grande cuve de bois, traversée par deux tiges dorées *ac*, *a'e'*, placées un peu au-dessus du niveau. L'une, *a'e'*, soutient des lames d'or *o'o'* servant d'électrodes solubles, et communique avec le pôle positif; l'autre, *ac*, est en relation avec le pôle négatif.

Des fils tendus entre les deux tiges et communiquant métalliquement avec *ac* seulement, servent à suspendre les objets à dorer. — Les appareils composés sont préférables aux appareils simples; ils permettent de régler la force du courant d'après la température, l'état de concentration du bain, et surtout le nombre et la grandeur des objets à dorer.

**Dérochage et décapage.** — On commence par *dérocher* la pièce à dorer, c'est-à-dire qu'on la débarrasse des matières grasses, par la calcination; puis, on la *décape* en la trempant dans divers acides, pour détruire l'oxyde qui s'est formé. Souvent on emploie un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique, auquel on ajoute de la suie, du sel marin; on lave à l'eau, et l'on sèche dans la sciure de bois chaude. Quand on le peut, on décape à sec avec l'émeri ou la pierre ponce. Quelquefois, on amalgame légèrement la surface, en trempant

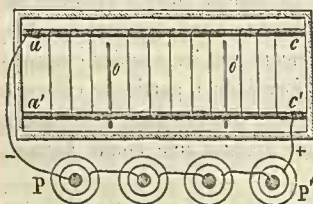


Fig. 1394.

dans du nitrate de mercure, puis frottant avec une peau très-douce, pour étendre le mercure, dès que la surface blanchit. En général, la dorure est mate ou brillante, suivant que la surface est elle-même mate ou polie. Cependant, la dorure est toujours mate quand la couche est épaisse; on peut alors la brunir par les procédés ordinaires, en la frottant avec un corps dur.

**Conditions de succès.** — La première condition pour avoir une couche adhérente est d'employer une dissolution *alcaline*, et c'est en cela que consistait la découverte de Ruolz et d'Elkington. Cette condition remplie, l'adhérence est d'autant plus grande que le courant est plus faible et la dissolution plus étendue. La commission de l'Académie des sciences qui a examiné les mémoires de de La Rive,

de Ruolz et d'Elkington, a reconnu que l'épaisseur de la couche d'or est proportionnelle à la durée de l'opération<sup>1</sup>. Il est donc toujours facile de savoir, à chaque instant, à quelle épaisseur on est arrivé, quand on a une fois constaté le poids d'or qui se dépose dans l'unité de temps sur un décimètre carré. L'opération marche plus vite à chaud qu'à froid, et la rapidité ne dépend pas de la nature du métal à dorer.

**2026. Applications de la dorure galvanique.** — On peut dorer par ce moyen l'argent, le platine, l'étain, le cuivre et ses alliages. Le fer et l'acier doivent être recouverts d'abord d'une mince couche de cuivre, ce qui se fait en les plongeant dans du sulfate de cuivre. Les ustensiles des laboratoires, les instruments de chirurgie peuvent être ainsi préservés de l'oxydation. Des cercuets, des capsules en cuivre, dorés fortement en dedans, peuvent remplacer les mêmes objets en or. On peut dorer seulement quelques parties des surfaces, en faisant des *réserves*, au moyen d'un vernis, sur celles qui ne doivent pas recevoir d'or, et on peut ainsi obtenir des effets très-variés. — M. Hammann a imaginé de dorer les planches de cuivre à graver, au lieu de les couvrir de vernis; les traits formés dans la couche d'or par la pointe du burin, sont plus nets que dans le vernis, et, la couche d'or persistant après le tirage d'épreuves à l'encre, il est toujours facile de faire des corrections.

**2027. Argenture galvanique.** — L'argenture se pratique de la même manière que la dorure et s'applique aux mêmes métaux. Le bain est un cyanure d'argent et de potassium, et l'exécution est plus lente que pour l'or. On fabrique, sous le nom d'*orfèvrerie Christofle*, des objets d'art, des services et couverts de table..., en maillechort, alfénde<sup>2</sup>, et autres alliages blancs, qui, argentés, présentent l'aspect et les qualités extérieures de l'argent massif. Le poids de l'argent déposé est très-variable; pour les couverts, il est de 3<sup>es</sup> par décimètre carré.

**Balanec-Roseleur.** — Pour n'avoir pas à surveiller l'opération, on suspend les objets à argenter à un cerceau de métal attaché par un fil de cuivre à l'une des extrémités du fléau d'une balance en équilibre, dont on surcharge ensuite le bras opposé d'un poids déterminé. Ce bras s'appuie sur un talon qui communique avec le pôle *négalif* de la pile, dont le pôle positif communique avec le bain, de manière que le courant passe par le talon et par le fléau. Quand l'argent déposé a atteint un poids assez grand pour soulever la surcharge, le fléau s'écarte du talon, le circuit est ouvert et l'opération s'arrête.

On peut déposer des couches minces d'argent sur des corps mauvais conducteurs, et l'on se rapproche alors des procédés de la *galvanisation* avec adhérence (2022). Des feuilles finement divisées, comme celles du fenouil, du cerfeuil frisé, revêtues ainsi d'une couche d'argent et d'or, forment des bijoux d'une délicatesse de dessin que l'art aurait de la peine à imiter.

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XIII, p. 998.

<sup>2</sup> L'alfénde est un alliage formé de cuivre, zinc, avec 12 pour cent de nickel, qui lui donne sa blancheur.

**2028. Dépôt de divers métaux.** — Une foule de métaux peuvent être déposés comme l'or et l'argent, en couche mince et adhérente, et le dépôt se fait suivant les mêmes lois.

Le *platine* se précipite avec une grande lenteur, quand on emploie le double cyanure; mais aussi rapidement que l'or, quand on se sert du chlorure double de platine et de potassium dissous dans la potasse caustique. M. Roseleur indique une solution de phosphate double de soude et platine.

Le platine s'applique sur le fer, l'acier, le cuivre, sur les armes, les ustensiles de laboratoires, les pièces d'horlogerie..... La couche de platine coûte à peine plus que l'argent, n'ayant pas besoin d'être aussi épaisse.

L'*acier* se dépose sur le cuivre, au moyen du chlorure double de fer et d'ammoniaque. En *aciérant* ainsi les planches de cuivre gravées, on les rend capables de supporter un tirage beaucoup plus considérable.

Le *cuivre* se dépose sur la fonte et la tôle, plus difficilement que les métaux précieux, au moyen d'un double cyanure de cuivre et de potassium, bain qui conviendrait aussi pour la *galvanisation* (2022), s'il n'était pas trop coûteux. — On obtient un dépôt de *laiton*, dans un bain de cyanure de cuivre et protochlorure d'étain dissous dans le cyanure de potassium. — Le *nickel* se précipite en couche adhérente sur divers métaux, au moyen du sulfate double de nickel et d'ammoniaque; et l'on trouve dans le commerce des instruments de physique et des objets divers en métal recouverts ainsi d'une enveloppe blanche et brillante. — Le *plomb* se dépose facilement sur le fer, la fonte et les autres métaux, au moyen d'une dissolution d'oxyde de plomb dans la potasse; et les chaudières en tôle plombée, remplacent avec avantage les chaudières de plomb.

**Étamage galvanique.** — L'*étain* s'applique facilement sur le fer, le cuivre, le laiton, et l'on a ainsi un moyen d'étamage prompt et facile qui s'applique aux toiles métalliques sans crainte de les empâter; on emploie une dissolution d'oxyde d'étain dans la potasse.

**Fer galvanisé.** — Le zinc déposé sur le fer, le préserve de l'oxydation, même quand la couche est entamée; car il y a alors une action galvanique qui fait que toute l'oxydation tend à se porter sur le zinc, plus oxydable que le fer, et qui est préservé lui-même par la première couche de sous-oxyde insoluble qui se forme à sa surface. On fait aujourd'hui un grand usage, sous le nom de *fer galvanisé*, d'objets de fer recouverts ainsi d'une couche de zinc. Cette industrie importante a été créée, avant la dorure Ruolz, par Sorel, qui employait le sulfate de zinc, qu'on peut remplacer par la dissolution d'oxyde de zinc dans la potasse. Pour les objets grossiers, on se contente de plonger le fer bien décapé, dans du zinc en fusion; mais pour les objets délicats, la tôle mince, les objets d'art en fonte, les toiles métalliques..., on emploie les procédés galvaniques. Les boulets de canon recouverts d'une couche de zinc sont préservés de l'oxydation, surtout en mer.

**2029. DÉPÔTS D'OXYDES PRÉSERVATEURS.** — Quand il ne s'agit que de préserver les métaux de l'oxydation, au lieu de les recouvrir d'une pellicule d'un métal



inoxydable, il est avantageux de les recouvrir d'un oxyde inaltérable, comme l'hydrate de peroxyde de plomb, et surtout le peroxyde de fer, qui, résistant aux températures les plus élevées, peut servir à préserver les pièces de fer qui s'oxydent si rapidement sous l'action du feu. Becquerel a annoncé, en 1843, que les dissolutions des oxydes dans les alcalis conviennent seules pour que le peroxyde déposé adhère fortement au fer, qui est très oxydable<sup>1</sup>.

La dissolution de plomb s'obtient en faisant bouillir 150 gr de litharge dans 2 litres d'eau contenant 200 gr de potasse caustique. Le liquide refroidi est étendu de son volume d'eau, et versé dans un vase poreux dans lequel on suspend le métal à recouvrir, après l'avoir bien décapé à sec, et adouci à la ponce. Le vase poreux plonge dans de l'eau contenant  $\frac{1}{20}$  en poids d'acide nitrique concentré; ce liquide communique avec le pôle négatif d'un ou deux couples de Daniell, dont le pôle positif communique avec le métal à recouvrir. L'oxygène de l'eau décomposée, s'unissant au protoxyde de plomb déposé sur le métal, ce dernier n'est pas oxydé, et se trouve recouvert au bout de quelques minutes, d'une couche de peroxyde de plomb brun foncé, assez adhérente pour supporter l'action du brunissoir.

La dissolution de fer s'obtient en faisant chauffer du protosulfate de zinc dans de l'ammoniaque; on enlève l'air en faisant le vide, et on la conserve dans des flacons bouchés à l'émeri. On opère comme avec le plomb, et la réaction est la même. Le dépôt, d'abord brun rouge, se fonce et prend, au bout de plusieurs heures, la teinte du violet de mars des peintres. Mais les couches foncées n'adhérant pas suffisamment, on s'arrête dès que la couche rouge apparaît, ce qui a lieu au bout de quelques minutes. Sur les métaux dont les oxydes sont solubles dans l'ammoniaque, comme le cuivre, l'oxygène de l'eau produit une oxydation qui empêche le dépôt d'adhérer.

**2030. Métaux colorés par le peroxyde de plomb.** — Becquerel a obtenu sur divers métaux, sous l'influence d'un courant, des dépôts adhérents de peroxyde de plomb, assez minces pour présenter des couleurs vives, qui dépendent de leur épaisseur. Ces couleurs ont quelque analogie avec les anneaux irisés de Nobili (1984); mais elles ne s'effacent pas facilement comme ces derniers. Pour obtenir les couleurs, on verse dans un large vase de verre une dissolution de potasse saturée de peroxyde de plomb; on y plonge l'objet à colorer, et on le fait communiquer, par un ou plusieurs points, avec le pôle positif d'une pile. Le pôle négatif est armé de fils de platine que l'on présente à divers points de la surface, et qui sont enveloppés de tubes de verre, excepté à leur extrémité. En les déplaçant convenablement, on modifie à volonté l'épaisseur du dépôt aux divers points, de manière à obtenir des nuances variées. Au moyen de 6 couples cuivre-zinc amalgamé, l'opération est terminée en une ou deux minutes. On lave ensuite à grande eau, et l'on sèche. D'après Becquerel, la

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Acad. des sciences de Paris, t. XVII, p. 4 et 53, et XVIII, p. 197.

<sup>2</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XVIII, p. 5.

dissolution est un plommate de potasse, et l'oxyde de plomb se dépose sur l'électrode positive, en passant à l'état de peroxyde uni à un équivalent d'eau.

L'or, l'argent, le platine, le cuivre, l'acier, le maillechort..., peuvent ainsi recevoir les couleurs les plus vives; la nuance dépend en partie de celle du métal, le dépôt étant transparent. Le succès tient surtout au soin que l'on apporte à rendre bien nette la surface à couvrir. L'or, le platine, le fer et l'acier sont simplement lavés à la brosse dans une eau alcaline; le cuivre et ses alliages sont décapés dans les acides, comme pour la dorure. Malgré toutes les précautions, l'opération peut manquer; on plonge alors la pièce dans l'acide acétique, pour enlever l'oxyde, et l'on recommence.

Les couleurs au peroxyde de plomb s'altèrent à l'air par les exhalaisons acides ou ammoniacales, qui lui enlèvent de l'oxygène. Pour éviter cet inconvénient, Becquerel recouvre au pinceau la pellicule colorée, d'un vernis saturé d'oxygène, préparé en chauffant modérément pendant deux heures, dans un pot vernissé, un demi-litre d'huile de lin contenant de 4 à 8<sup>gr</sup> de litharge et 2<sup>gr</sup> de sulfate de zinc, et qu'on filtre ensuite pour séparer l'excès de litharge.

#### VII. Applications diverses. — Actions lentes.

**2031. Préparation de corps simples.** — Indépendamment de la précipitation de métaux ou de leurs oxydes, les courants peuvent produire d'autres effets quand ils agissent très-faiblement, mais pendant longtemps; ils peuvent alors précipiter des corps qui ne peuvent l'être par des courants à forte tension, et produire des *combinaisons* inconnues dans les laboratoires de chimie; mais que la nature, qui dispose d'un temps illimité, offre toutes formées au minéralogiste. Becquerel qui, le premier, a fait une étude suivie des actions lentes de l'électricité, est parvenu à obtenir un grand nombre de composés curieux, et à lever ainsi un coin du voile qui cache leur mode de formation dans le sein de la terre<sup>1</sup>. Nous allons citer quelques exemples pouvant donner une idée des différentes méthodes employées dans ce genre de recherches. Commençons par la précipitation de corps simples.



Fig. 1393.

**Silicium.** — Davy n'avait pu décomposer la silice au moyen de sa pile colossale; Becquerel a séparé le *silicium*, par le moyen suivant: deux tubes verticaux (*fig.* 1393) plongent dans de l'eau salée; ils sont bouchés à leur partie inférieure par de l'argile imbibée d'eau salée et retenue par un linge. L'un des tubes renferme de la silice, en gelée dans de l'acide chlorhydrique du commerce qui contient un peu de fer, et une lame de platine. L'autre tube

<sup>1</sup> *Traité d'électro-chimie, et Annales de chimie et de physique (passim).*

reçoit une solution saturée de sel marin, et une lame de zinc *V*. On fait communiquer ces deux lames, à l'extérieur, par un fil métallique; alors l'acide chlorhydrique est décomposé, l'hydrogène naissant décompose la silice et l'oxyde de fer, et il se dépose de petites lamelles de siliciure de fer, puis des lamelles de silicium qui conservent leur éclat tant que dure le courant, mais qui sont promptement dissoutes quand on le supprime. Quand on veut les conserver, on les retire aussitôt du tube, on les lave, on les fait sécher dans le vide, et on les introduit avec du potassium, dans un tube qu'on scelle à la lampe.

**Aluminium.** — Ce métal, qui ne peut être séparé de l'alumine par un courant à forte tension, peut être précipité par de très faibles courants. Becquerel verse dans un tube en U dont les deux branches sont séparées par de l'argile humide, d'un côté une dissolution concentrée de chlorure d'aluminium dans laquelle s'enfonce une lame de platine; et de l'autre de l'eau salée, avec une lame de zinc. Les deux lames étant unies par un fil métallique, le platine se recouvre peu à peu de cristaux d'aluminium contenant un peu de fer. Le *magnésium*, le *zirconium* ont été précipités par le même moyen.

**Arbre de saturne.** — On remplit un flacon d'une dissolution limpide d'acétate de plomb. Au bouchon est fixée une lame de zinc à laquelle on accroche plusieurs fils de laiton qui plongent, ainsi que le zinc, dans la dissolution. Le bouchon est luté avec soin au moyen de cire. Le zinc et le laiton forment un couple; le zinc attaqué prend l'électricité négative et la transmet au laiton, et le fluide positif se répand dans le liquide, de manière à former un courant qui va du zinc au cuivre. Ce courant décompose l'eau, et l'hydrogène transporté sur le cuivre, réduit l'oxyde de plomb et précipite le métal sous forme de lamelles brillantes, qui apparaissent à la partie supérieure des fils, se multiplient et grandissent, en formant des ramifications, qui constituent l'*arbre de saturne*, dont la disposition dépend de celle des fils. L'acétate de plomb est transformé en acétate de zinc. Cette expérience est très-ancienne.



Fig. 1394.

**2032. Combinaisons.** — Pour obtenir du *protoxyde de cuivre*, on introduit au fond d'un tube de 4 à 5<sup>mm</sup> de diamètre (*fig*, 1394), une couche de bioxyde noir de cuivre, sur laquelle on verse une solution saturée d'azotate de cuivre; on plonge le bout d'une lame de cuivre dans le bioxyde, et l'on ferme hermétiquement le tube. Au bout de quelques jours, on aperçoit sur la partie de la lame qui ne touche pas le bioxyde, de petits cristaux octaédriques de protoxyde de cuivre, d'un rouge de rubis, qui finissent par atteindre 1 ou 2<sup>mm</sup> de côté. L'électricité est produite par la réaction de l'azotate de cuivre saturé, sur une couche moins saturée qui touche le bioxyde, lequel, en formant un sous-azotate, a diminué la quantité d'azotate neutre des couches contiguës. Le *protoxyde de plomb* peut s'obtenir par un moyen semblable: on met au fond du tube, de la litharge en poudre, et au-dessus, une solution de sous-azotate de plomb.

**Carbonate double de cuivre et soude ou potasse.** — L'une des branches

d'un tube en U contient du bi-carbonate de potasse dissous, et l'autre, du sulfate de cuivre. Les deux solutions sont séparées en bas par de l'argile, et réunies en haut par un arc de cuivre. Le cuivre se précipite sur l'arc dans la branche contenant le sulfate, et l'acide sulfurique et l'oxygène forment, dans l'autre branche, du sulfate de potasse et de l'oxyde de cuivre, puis un carbonate double de potasse et de cuivre.

**Carbonate de cuivre ou malachite.** — Après avoir obtenu le double carbonate de potasse et de cuivre comme ci-dessus, on remplace la solution de carbonate de potasse par de l'eau pure; l'acide sulfurique, continuant d'arriver, s'empare de la base du carbonate de potasse, chasse l'acide, qui s'unit à l'oxyde de cuivre produit d'abord, et forme du carbonate de cuivre. Ce carbonate, joint à celui de la première partie de l'opération, apparaît sous forme d'aiguilles satinées d'un beau vert bleuâtre. On arrête l'opération avant que toute la potasse ne soit saturée; car alors l'acide sulfurique agirait sur le carbonate de cuivre. Cette manière d'opérer en deux temps est très-féconde.

**Aluminate de chaux.** — Trois vases sont réunis deux à deux par des mèches de coton mouillé, contenues dans des tubes en siphon. Dans l'un des deux vases extrêmes est une solution concentrée de chlorure de calcium; dans l'autre, une solution de chlorure d'aluminium. Le vase du milieu contient de l'eau mêlée d'un peu des deux chlorures précédents; il reçoit une lame de cuivre, unie à des lames de zinc plongées dans les vases extrêmes. L'action des chlorures sur le zinc produit de l'électricité, et la chaux et l'alumine se rencontrent sur la lame de cuivre à l'état naissant, et forment un dépôt d'aluminate de chaux.

**Chlorure d'argent, de cuivre.** — Un morceau de cuivre ou d'argent est attaché avec un fil du même métal à un morceau d'anthracite purifié par les acides et plongé dans un tube rempli d'acide chlorhydrique, puis effilé à la lampe. Au bout de quelques mois, on aperçoit des cristaux de chlorure sur la lame métallique. L'hydrogène de l'acide s'unit en même temps au charbon, et il se dégage, par la pointe effilée, de l'hydrogène carboné.

Dernièrement, Becquerel a repris quelques-unes de ses expériences sur les actions lentes, en opérant à des températures élevées et sous diverses pressions, pour se rapprocher des conditions dans lesquelles certains minéraux ont dû se former dans la nature. Il a obtenu ainsi l'*aragonite*, la *malachite*, le *cuivre carbonaté bleu* en petits mamelons, des *sulfures*, *iodures*, *bromures*, *cyanures métalliques* cristallisés, etc. Il a reconnu que la chaleur et la pression favorisent les actions lentes.

**2033. Méthode électro-capillaire.** — Becquerel a encore fait de nombreuses expériences sur des solutions séparées par des membranes poreuses (collodion, papier-parachemin), ou communiquant par des fentes imperceptibles d'une lame de verre. Les liquides se joignant à travers les pores ou la fêlure, et en quantité différente, il en résulte des effets chimiques assez obscurs accompagnés d'électricité, et des actions lentes qui produisent des composés particuliers.

Becquerel a pu ainsi reproduire diverses espèces minérales : *aluminat de magnésie, fluorure de calcium, alumine à trois équivalents d'eau, oxydes et sulfures métalliques*. Il pensait que, dans les animaux et les végétaux, il se passe des phénomènes analogues, se produisant dans les humeurs, qui sont souvent séparées par des membranes ou en communication par des tubes excessivement fins<sup>1</sup>.

**2034. Conservation du doublage des navires.** — Le doublage en cuivre des vaisseaux est corrodé, souvent avec une grande rapidité, par l'eau de la mer. Davy a cherché à combattre cette action au moyen des forces électriques ; il appliqua d'abord sur le cuivre, de distance en distance, des morceaux d'un métal plus oxydable, comme le zinc, la fonte de fer. Le résultat répondit à son attente : l'action exercée par l'eau de mer sur le zinc ou le fer, développe de l'électricité ; le fluide négatif se porte sur le métal attaqué, et de là sur le cuivre, et le fluide positif passe dans l'eau, qui est traversée par un courant allant du zinc ou fer, au cuivre. L'eau est décomposée par ce courant, et l'hydrogène transporté sur le cuivre en empêche l'oxydation. — L'expérience a montré que, pour que le cuivre soit complètement préservé, il faut que la surface du métal protecteur soit de  $\frac{1}{20}$  à  $\frac{1}{350}$  de celle du cuivre ; si cette surface est moindre, le cuivre perd de son poids, d'autant plus qu'elle est plus petite. Malheureusement, le cuivre se recouvre, surtout autour des plaques de zinc ou fer, des corps électro-positifs que contient l'eau, comme les carbonates de chaux et de magnésie. Ces incrustations servent ensuite de réceptacle aux plantes marines, aux coquilles ; la marche du navire est entravée par cette enveloppe parasite, et son poids peut être notablement augmenté. On pourrait peut-être obvier à cet inconvénient en mettant moins de zinc, de manière à permettre au cuivre de se corroder légèrement.

Depuis, on a reconnu que des plaques laminées de bronze ou de laiton remplacent le cuivre avec avantage, et s'altèrent beaucoup plus lentement, les métaux associés formant de petits couples, qui sont, en même temps, trop rapprochés pour que les incrustations puissent se déposer. On a trouvé de ces doublages encore en bon état au bout de dix ans de navigation. M. Bobierre a conclu de l'examen et de l'analyse de plaques de bronze prises sur plusieurs navires arrivant de voyage, que les feuilles, pour être peu altérables, doivent être d'une structure régulière et contenir une quantité suffisante d'étain intimement uni avec le cuivre. — Pour les lames de laiton, il faut qu'elles ne contiennent pas de matières étrangères (plomb, arsenic), et qu'elles aient été laminées à chaud. Ces conditions une fois vérifiées, voici comment, d'après MM. Bobierre et Labresson, on peut reconnaître d'avance la bonne qualité de l'alliage : après avoir découpé la lame, pour enlever la pellicule écrouie des surfaces, on la plonge, comme électrode *positive*, dans une dissolution de sulfate de cuivre, en face d'une lame de cuivre formant l'électrode négative, et l'on fait passer le courant

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXIV à LXXXV.

d'un couple Callaud. L'acide déposé sur la lame de laiton, la corrode, et, au bout de douze heures, si elle n'est pas homogène, sa surface présente des altérations inégales, des cavités irrégulières, semblables à celles qu'elle éprouverait à la mer<sup>1</sup>.

## CHAPITRE VI

### ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE — PROPAGATION, INTENSITÉ, COMPARAISON DES FORCES ÉLECTROMOTRICES

« Un mouvement qui se continue toujours dans le même sens, malgré les frottements et la résistance des milieux..... est un fait sans exemple..... On ne peut attribuer cette action qu'à des fluides en mouvement dans les conducteurs..... »

AMPÈRE, *Recueil d'observations électrodynamiques* (1822).

#### § 1. — MODE DE PROPAGATION ET VITESSE DE L'ÉLECTRICITÉ

##### I. Constitution du courant.

**2035.** Dans ce chapitre, nous allons nous occuper de l'électricité dynamique, c'est-à-dire en mouvement, considérée en elle-même; de son mode de propagation, de son intensité et de l'évaluation des éléments dont elle dépend : en particulier, de la *conductibilité* des fils que parcourt le courant, et de la *force électromotrice* des appareils qui le produisent.

**2036. Identité du courant dans tous les points du circuit.** — Les effets que produit un courant sont les mêmes dans tous les points du circuit qu'il parcourt, quelles que soient la nature et les dimensions du corps qui composent ce circuit. Les lois de l'électrolyse (1991) prouvent qu'il en est ainsi, pour les actions chimiques, dans le circuit extérieur et dans la pile même. Il en est de même pour les actions calorifiques et mécaniques, quand elles s'exercent dans les mêmes conditions. Ampère, dès 1821, a prouvé cette identité d'action sur l'aiguille aimantée, et a montré que la déviation est la même dans la pile, qu'en un point quelconque du circuit extérieur. Un moyen de vérification très-

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XV, p. 431, et t. XXII, p. 472.

simple consiste à replier le circuit sur lui-même, de manière que le courant marche en sens contraire dans deux portions parallèles très-rapprochées : on voit qu'elles ne dévient pas l'aiguille aimantée.

Pour montrer l'identité du courant dans toute l'étendue du fil conjonctif, Becquerel<sup>1</sup> soude en deux points de ce rhéophore, séparés par une distance  $D$ , deux bouts de fil égaux, et, en deux autres points séparés par la même distance  $D$ , deux autres fils identiques aux premiers ; il met les deux premiers en relation avec l'un des fils d'un rhéomètre différentiel, et les deux autres avec le second fil du même rhéomètre, de manière que les courants dérivés marchent en sens contraire, et il trouve que l'aiguille reste en repos. — Pouillet a vérifié l'égalité d'intensité dans la pile et dans le circuit, sur une pile thermo-électrique, et Fechner, sur des arcs métalliques réunissant deux à deux les couples d'une pile hydro-électrique : le premier observait la déviation de l'aiguille ; le second procédait par la méthode des oscillations.

De La Rive<sup>2</sup> a vérifié directement l'égalité d'intensité dans toutes les parties, liquides ou solides, en formant le circuit de tubes de verre et de cylindres métalliques de différentes substances et de différents diamètres. Les tubes étaient remplis de divers liquides, et certains cylindres étaient terminés à un bout par du zinc, et à l'autre par du cuivre, de manière à former des éléments électro-moteurs. Une aiguille aimantée, suspendue à une même distance de l'axe d'une partie quelconque du circuit, oscillait toujours de la même manière.

**2037. Le courant passe également par tous les points de la section du rhéophore.** — Dans un courant, l'électricité ne se porte pas à la surface, comme dans l'état statique, mais elle se propage par tous les points de la section du rhéophore, car l'intensité du courant dépend de l'aire de cette section, et non de son contour. Pour le prouver, on remplace une partie du fil d'un circuit, successivement par un autre fil de même substance et de même longueur, mais dont la section, *présentant toujours la même aire*, affecte différentes formes, carrée, triangulaire, aplatie, etc. L'intensité reste toujours la même, quoique la surface extérieure change. — On peut encore remplacer le fil par plusieurs autres réunis en faisceau, pourvu que la somme de leurs sections soit égale à la section du fil unique qu'ils remplacent. Ce résultat, établi par Davy et par Fechner, prouve que l'électricité dynamique tend à se disséminer dans toute l'épaisseur du conducteur. Cette tendance, constatée par de La Rive en 1824 pour les solides, et en 1825 pour les liquides, se voit facilement sur un courant parcourant un large ruban de métal ; car une aiguille aimantée très-délicate oscille toujours dans le même temps, quelle que soit sa position au-dessus du ruban, pourvu qu'elle en soit toujours à la même distance, et que ses extrémités ne soient pas trop rapprochées des bords. — On peut encore appuyer en deux points quelconques du ruban, les bouts du fil d'un rhéomètre ; si les deux

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXII, p. 428.

<sup>2</sup> *Traité d'électricité théorique et appliquée*, par A. de La Rive, t. II, p. 17.

points touchés sont sur des perpendiculaires à la longueur du ruban toujours également écartées, le rhéomètre donne la même déviation.

Si la bande était courte par rapport à sa largeur, la diffusion se montrerait encore, mais l'intensité ne serait plus la même partout; les lignes de même force seraient ovales, comme dans l'œuf électrique. M. Kirchhoff a soumis au calcul la distribution de l'électricité dynamique passant entre deux points dans une plaque et dans un corps à trois dimensions. Nous citerons plus loin quelques-uns des résultats auxquels il est arrivé.

De La Rive, puis Matteucci, ont prouvé ainsi la diffusion des courants dans les liquides électrolysés : on fait arriver l'électricité dans un baquet rempli d'eau salée ou acidulée, par deux petites boules de platine placées sur un même diamètre du baquet, et à la même distance de son axe. Les deux extrémités, en platine, du fil d'un rhéomètre, maintenues à une distance fixe l'une de l'autre, sont plongées, à une profondeur constante, en différents endroits du liquide, de manière à dériver une partie de l'électricité dans le rhéomètre, qui résiste moins que le liquide. On trouve ainsi qu'il passe des courants dans toutes les parties du liquide, même derrière les pôles. L'intensité est la plus grande sur la ligne des électrodes, et va en diminuant, sur cette ligne, de chaque boule au milieu de l'espace qui les sépare; ce qui montre que les courants s'épanouissent, comme dans l'œuf électrique. La diffusion des courants est d'autant plus prononcée que le liquide est moins bon conducteur.

**2038. Plusieurs courants peuvent se croiser sans se modifier.** — Marianini a constaté cette loi en faisant passer deux courants à travers de l'eau acidulée, et en disposant la ligne des électrodes de l'un d'eux obliquement par rapport à la ligne des électrodes de l'autre. Chacun des courants agit de la même manière sur le rhéomètre, lorsqu'il passe seul ou qu'il passe en même temps que l'autre, même quand l'angle est très-petit et les intensités très-inégaies. Trois courants perpendiculaires entre eux ne se modifient pas davantage. Il en est de même de plusieurs courants parallèles, de même sens ou de sens contraires, très-rapprochés les uns des autres dans le même liquide, et provenant de piles distinctes. — Enfin, si plusieurs courants parcourent en même temps le fil d'un rhéomètre, chacun d'eux agit comme s'il était seul. Pour le prouver, on fait passer un des courants seul, et l'on observe la déviation,  $d$ , qu'il produit; puis, on fait passer un second courant seul, et, en écartant peu à peu du méridien magnétique le cadre du rhéomètre, on ramène l'aiguille au zéro; on fait ensuite passer les deux courants en même temps, et l'on voit l'aiguille revenir à la déviation  $d$ .

**2039. État de l'électricité dans le courant.** — Les propriétés qui précèdent sont incompatibles avec la supposition d'un transport réel de deux électricités allant l'une vers l'autre à travers le rhéophore; car il y aurait plus d'électricité positive près du pôle positif de la pile, et plus d'électricité négative,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XLII, p. 431.



près du pôle négatif. Au milieu du fil conjonctif, on devrait trouver l'état neutre, et les effets ne pourraient être les mêmes dans tous les points du circuit.

Voici comment on a considéré d'abord l'état du courant, dans l'hypothèse des deux fluides : Les électricités accumulées aux pôles de la pile décomposent par influence le fluide neutre des molécules voisines du fil conjonctif; celles-ci, ainsi polarisées, agissent sur les molécules suivantes, qu'elles polarisent à leur tour, et ainsi de suite de proche en proche, comme dans les tubes étincelants (1690), dans les aigrettes (1691) et dans les carreaux magiques (1690). Cette polarisation a lieu dans les mauvais comme dans les bons conducteurs (1645); seulement, dans les premiers, les électricités séparées dans les molécules ne peuvent en sortir que très-difficilement. Dans les bons conducteurs, au contraire, l'électricité passe facilement d'une molécule à l'autre en produisant des décharges intermoléculaires, et c'est par cette série de décharges qui se propage l'électricité, comme nous avons déjà eu l'occasion de l'énoncer.

D'après cette manière de concevoir le courant, il n'y aurait pas transport de fluide à travers le circuit; les déplacements ne dépassant pas les groupes de deux molécules voisines. Aujourd'hui qu'on n'admet qu'une seule espèce d'électricité, qui ne serait autre chose que l'éther quittant les molécules autour desquelles il est accumulé (1590), on regarde le courant comme constitué; ainsi que l'exprime son nom, par un transport ou flux d'électricité parcourant le fil rhéophore, de l'extrémité électrisée en plus à celle qui est électrisée en moins, ou est en communication avec le sol. Ce courant de matière impondérable; à cause de son affinité pour les molécules pondérables; peut les entraîner dans le sens de son mouvement, du (+) au (-), comme nous en avons vu maints exemples dans le transport par le courant, de liquides (1961), de particules arrachées dans l'arc voltaïque (1944) et dans l'étincelle, dont la lumière est chargée, comme nous l'indiquera le spectroscope, de particules enlevées à l'électrode positive, etc. Voici les principales considérations sur lesquelles s'appuie le système du flux électrique, qui est aujourd'hui généralement adopté :

1<sup>o</sup> L'intensité du courant, de quelque manière qu'on l'évalue, est la même dans tout le circuit, quel que soit le diamètre du rhéophore en ses divers points; ce qui est en harmonie avec la supposition d'un flux qui doit laisser passer la même quantité d'électricité par toutes les sections, comme pour les fluides pondérables. S'il en est ainsi, les vitesses doivent être en raison inverse des sections; c'est ce qui paraît résulter de la loi des températures aux divers points d'un rhéophore, températures qui sont en raison inverse des carrés des sections (1935): de sorte qu'on a  $s^2 : s'^2 = l' : l$ . En effet, les températures  $t, t'$  sont entre elles comme les carrés des vitesses de vibration constituant la chaleur. On a donc  $s^2 : s'^2 = v'^2 : v^2$ , ou  $s : s' = v' : v$ ; et il suffit, pour retrouver la loi hydrostatique des sections, d'admettre (ce qui est tout naturel) que les vitesses de vibration sont proportionnelles aux vitesses de translation du flux qui les excite.

L'augmentation d'intensité des vibrations dans les parties les plus étroites du

conducteur se distingue facilement dans un tube de Geissler (1694) présentant différents diamètres ; on remarque que le flux lumineux est d'autant plus brillant que le diamètre est plus petit au point considéré. Il en est de même de la chaleur développée dans un fil présentant divers diamètres ; on le voit rougir dans les parties les plus fines, et ne s'échauffer qu'à peine dans celles qui sont plus grosses.

2° Quand on laisse entrer, sous une certaine pression, de l'eau ou de l'air dans une longue conduite, le fluide n'arrive pas immédiatement à l'extrémité opposée à l'ouverture d'entrée, et il faut un certain temps avant que l'écoulement régulier s'établisse. Il en est de même, comme nous allons le voir (2040), pour l'électricité lancée dans un long fil isolé ou communiquant avec le sol ; et, de même qu'il faut fournir une certaine quantité d'eau ou d'air pour remplir la conduite, de même il faut dépenser d'abord une certaine quantité d'électricité, avant qu'elle n'arrive à l'extrémité du fil conducteur (2044).

**Remarques.** — Ces derniers phénomènes montrent que le courant n'est pas une vibration, comme l'ont soutenu quelques physiiciens ; le mouvement ne se propagerait pas ainsi graduellement. D'un autre côté, la température produite par un courant dans un fil de diamètre variable ne dépendrait pas de ce diamètre et serait uniforme, comme dans le cas de l'échauffement par le feu.

Quant à la nature du flux s'écoulant à la manière des fluides pondérables, on est d'abord porté à croire que l'éther se déplace de toute pièce en circulant autour des molécules des corps, qui ne feraient que gêner son mouvement. Mais le fait que l'électricité ne peut traverser le vide parfait (1695) montre que les molécules pondérables jouent un rôle dans l'écoulement électrique, et conduit à admettre, comme nous l'avons déjà dit (1590), que le mouvement se fait par échange rapide entre les atmosphères d'éther qui enveloppent les molécules.

## II. État variable et effets statiques dans un courant.

2040. — Dans les recherches sur l'électricité dynamique, on suppose ordinairement que le courant est complètement constitué, de manière qu'il passe par chaque section une même quantité d'électricité. Cet état définitif est précédé d'un état variable, pendant lequel les différentes sections laissent passer des quantités différentes d'électricité, les plus rapprochées de la source en laissant passer plus que les suivantes, et par conséquent plus qu'il n'en sort à l'extrémité du fil conducteur. Ohm, qui a le premier signalé l'état variable, comparait ce qui se passe pendant cet état, aux premiers mouvements de la chaleur dans un mur solide dont une des faces est échauffée ; ce n'est qu'au bout d'un certain temps que chaque tranche possède une température constante ; et que toutes laissent passer la même quantité de chaleur.

2041. **Cas des conducteurs médiocres.** — M. Gaugain a étudié l'état variable des courants commençants, sur des conducteurs médiocres, avec les-

quels cet état transitoire dure assez pour qu'on puisse l'observer facilement<sup>1</sup>. Il opérât sur des colonnes d'huile siccatives, qui sont notablement conductrices, contenues dans des auges demi-cylindriques en gomme-laque, de 40<sup>cm</sup> de longueur et de 10 à 20<sup>mm</sup> de diamètre. Ces auges sont éloignées, par des colonnettes en gomme laque, des corps voisins dans lesquels il pourrait y avoir induction. Les extrémités sont garnies en dedans, de lames d'étain par lesquelles on fait entrer et sortir l'électricité.

L'électricité provient du plateau collecteur d'un condensateur, dont l'autre plateau communique avec le sol. Un électroscope à feuille d'or indique la tension sur le premier plateau par l'écart des feuilles d'or, observées de loin sur un arc divisé, comme dans l'électromètre de Peclat (1674). L'extrémité par laquelle sort l'électricité est en communication avec le bouton d'un électromètre de décharge (1662), et l'on observe le temps écoulé entre le moment où l'électricité est lancée dans le fil, et celui de la première décharge, c'est-à-dire de l'instant où la tension acquiert une certaine valeur. Ce temps représente ce que M. Gaugain nomme la *durée de la propagation*. Si on le compare au temps nécessaire pour que le même point du conducteur atteigne sa tension limite, on a la *durée de propagation relative*.

En employant différentes huiles, et faisant varier les dimensions de la colonne, et la charge du condensateur, M. Gaugain est arrivé à représenter la durée  $T$  de la propagation, par la formule  $T = K \frac{El^2}{cs}$ , dans laquelle  $E$  est la quantité d'électricité,  $c$  la conductibilité,  $l$  la longueur et  $s$  la section de la colonne d'huile. On voit que cette durée est indépendante de la tension de la source, en raison inverse de la conductibilité et de la section, et *proportionnelle au carré de la longueur*, ce qu'Ohm avait déjà déduit de considérations théoriques.

Des expériences faites en employant des électromètres de différentes grandeurs ont montré que l'accumulation d'une certaine dose d'électricité dans l'instrument n'a pas d'influence sur les lois trouvées.

**2012. Etat variable dans les fils métalliques.** — M. Gaugain n'avait employé que des conducteurs imparfaits, dans lesquels le flux électrique se propage avec une lenteur relative, il était donc nécessaire d'expérimenter sur des fils métalliques, en employant des circuits d'une très grande longueur, à cause du peu de durée de l'état variable. C'est ce qu'ont fait MM. C.-M. Guillemin et E. Burnouf, en se servant des fils des télégraphes électriques, et au moyen de la méthode suivante<sup>2</sup> : Les deux extrémités du fil étant près l'une de l'autre, on fait communiquer l'une d'elles avec le pôle *positif* d'une pile dont l'autre pôle est réuni au sol, et l'électricité s'élance dans le fil dont l'extrémité opposée communique avec la terre. Un circuit dérivé, contenant un rhéomètre, aboutit à deux points placés près de cette dernière extrémité ; on le ferme au bout de quelques

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LX, p. 326.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LX, p. 385.

millièmes de seconde, et l'on mesure l'intensité du courant dérivé, qui est proportionnelle à celle du courant direct au point de dérivation à l'instant de la fermeture du circuit dérivé.

La fig. 1395 représente l'appareil au moyen duquel on exécute avec sûreté ces diverses opérations. DCD est un cylindre de bois, de 13<sup>m</sup> de longueur, qui reçoit un mouvement régulier de rotation, d'une corde sans fin passant sur une poulie *g*, dont la vitesse est mesurée par un compteur *K*, mu par une vis sans fin *V*. *P* est la pile, dont le pôle négatif communique avec le sol, en *t*, et le pôle positif avec le ressort *p*, qui s'appuie sur une virole *p'* communiquant avec une lame métallique appliquée sur le cylindre. L'extrémité du fil de ligne télégraphique *LL'*, par laquelle entre l'électricité positive, est fixée en *m* à une règle de métal *mn*, et son autre extrémité communique en *T* avec le sol. En *o*, *v* sont les points de dérivation du circuit dérivé; l'intervalle de dérivation, *or*;

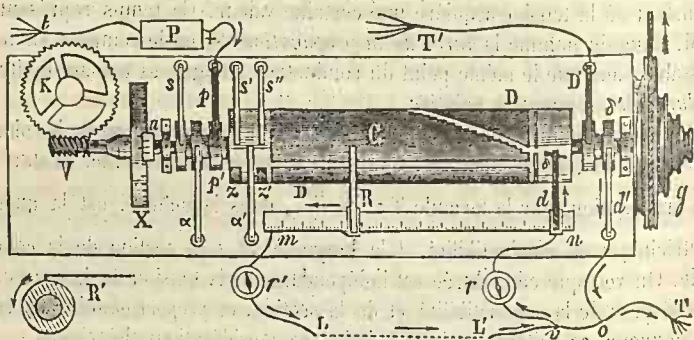


Fig. 1395.

est formé d'un fil fin et résistant, pour que la plus grande partie du courant soit détournée. Le circuit dérivé est fermé, pendant un temps très court, quand le ressort isolé *d'* s'appuie sur une petite lame triangulaire en métal *z*, qui communique avec la virole *z'*, sur laquelle s'appuie le ressort *d'*. On peut faire varier la durée de la fermeture, en déplaçant un peu le ressort *d*, sur la règle *mn*, dont il est isolé.

Voici la marche de l'opération; le cylindre CD tournant, l'électricité s'élance dans le circuit *LL'*, dès que le ressort *R* s'appuie sur la lame *C*, et passe dans le sol, en *T*, jusqu'à l'instant où la petite lame *z* se plaçant sous le ressort *d*, le circuit dérivé *vz'o* se ferme, pendant  $\frac{1}{1000}$  de seconde. Le ressort *R* s'appuie ensuite sur la lame de décharge *DD* qui communique avec la virole à ressort *D'*, par laquelle le fil de ligne *LL'* est déchargé en *T'*, en même temps que par l'extrémité *T*. Le cylindre continuant à tourner, les mêmes phénomènes se reproduisent 10 à 20 fois par seconde, de manière que l'aiguille du rhéomètre *r*, recevant des impulsions répétées à courts intervalles, prend une position fixe,

qui fait connaître l'intensité du courant dérivé ; et, par suite, celle qui existe en  $v$ , sur le fil de ligne  $mLL'$  au moment où a lieu la dérivation. L'intensité du courant à son entrée est donnée par le rhéomètre  $r'$ .

Pour que le moment de la dérivation soit plus ou moins éloigné de l'instant où l'électricité s'élançe dans le circuit  $LL'$ , le bord de la lame  $C$  est oblique aux arêtes du cylindre, et présente 70 dents ayant un côté parallèle à ces arêtes ; de manière que l'instant de la communication avec la pile est d'autant plus rapproché du moment où se ferme le circuit dérivé, que le ressort  $R$  est placé plus près de l'extrémité étroite de la lame triangulaire  $C$ . L'arc compris sur la lame, pour chaque position du ressort  $R$ , s'évalue au moyen du cercle divisé  $X$ , dont le vernier  $u$  donne les minutes ; on fait passer un courant faible dans l'appareil que l'on fait tourner lentement, et les instants où commencent les courants en  $LL'$  et dans le circuit dérivé sont indiqués par les rhéomètres  $r$  et  $r'$ .

L'expérience prouve que des contacts de  $\frac{1}{2880}$  de seconde sont assez intimes pour donner au rhéomètre une déviation indépendante de la vitesse, quand les ressorts ne vibrent pas ; ce qu'on obtient au moyen d'étouffoirs à vis garnis de peau de daim. Les ressorts sont horizontaux et coudés à leur extrémité, comme on le voit en  $R'$  (fig. 1395).

Voici les principaux résultats de nombreuses expériences faites sur les fils de fer de plusieurs lignes télégraphiques : 1° Le courant, à l'extrémité qui communique avec le sol, va en croissant et prend une valeur constante après 0,02 environ pour un circuit de 570 kilomètres, et en employant 60 couples de Bunsen. Le nombre 0,02 représente la durée de l'état variable. — 2° Près de la pile, le courant va, au contraire, en décroissant d'intensité pendant l'état variable ; c'est que le flux électrique ne trouve pas d'abord, dans le fil à l'état neutre, la tension croissante qu'il rencontre ensuite à mesure que ce fil se charge. Despretz a constaté une marche semblable dans l'échauffement des couches supérieures d'une colonne liquide (II, 974). — 3° L'état permanent s'établit en même temps dans toutes les parties du fil ; la déviation est alors plus forte près de la pile qu'à l'extrémité jointe au sol ; ce qui est dû aux pertes, car la différence est d'autant plus grande que l'air est plus humide. — 4° La durée de l'état variable diminue quand augmentent la tension et la quantité d'électricité que donne la pile ; pour un nombre double de couples, cette durée diminue à peu près de  $\frac{1}{10}$ . — 5° Le temps nécessaire pour charger à son maximum un fil de 570 kilomètres est égal à la durée de l'état variable, et le fil met à peu près 4 fois plus de temps à se décharger qu'il n'en a mis à se charger. — 6° La durée de l'état variable croît moins vite que le carré de la longueur du circuit. M. Gaugain, en opérant sur des conducteurs médiocres, avait trouvé qu'elle lui est proportionnelle (2041) ; mais, comme le remarque M. du Moncel, dans les longs fils télégraphiques, il y a des pertes par les supports rendant la

<sup>1</sup> Les ressorts  $s$ ,  $s'$ ,  $s''$ ,  $z$ ,  $z'$  et les lames  $z$ ,  $z'$  servent à varier les expériences, suivant différentes conditions, pour le détail desquelles nous renvoyons au mémoire cité.

durée de l'état variable trop grande, et d'autant plus que la perte, pour chaque kilomètre, est plus grande, et, par conséquent, que le circuit est plus court, puisqu'alors, s'étant moins affaibli, les pertes sont relativement plus grandes. Le rapport entre les durées des états variables d'un long circuit et d'un autre plus court sera donc trop faible.

**2043. ASSOCIATION DES ÉTATS DYNAMIQUE ET STATIQUE.** — L'électricité qui se propage sous forme de courant peut être accumulée sur des conducteurs, en y prenant l'état statique. Volta avait chargé une bouteille de Leyde au moyen d'une pile isolée dont les pôles communiquaient avec les armatures. Pour charger un simple conducteur isolé, il suffit de lui faire toucher l'un des pôles, l'autre pôle communiquant avec le sol. Ordinairement, le condensateur, ou le conducteur isolé, reçoivent instantanément le maximum de charge; ce qui tient à leurs faibles dimensions comparées à l'immense flux d'électricité qui s'échappe de la pile. Quand ces conducteurs sont très-étendus, l'introduction de l'électricité dure un temps appréciable, et donne un courant qui peut être accusé par l'aiguille aimantée. Faraday et Wheatstone ont fait, à ce sujet, au moyen des fils des télégraphes électriques, des expériences qui ont jeté un nouveau jour sur le mode de propagation de l'électricité<sup>1</sup>.

**2044. Condensation de l'électricité dynamique dans un long conducteur.** — Les expériences de Wheatstone ont été faites sur un câble télégraphique de 177 kilomètres jeté dans la mer entre le Piémont et la Corse, contenant 6 fils de cuivre isolés dans un cylindre de gutta-percha, entouré lui-même d'une armature de 12 gros fils de fer légèrement contournés en hélice. Ce câble était enroulé dans un puits sans eau, et l'on pouvait réunir les fils de cuivre deux à deux, à leurs extrémités, de manière à former un seul fil de 1,062 kilomètres. L'un des pôles d'une pile de 144 couples de Wollaston ayant été mis en communication avec le sol, et l'autre, avec l'un des bouts du fil de cuivre, dont l'extrémité opposée était isolée, un rhéomètre interposé près de la pile indiqua un courant, qui cessa bientôt quand tout le fil eut été chargé d'électricité. Cependant, un rhéomètre très-sensible indiquait un faible courant permanent, qui était dû à la déperdition de l'électricité le long de l'immense conducteur; car son intensité était en raison inverse de la distance de la pile au point où on l'observait, et, près de la pile, sensiblement proportionnelle à la longueur totale du fil. Cette intensité était aussi à peu près en raison directe du nombre des couples, tant que la déviation ne dépassait pas 36°.

Le courant se manifestait encore dans deux des fils de 177 k. séparés l'un de l'autre et isolés, à l'extrémité opposée à la pile, quand ils étaient en communication avec les pôles opposés de cette pile; et deux rhéomètres placés près de ces pôles indiquaient des courants de sens contraire l'un à l'autre. Dans ces expériences, on n'observe aucune déviation de l'aiguille, quand un des pôles de la pile est isolé.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLI, p. 423, et t. XLVI, p. 424.

Le fil de 1,062 kilomètres ayant été mis en communication avec le sol par une de ses extrémités, puis avec la pile, par l'autre, on vit trois rhéomètres placés l'un au milieu et les deux autres près des extrémités de ce long fil, éprouver successivement la déviation, en commençant par le plus rapproché de la pile ; ce qui montre la transmission progressive de l'électricité. — Le long fil étant isolé et chargé comme dans la première expérience, l'extrémité isolée fut mise en contact avec le sol ; et les aiguilles furent encore déviées les unes après les autres, mais en commençant par la plus éloignée de la pile. — L'un des bouts du fil ayant été réuni à l'un des pôles de la pile, puis l'autre bout joint au second pôle, les rhéomètres extrêmes furent aussitôt déviés ; mais celui du milieu ne le fut que quelques instants après. — Enfin, le fil étant séparé au milieu, et ses extrémités réunies aux pôles de la pile, on rétablit la jonction au milieu ; le rhéomètre placé en ce point s'agita immédiatement, et ceux qui étaient près des pôles, seulement quelques instants après. Tous ces phénomènes sont des conséquences de la propagation progressive de l'électricité, et viennent la confirmer.

**2045. Condensation dans des fils isolés et submergés.** — Faraday a prouvé qu'un fil métallique enveloppé de gutta-percha et plongé dans l'eau, se comporte comme un condensateur dont l'enveloppe de gutta-percha formerait la lame isolante, et le liquide, l'armature extérieure<sup>1</sup>. Les expériences ont été faites sur un câble formé d'un fil de cuivre recouvert de gutta-percha et divisé en tronçons de 800<sup>m</sup> de longueur, enroulés en paquet et suspendus à des barques sur un canal. Deux cents de ces paquets plongeaient dans l'eau, et leurs extrémités étaient réunies deux à deux hors de l'eau, de manière à former une longueur totale de 160 kilomètres. Ce câble, isolé à une extrémité, ayant été chargé d'électricité au moyen d'une pile de 360 couples, on pouvait, en touchant le fil d'une main, pendant que l'autre communiquait avec le sol, recevoir aussitôt une violente commotion ayant une certaine durée et pouvant, par plusieurs contacts rapides, être divisée en plusieurs temps. Des rhéomètres convenablement placés permettaient aussi de constater l'existence d'un courant pendant que le fil se chargeait et pendant qu'on le déchargeait, et de saisir la propagation successive de l'électricité. Il s'écoulait quelquefois 2 secondes entre les instants où les instruments placés aux extrémités se mettaient en mouvement.

**2046. Fils enfouis.** — Des résultats semblables ont été obtenus avec des fils revêtus de gutta-percha et enfouis dans la terre. Quand ces fils étaient suspendus dans l'air, on n'obtenait plus de commotion ; mais on en obtenait quand l'enveloppe isolante du fil était recouverte d'une gaine de plomb ou de fils métalliques en hélice ; quand le câble était tendu très-près de corps conducteurs, comme la surface du sol, des murs..., qui formaient alors l'armature extérieure d'un condensateur, dont la gutta-percha et l'air interposé formaient la couche isolante. Dans ce dernier cas, les effets étaient d'autant plus faibles que la

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. XXV, p. 209.

distance du fil aux corps conducteurs était plus grande. Ces divers effets avaient déjà été observés par M. Siemens.

Clarke a montré directement les effets de la condensation de l'électricité dans les fils enfouis : à l'extrémité opposée à la pile se trouve un cylindre conducteur non isolé, enveloppé d'une bande de papier imbibée de *cyanure de potassium*, qui donne, par électrolyse, une trace bleue quand on le fait traverser par un courant entrant par une tige d'acier appuyée sur le papier. Trois styles d'acier s'appuient sur une même arête du cylindre, qui tourne sur son axe ; ils forment les extrémités de trois fils de fer, l'un court, les deux autres égaux et très-longs, et dont un seul est enfoui dans la terre. Si l'on fait communiquer, *au même moment*, le pôle de la pile avec le fil court et le fil enfoui, la ligne bleue tracée par le style du fil enfoui commence un peu après celle que forme le style du fil court. De plus, le trait en retard, d'abord très-faible, augmente graduellement d'épaisseur. Quand on supprime le courant, le trait correspondant au fil court s'interrompt aussitôt, tandis que celui du fil enfoui se prolonge encore un peu, et ne cesse que graduellement, en diminuant peu à peu d'épaisseur. Le long fil suspendu dans l'air donne les mêmes résultats que le fil court. Si l'on supprime et rétablit les communications à des instants très-rapprochés, les styles des fils aériens marquent des lignes bleues interrompues, et le fil enfoui, une ligne continue. Si les intermittences se succèdent moins rapidement, cette dernière ligne présente des renflements alternatifs, qui sont séparés par des interruptions quand les intermittences sont moins rapprochées.

### III. De la vitesse de l'électricité.

2017. L'électricité ne se propage qu'avec lenteur dans les corps mauvais conducteurs, mais avec une vitesse prodigieuse dans les bons conducteurs. Peu de temps après la découverte de la bouteille de Leyde, on se demanda si l'électricité employait un temps appréciable à parcourir de longs circuits servant à la décharger. Deluc paraît avoir fait les premières expériences à ce sujet ; il se servait des tuyaux de conduite des eaux de Genève et d'un fil d'archal isolé, pour compléter le circuit. Watson opéra, en Angleterre, en 1748, sur un circuit de 4 milles de long, formé par le sol et par un fil isolé au moyen de poteaux de bois sec. Ce fil était replié de manière qu'une interruption placée en son milieu fût tout près de la bouteille, dont l'étincelle de décharge paraissait toujours coïncider avec celle de l'interruption. De toutes ces expériences, on conclut que l'électricité se transmettait dans les fils métalliques avec une rapidité trop grande pour pouvoir être saisie. Cette opinion fut admise sans conteste jusqu'en 1834, époque à laquelle Wheatstone arriva à une conclusion toute différente, par sa méthode si féconde du miroir tournant, qui permet d'évaluer des durées d'un millionième de seconde, et dont nous avons déjà cité plusieurs applications (1691 et I, 634).



**2048. Expériences de Wheatstone<sup>1</sup>.** — Si l'on regarde dans un miroir l'image d'un point lumineux fixe, et, si l'on incline ce miroir, l'image se déplace en décrivant un arc perpendiculaire à l'axe de rotation, et dont le centre est sur cet axe. La quantité angulaire dont tourne l'image est double de celle dont tourne le miroir. Si le point lumineux ne brille que pendant un instant, l'image paraît décrire un arc limité, d'autant plus long que le miroir tourne plus rapidement. Si le miroir tourne avec une très-grande vitesse, l'impression dans l'œil persistant pendant  $\frac{1}{10}$  de seconde environ, on verra l'image simultanément dans toutes les positions qu'elle occupe successivement, si le phénomène dure moins de  $\frac{1}{10}$  de seconde. On apercevra donc un arc ou trait lumineux, dont la longueur sera proportionnelle à la vitesse du miroir et au temps pendant lequel brillera le point lumineux.

Supposons maintenant que l'on fasse jaillir une étincelle électrique près d'un miroir tournant rapidement : si l'étincelle a une durée suffisante, on verra dans le miroir un petit trait perpendiculaire à l'axe de rotation. C'est ce qui a lieu pour l'étincelle d'une bouteille de Leyde, quand on la décharge par l'intermédiaire d'un très-long fil métallique, et que le miroir fait 600 à 800 tours par seconde. Cette étincelle a donc une durée appréciable, comme nous l'avons déjà vu (1689).

Cela posé, considérons un long fil isolé ABCD (fig. 1395) : les parties ponctuées B et C indiquent la place de deux portions égales entre elles, ayant 402 mètres de longueur. Ce fil est interrompu en son milieu  $a$ , et en  $n$  et  $n'$ , tout près d'une bouteille de Leyde que l'on peut faire communiquer avec les extrémités A et D. Le système des boules  $n$ ,  $a$ ,  $n'$  est placé devant un miroir tournant, la ligne  $nm'$  étant parallèle à l'axe de rotation. Si l'on décharge la bouteille à travers ce système, il se produit trois étincelles  $n$ ,  $a$ ,  $n'$ , et, si le miroir tourne lentement, on voit par réflexion trois points brillants, disposés parallèlement à l'axe. Si le miroir tourne de plus en plus rapidement, on finit par distinguer trois traits perpendiculaires à cet axe, présentant cette apparence  $\equiv$ ; puis, l'image du milieu paraît en retard par rapport aux deux autres, et l'on a la disposition  $\equiv$  ou  $\equiv$ , suivant le sens de la rotation. On peut déjà conclure de là : 1° que l'électricité emploie un temps appréciable pour parcourir les portions de fil B et C; 2° que les étincelles  $n$ ,  $n'$  partent en même temps; 3° que la vitesse de propagation ne dépend pas du sens du courant, puisque ce sens

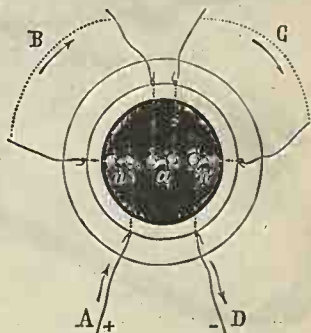


Fig. 1395.

<sup>1</sup> Archives de l'électricité, de A. de La Rive, t. II, p. 43.

est différent en B et en C ; jamais les images n'ont présenté les dispositions  
 — ou —<sup>1</sup>.

**Description de l'appareil.** — Après divers essais, Wheatstone a adopté l'appareil suivant (fig. 1396) : M est un miroir d'acier poli de 2<sup>cm</sup>,5 de diamètre, tournant autour d'un arbre métallique  $oo'$ , porté par un support massif en laiton, AB. Le mouvement est imprimé à l'arbre  $oo'$  au moyen d'une roue et d'une corde sans fin  $rr$ , qui embrasse la poulie  $p$ , dont le diamètre est 1800 fois plus petit que celui de la roue. La table à étincelles (fig. 1395) est fixée en face du miroir, de manière que la ligne  $nm'$  soit dans le même plan horizontal que l'axe de rotation, et l'observateur est placé à une distance de 30<sup>cm</sup>, sur la verticale qui passe par cet axe. Pour qu'il aperçoive les images des trois étincelles, il faut qu'elles jaillissent au moment où le miroir est tourné de son côté

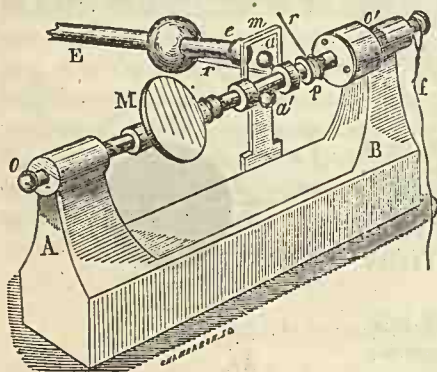


Fig. 1396.

et incliné de 45° sur l'horizon. Pour remplir cette condition, l'arbre  $oo'$  fait partie du circuit ; le fil  $f$  communique avec l'armature extérieure de la bouteille de Leyde, qui est isolée, et le conducteur isolé  $Ee$ , avec l'armature intérieure. Entre les deux, se développe le long fil métallique, au milieu duquel se trouve la table à étincelles. La distance qui existe entre le conducteur  $Ee$  et l'arbre  $oo'$  empêche la décharge d'avoir lieu ; mais la petite boule métallique  $a$  fixée à l'arbre, la produit

au moment où elle passe en face de la boule  $e$ . Afin de rendre cet instant encore plus précis, une lame de mica  $m$ , percée d'un petit trou, ne permet à l'étincelle de jaillir que lorsque le trou et les boules  $e$  et  $a$  sont en ligne droite. La boule  $a'$  fait contrepoids à la boule  $a$ , et la bouteille de Leyde reçoit continuellement l'électricité d'une machine électrique en mouvement, de manière à donner une série de décharges et à permettre de bien saisir les circonstances du phénomène.

<sup>1</sup> Cette circonstance semble défavorable à la théorie d'un seul fluide se transportant de A à D à travers les fils B, C ; mais, comme le remarque M. Edlund, si, entre les boules  $n$ , il y a une différence  $e$  de densité électrique, B étant à l'état neutre et A électrisé en plus, en  $n'$  la différence est aussi  $e$ , puisque D est électrisé en moins au même degré que A l'est en plus. Les étincelles doivent donc jaillir au même instant en  $n$  et  $n'$ .

longueur. Ils étaient suspendus par des cordons de soie dans une longue galerie, et repliés en dix parties parallèles.

**2019. Évaluation de la vitesse.** — Il fallait d'abord connaître le nombre de tours faits par le miroir en une seconde. Ce nombre se déduisait du son engendré par le choc de la boule *a* (fig. 1396) contre l'angle d'une carte; il fallait ensuite évaluer en degrés l'avance du trait du milieu par rapport aux deux autres. Cette quantité paraissait égale à  $2^{\text{cm}},5$ , et comprenait, au plus,  $\frac{1}{2}$  degré, pour  $3^{\text{m}}$  de distance de l'œil au miroir. Le miroir tournait donc de  $\frac{1}{4}$  de degré pendant le temps qui s'écoulait entre la manifestation des étincelles extrêmes et l'apparition de celle du milieu. Or, le nombre de tours était de 800 par seconde, ce qui équivaut à  $800 \times 360 \times 4$ , ou 1152000 quarts de degrés;  $\frac{1}{4}$  de degré était donc décrit en  $\frac{1}{1152000}$  de seconde, qui représente le temps employé par l'électricité pour parcourir les  $402^{\text{m}}$  de chacun des fils C et B. L'espace parcouru en  $1^{\text{s}}$  eût été 1,152,000 fois plus grand, c'est-à-dire 463,104,000<sup>m</sup>; en nombre rond, 463,000 kilomètres. Telle serait la vitesse minimum de l'électricité dans des fils de cuivre. On peut la comparer à celle de la lumière dans l'espace, qui est de 308,000 kilomètres par seconde.

La longueur de chaque trait lumineux pouvait comprendre  $24^{\circ}$ , ce qui assigne une durée de  $\frac{1}{24000}$  de seconde à l'étincelle; durée relativement considérable, à cause de la résistance du long fil, qui ne peut laisser passer toute l'électricité en même temps (1689).

**1050. Expériences sur l'électricité voltaïque.** — Dans les expériences faites avec l'électricité de la pile, on a profité des fils des télégraphes électriques. La première méthode, dite *méthode des longitudes*, a été employée d'abord, en 1849, par M. Walker, entre Philadelphie et Cambridge. L'électricité, lancée à travers un fil télégraphique, arrivait à une station éloignée, d'où elle était ramenée au point de départ par un second fil. Si le fluide se fût transmis instantanément, la différence entre les heures des deux stations au moment du passage de l'électricité, eût donné la différence de leurs longitudes; mais, comme l'électricité arrivait à la seconde station quelques instants après être partie de la première, l'heure d'arrivée observée était un peu postérieure à celle qui avait lieu à cette station au moment du départ de l'électricité. La différence des longitudes calculée par ce moyen se trouvait donc erronée, et, en la comparant avec la différence réelle, connue par les méthodes astronomiques, on évaluait l'erreur sur le temps, et, par conséquent, la fraction de seconde employée par l'électricité pour franchir la distance des deux stations. Des expériences semblables ont été faites entre Cincinnati et Pittsburg, et, plus tard, entre Greenwich et Edimbourg, puis entre Greenwich et Bruxelles.

En 1850, MM. Fizeau et Gouelle ont étudié, par une méthode toute différente, la vitesse de l'électricité dans les fils télégraphiques entre Paris et Amiens, et entre Paris et Rouen<sup>1</sup>. Le circuit de la ligne de Rouen était, partie en fer,

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXX, p. 437.

partie en cuivre, ce qui a permis de comparer les vitesses dans ces deux métaux, vitesses qui ont été trouvées entre elles comme 10 est à 18.

La méthode employée par MM. Fizeau et Gouelle, diffère peu de celle qu'employèrent, en 1854, MM. Guillemin et E. Burnouf, dans des expériences faites entre Toulouse et Foix, et dont voici le principe<sup>1</sup> : Deux fils télégraphiques parallèles, réunis à l'une des stations, forment un conducteur unique isolé, dont les extrémités sont à l'autre station. L'une de ces extrémités peut être mise en communication avec un des pôles d'une pile, et l'autre, avec l'un des bouts du fil d'un rhéomètre, dont l'autre bout plonge dans le sol, ainsi que le second pôle de la pile. Si l'on fait communiquer, *au même instant*, l'une des extrémités du fil télégraphique, avec la pile, et l'autre avec le rhéomètre, l'électricité s'élançe dans le fil, et agit sur le rhéomètre, après avoir parcouru le circuit télégraphique. Mais, si l'on interrompt les deux communications *simultanément* après un temps très court, il pourra se faire que l'électricité n'ait pas eu le temps d'arriver jusqu'au rhéomètre, dont l'aiguille ne bougera pas. Si l'on augmente un peu la durée des communications, une partie de l'électricité pourra parvenir à l'instrument, dont l'aiguille sera un peu déviée. Il suffira donc, pour obtenir le temps que met l'électricité à parcourir le fil télégraphique, de rendre de plus en plus court le temps pendant lequel les communications restent établies simultanément, et de saisir le temps limite pour lequel le rhéomètre cesse d'être dévié. Mais comme, en approchant de cette limite, l'instrument n'est parcouru que par une très petite quantité de fluide, ce qui le rend difficile à saisir

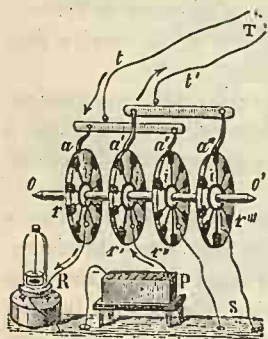


Fig. 1397.

d'une manière précise, on fait en sorte de faire passer cette même quantité de fluide plusieurs fois de suite, en répétant l'expérience à des intervalles assez rapprochés pour que l'aiguille reçoive plusieurs impulsions égales. Il faut aussi, évidemment, que le fil soit déchargé chaque fois, avant d'être rechargé.

Le croquis (fig. 1397) donne une idée de l'appareil imaginé par MM. Guillemin et Burnouf, pour remplir ces diverses conditions. Quatre roues de bois  $r$ ,  $r'$ ,  $r''$ ,  $r'''$ , de 5<sup>cm</sup> de diamètre, affermées sur un arbre  $oo'$ , portent, incrustées sur leur contour, des lames de laiton équidistantes, unies métalliquement à un anneau de laiton  $i$ ,  $i$ ,  $i$ ,  $i$ , sur lequel s'appuie un ressort. Les ressorts des roues  $r'$   $r$ , qui sont destinées à charger le fil, communiquent, l'un avec le pôle de la pile  $P$ , l'autre avec le fil du rhéomètre  $R$ . L'extrémité  $t$  du fil télégraphique,  $T$ , communique avec des ressorts  $a$ ,  $a''$  qui frottent sur le contour des roues  $r$ ,  $r''$ ; et l'extrémité  $t'$ , avec les ressorts  $a'$ ,  $a'''$  des roues  $r'$ ,  $r'''$

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXIX, p. 330.

communiquant en S avec le sol. Quand les roues tournent, les communications du fil T avec la pile et avec le rhéomètre, sont établies par l'intermédiaire de la virole de laiton, au moment où les ressorts *a*, *a'* s'appuient sur du métal; et sont interrompues quand ces ressorts s'appuient sur du bois. Les deux roues *r''*, *r'''* sont disposées sur l'arbre *oo'*, de manière que les ressorts *a''*, *a'''* touchent du métal quand les ressorts *a*, *a'* s'appuient sur du bois, et *vice-versâ*; de sorte que les ressorts *a*, *a'* servent à décharger le fil T par ses deux extrémités, pendant que les communications sont interrompues en *a* et *a'*; et laissent ce fil isolé, pendant qu'elles sont rétablies.

Les expériences ont été faites sur un circuit de 164 kilomètres. La déviation du rhéomètre, très grande quand les routes ne faisaient que 3 ou 4 tours par seconde, diminuait graduellement, jusqu'à 21 tours. Alors avait lieu le minimum de déviation; mais l'aiguille ne restait jamais au zéro, ce qui tenait à une induction entre les deux parties parallèles du fil, comme l'ont prouvé des expériences directes. Le temps pendant lequel les communications restaient établies, lors de ce minimum, a été pris pour celui qu'employait l'électricité à parcourir le circuit.

Il résulte de ces expériences, que le nombre et la grandeur des couples de la pile n'ont pas d'influence sur les résultats; ce qui avait déjà été constaté par M. L. Clarke, de 31 à 500 couples, puis confirmé par MM. Fizeau et Gouelle, qui ont aussi trouvé que la section du fil ne paraît pas avoir d'influence sensible, que la vitesse est la même pour les deux électricités lancées dans un long fil dont l'extrémité s'enfonce dans le sol, et que cette vitesse n'est pas proportionnelle à la conductibilité de la substance du fil. — M. Gould a aussi mesuré la vitesse de l'électricité, sur la ligne télégraphique de 1672 kilomètres entre Washington et Saint-Louis. Il employait un système écrivant analogue à celui que nous avons décrit plus haut (2046).

**2051. Résultats.** — Voici le tableau des vitesses trouvées par divers physiciens :

OBSERVATEURS.	Vitesse dans les fils de fer, en kilomètres.	Vitesse dans les fils de cuivre, en kilomètres.
Wheatstone .....	»	460 000
Fizeau et Gouelle.....	100 000	480 000
Guillemin et Burnouf.....	»	180 000
O'Mitchell .....	45 600	»
Walker .....	30 000	»
Gould .....	25 600	»
Entre Greenwich et Edimbourg....	»	12 200
Entre Greenwich et Bruxelles....	»	4 000

On est frappé des différences énormes que présentent ces résultats. Faraday en a trouvé une explication dans la condensation qui se fait dans le fil, de

manière qu'il n'arrive d'électricité à son extrémité qu'après qu'il s'en est accumulé une certaine quantité à l'état latent (2044). Cette condensation, considérable dans les câbles sous-marins, qui ont donné les plus faibles vitesses, existe aussi dans les fils télégraphiques suspendus dans l'air, près des murs, dans les tunnels et les tranchées, le long des viaducs.

Il résulte aussi de l'état variable qui précède l'état définitif du courant (2042), une grande incertitude sur ce qu'on doit prendre pour la vitesse de l'électricité. On peut représenter cette vitesse par le rapport entre la longueur du fil parcouru et le temps après lequel le courant est complètement constitué, c'est-à-dire la durée de l'état variable ; mais cette durée diminue quand le nombre des couples de la pile augmente, et elle augmente avec la longueur du fil parcouru (2042). On peut encore prendre pour vitesse le rapport entre la longueur du fil et le temps après lequel on saisit le premier signe de l'arrivée de l'électricité à son extrémité. Or ce temps dépend de la sensibilité des appareils de mesure. Ajoutons que les résultats obtenus ne peuvent être considérés comme des *minimum* ; car MM. Fizeau et Gouelle ont constaté, ce qui a été spécialement étudié par M. Varley, que si l'électricité est lancée par intermittences dans un long fil, chaque flux partiel s'étend dans une longueur croissante, à mesure qu'il s'éloigne du point de départ, probablement par la répulsion du fluide sur lui-même ; et rien ne prouve que cet effet se produisant à l'avant du flux, le moment où il arrive en un point donné n'est pas, par là, avancé, et d'autant plus que le parcours est plus long.

Quoi qu'il en soit, les remarquables expériences faites sur la vitesse de l'électricité ont eu pour résultat important de nous donner une idée de la rapidité extrême avec laquelle se propage le flux électrique dans les bons conducteurs, et de nous montrer que cette rapidité dépend de la nature du métal qui lui sert de véhicule.

## § 2. — LOIS DES INTENSITÉS DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

### I. Mesure des intensités des courants.

**2052. Méthodes rhéométriques.** — On a d'abord évalué l'intensité des courants au moyen du voltamètre. Mais cette méthode ne peut s'appliquer qu'aux courants constants et assez durables. On s'est aussi servi de l'échauffement d'un fil de dimensions connues (1394). Aussitôt après la découverte de la déviation de l'aiguille aimantée par les courants, on en a fait l'application à la mesure de leur intensité. Biot et Savart ont employé d'abord la méthode des oscillations, au moyen d'une aiguille astatique placée à une distance constante d'un fil métallique ; les intensités des courants qui traversaient successivement ce fil étaient entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps. Ohm a employé le premier la méthode de torsion : l'aiguille étant

suspendue parallèlement au rhéophore, par un fil métallique très fin fixé à un micromètre semblable à celui de la balance électrique (1618), on l'amène, dans chaque expérience, à faire un même angle avec le courant. Mais on compare le plus souvent les courants, au moyen des rhéomètres.

**2053. Des rhéomètres.** — Nous avons fait connaître le principe du multiplicateur à une et à deux aiguilles, et indiqué comment il peut servir à constater l'existence des plus faibles courants (1830). Quand on veut comparer les intensités de ces courants, on dispose un cercle gradué au-dessous de l'aiguille supérieure. Le multiplicateur ainsi muni d'un cadran a reçu de Peetlet le nom de *rhéomètre*, nom préférable à celui de *galvanomètre*, le plus souvent employé.

Pour comparer les intensités des courants, au moyen de cet instrument, on observe l'angle que fait l'aiguille supérieure avec le plan du cadre, qu'on a toujours soin de placer dans le *méridien magnétique*.

— Le cercle gradué est généralement formé d'un disque de cuivre, qui a la propriété, comme nous le verrons, d'amortir les oscillations des aiguilles. — M. Tœppler obtient ce même résultat en suspendant au fil de suspension, au-dessus des aiguilles, un mince disque vertical en *aluminium*, enveloppé d'une boîte dans laquelle il peut osciller, et qui porte intérieurement deux demi-cloisons verticales perpendiculaires au plan de repos du disque. L'air, gêné dans ses mouvements, amortit les oscillations du disque et des aiguilles qui y sont attachées.

La *fig. 1398* représente le rhéomètre sous sa forme habituelle; *ab* est le cadre de bois sur lequel est enroulé le fil revêtu de soie, dont *n, n'* sont les extrémités. *l* est l'aiguille supérieure, suspendue par un fil de soie sans torsion *f*; elle est liée invariablement à une seconde aiguille parallèle, placée dans l'intérieur du cadre et dont les pôles sont opposés aux siens, par une tige de cuivre qui passe dans un tube de verre traversant la partie supérieure du cadre. Au moyen d'une vis disposée au haut de l'appareil, on peut faire descendre le fil de suspension, de manière que l'aiguille *l* repose sur le cadran, quand on ne se sert pas de l'instrument.

Il faut avoir soin que le fil enroulé sur le cadre soit distribué bien régulièrement, de manière qu'il ne forme pas une plus grande épaisseur d'un côté que de l'autre. On vérifie s'il en est ainsi, en faisant passer un même courant successivement en sens opposé, et voyant si l'aiguille est déviée de la même quantité de part et d'autre du méridien magnétique, auquel le plan du cadre doit être parallèle. Du reste, dans les expériences précises, comme celles du thermomultiplicateur, il est bon de faire deux observations, en faisant passer successivement le courant dans les deux sens opposés, et prenant la moyenne

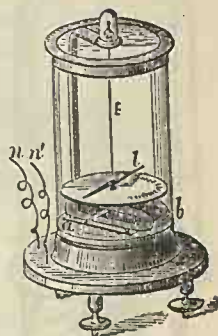


Fig. 1398.

des résultats. M. Rossetti a, en effet, remarqué que souvent l'aiguille ne revient pas au zéro après le passage d'un courant en un seul sens. M. Tyndall a aussi reconnu que la soie teinte en vert par des sels de fer peut troubler les mouvements des aiguilles ; il est donc préférable de revêtir le fil de cuivre de soie blanche ou teinte à l'aniline. Quand l'instrument est destiné à constater le passage d'électricité à forte tension, comme celle des machines électriques, on isole les tours du fil en séparant les différentes couches qu'il forme, par des lames de taffetas gommé, ou en imbibant de gomme laque ou de paraffine, la soie qui recouvre le fil.

M. Bonelli construit des rhéomètres très sensibles et très économiques sans fils métalliques, en enroulant sur le cadre une bande de papier sans fin, sur laquelle sont tracées en hélice des lignes dorées que parcourt le courant, et qui sont isolées par le papier.

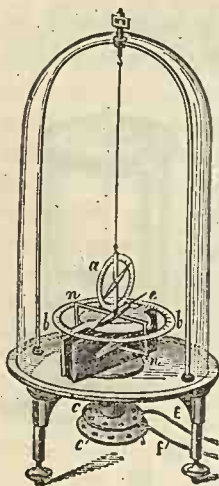


Fig. 1399.

**Rhéomètre de Péclet.** — Dans cet instrument, Péclet a évité plusieurs défauts du rhéomètre ordinaire. Les deux aiguilles ont 4<sup>mm</sup> d'épaisseur, et sont réunies par un rectangle en ivoire *nn* (fig. 1399), perpendiculaire à leur direction ; ce qui dispense de diviser le fil en deux faisceaux à sa partie supérieure, pour laisser passer la suspension, ce qui peut faire que l'aiguille prenne trois positions d'équilibre, le cuivre étant souvent un peu magnétique. Une troisième aiguille, qui peut être déplacée autour du centre d'un cercle *a*, dans le plan vertical qui contient les deux autres, permet de modifier à volonté la force directrice du système. Le cadran divisé est en cuivre épais, et les extrémités du fil de cuivre sont soudées à deux disques de laiton *c*, *c'*, isolés l'un de l'autre et munis de trous dans lesquels on peut enfoncer les fils rhéophores *f*, *f'*.

Enfin, on peut faire tourner le cadre autour d'un axe vertical, pour l'orienter, au moyen d'une tige centrale qui sort en dessous, et est terminée par un bouton.

**2054. De la sensibilité du rhéomètre.** — La sensibilité d'un rhéomètre dépend de la *force individuelle* de chacune des deux aiguilles aimantées, force qui doit être aussi grande que possible ; et de la force directrice de la terre sur le système, qui doit être au contraire très faible. Quelquefois on emploie une troisième aiguille placée au-dessous du cadre, liée aux autres, et tournée comme celle de dessus. L'aiguille intérieure doit alors être beaucoup plus forte que les deux autres pour que la force directrice de la terre soit toujours très faible. Les aiguilles doivent être très rapprochées des plis du fil enroulé ; l'intérieur du cadre doit donc être aussi étroit que possible.

La sensibilité n'augmente pas toujours avec le nombre de tours du fil, surtout quand la résistance propre de la source est faible, comme dans les piles thermo-



électriques. Les tours superposés aux autres ont une action moindre, à cause de leur plus grande distance de l'aiguille intérieure, et leur présence peut, en diminuant l'intensité du courant, détruire tout l'avantage de cette action. On atténue cet inconvénient en formant les tours extérieurs, de fils de plus en plus gros.

Pour faciliter la mesure des déviations, on fixe souvent perpendiculairement sur l'aiguille une longue aiguille indicatrice très légère, dont l'extrémité parcourt un arc de grand rayon ; ou mieux on fixe au-dessus de l'aiguille supérieure, un petit miroir qui renvoie un pinceau de rayons lumineux sur une règle divisée comme dans certains électromètres (1677).

Quand on a un rhéomètre très sensible, il faut éviter d'y introduire brusquement des courants trop forts, qui pourraient modifier le magnétisme des aiguilles, détruire l'aimantation de l'une d'elles, déplacer son axe magnétique ou renverser ses pôles. D'un autre côté, comme les aiguilles, quand elles s'approchent beaucoup de la position perpendiculaire au méridien magnétique, n'obéissent que faiblement à de grandes variations d'intensité ; souvent on affaiblit le courant, au moyen d'un fil de dimensions connues introduit dans le circuit, et dont on tient compte. Quelquefois le cadre reçoit plusieurs fils indépendants les uns des autres et faisant des nombres de tours différents ; on fait passer le courant dans le fil que l'on veut. On peut aussi réunir ces fils bout à bout de manière à n'en former qu'un seul.

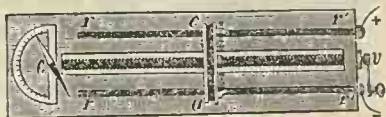


Fig. 1400.

MM. Fabre et Kunemann ont imaginé un rhéomètre (*fig. 1400*) dont on peut faire varier la sensibilité entre certaines limites. Le cadre multiplicateur *ca* peut être rapproché plus ou moins de l'aiguille *e*, au moyen d'une vis *v* qui traverse un écrou qu'il porte au-dessous. Les extrémités du fil sont terminées par des ressorts qui s'appuient sur des règles métalliques isolées, *rr'*, *rr'*, dont les extrémités *r'*, *r'* communiquent avec la source d'électricité. Le courant passe alors d'une règle à l'autre à travers le fil du cadre *ac*. Quand le cadre enveloppe l'aiguille, on a un rhéomètre ordinaire. Quand ensuite on éloigne ce cadre, l'appareil devient moins sensible. L'effet produit sur l'aiguille par un même courant paraît varier en raison inverse du carré de la distance.

Nous avons décrit plus haut le rhéomètre différentiel (1831). Wheatstone a imaginé de faire servir les rhéomètres ordinaires de rhéomètres différentiels en faisant passer, dans le fil unique, les deux courants en sens contraire.

**2055. Tables de graduation.** — Les intensités des courants qui traversent un même rhéomètre ne sont pas proportionnelles aux déviations, car la composante efficace de l'action magnétique terrestre augmente avec la déviation, pendant que la composante du courant qui lui fait équilibre diminue ; cette composante étant perpendiculaire au plan du cadre, car c'est suivant cette direction que se place une aiguille *astatique*. Cependant, on peut regarder les déviations comme proportionnelles aux intensités quand l'angle ne dépasse pas 20°, et l'on

peut toujours se tenir au-dessous de cette limite en affaiblissant le courant au moyen d'un fil auxiliaire. Quand on ne veut pas avoir recours à cet artifice, on se sert de tables construites directement, dans lesquelles sont inscrites les intensités correspondantes aux différentes déviations. Plusieurs physiciens se sont occupés de cette question. Nous avons vu comment procédait Melloni (II, 842). Becquerel a employé le moyen suivant : on enroule autour d'un cadre de multiplicateur, un faisceau de 4 fils de cuivre égaux revêtus de soie. A chaque fil correspond un couple *fer-cuivre*, auquel sont soudées ses extrémités. On fait passer un courant thermo-électrique successivement dans 1, 2, 3 ou 4 fils, en plongeant une des deux soudures de chaque fil dans du mercure chaud, l'autre étant à 0°, et l'on compare les déviations aux actions exercées sur l'aiguille aimantée; actions qui sont évidemment proportionnelles aux nombres 1, 2, 3, 4. On fait de même pour d'autres températures du mercure, et l'on a ainsi les éléments d'une table.

Peltier et Poggendorff<sup>1</sup> ont aussi indiqué des moyens de construire des tables de graduation. Chaque instrument en exige une faite exprès pour lui. Mais il existe des appareils et des méthodes qui donnent directement l'intensité des courants, ce qui nous dispense d'insister davantage, d'autant plus que ces appareils, que nous allons décrire, peuvent servir au besoin à construire des tables pour les rhéomètres ordinaires.

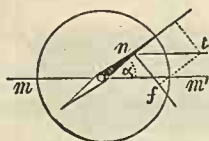


Fig. 1401.

**2056. RHÉOMÈTRES COMPARABLES.** — Citons d'abord le *rhéomètre de torsion* ou de *Ritchie*, qui ne diffère d'un rhéomètre ordinaire qu'en ce que les aiguilles sont suspendues à un fil métallique fixé par sa partie supérieure à un micromètre, au moyen duquel on peut tordre le fil, de manière à ramener constamment les aiguilles dans le plan du cadre placé dans le méridien magnétique. L'angle de torsion du fil est alors évidemment proportionnel à la force du courant.

**Boussole des sinus.** — Voici quel est le principe de cet instrument ingénieux. Si le plan du cadre d'un rhéomètre conservait toujours la même position par rapport à l'aiguille aimantée, les intensités de deux courants successifs seraient entre elles comme les composantes efficaces de la force magnétique terrestre. Or, la composante,  $nf$  (fig. 1401), a pour valeur  $t \sin \alpha$ ,  $t$  étant la composante horizontale terrestre, et  $\alpha$  l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique  $mm'$ . Les intensités des courants sont donc entre elles comme les sinus des déviations. Un rhéomètre ordinaire constituerait une *boussole des sinus*, si l'on faisait tourner le cadre de manière que le zéro du cadran vint toujours se placer sous l'aiguille. — Du reste, au lieu de maintenir l'aiguille sur le zéro du limbe, on peut l'astreindre à s'en écarter d'un angle constant, et faire varier ainsi la sensibilité de l'instrument.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXXI, p. 225, et 3<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 115.

Le principe de la boussole des sinus est dû à de La Rive; la figure 1402 représente le modèle imaginé par Pouillet. Le fil, revêtu de soie, dont les extrémités sont en  $f, f'$ , est enroulé sur le cercle  $AA'$ , au centre duquel se trouve l'aiguille aimantée  $e$ . Une tige très-légère, en baleine ou en roseau, fixée perpendiculairement au milieu de l'aiguille sert à en suivre facilement les mouvements. Le cercle  $AA'$  peut tourner autour d'un axe vertical, de quantités angulaires données par le vernier  $v$  et le cercle horizontal  $cc'$ . Pendant le passage du courant, on fait tourner le plan  $AA'$ , de manière que l'aiguille corresponde toujours au zéro. Le vernier donne alors l'angle que fait le plan  $AA'$ , et, par conséquent, l'aiguille  $e$  avec le méridien magnétique, angle dont il reste ensuite à prendre le sinus. — Dans les boussoles très-sensibles, le cercle  $AA'$  est remplacé par un cadre très-aplati, l'aiguille aimantée est suspendue par un fil de cocon, et l'on suit les mouvements de l'aiguille indicatrice au moyen d'un petit microscope à réticule porté par le cadre multiplicateur. Remarquons enfin

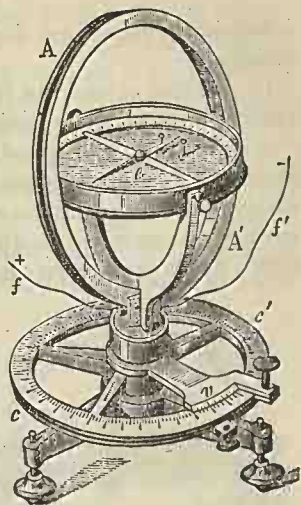


Fig. 1402.

que la boussole des sinus n'ayant qu'une seule aiguille, ses indications ne sont pas modifiées par les changements que peut éprouver l'état magnétique de cette aiguille, ces changements affectant également les actions qu'elle reçoit de la terre et du courant.

**2057. Boussole des tangentes.** — La boussole des sinus, exigeant une manipulation qui demande un certain temps, ne se prête pas à l'évaluation rapide des courants variables. Quand on veut obtenir l'intensité par une simple lecture, on emploie la boussole des tangentes, inventée par Pouillet en France, et par M. Nervande en Norvège. Considérons une aiguille aimantée  $o$  (fig. 1403) mobile sur une large bande métallique horizontale, dirigée suivant le méridien  $mn$  et traversée par le courant, de manière que la quantité d'électricité qui passe par chaque ligne parallèle à  $mn$  soit la même. Supposons, de plus, que l'aiguille  $o$  soit très petite, et assez éloignée des bords pour que ceux-ci n'aient aucune influence sur elle, quelle que soit sa position. Alors l'action totale du courant sur cette aiguille restera la même, de quelque manière qu'elle se tourne. Or, cette action,  $c$ , étant perpendiculaire à  $mn$ , sa composante perpendiculaire à l'aiguille sera  $c \cos \alpha$ . Cette



Fig. 1403.

composante fait équilibre à la composante efficace  $t \sin \alpha$  de l'action terrestre; on a donc :

$$c \cos \alpha = t \sin \alpha, \quad \text{d'où } c = t \tan \alpha.$$

L'intensité du courant est donc proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation.

On peut faire en sorte que l'action du courant sur l'aiguille reste sensiblement constante dans toutes les positions de cette dernière, en la plaçant au centre d'un circuit circulaire de grand diamètre. C'est ainsi que Pouillet a construit la boussole des tangentes représentée dans la *fig. 1404*.  $ama'$  est une bande circulaire de cuivre dont les extrémités  $a, a'$ , plongent, en  $c, c'$ , dans du mercure, qui reçoit les fils rhéophores. L'aiguille aimantée  $e$ , suspendue au centre, doit être très courte : on y fixe perpendiculairement une longue aiguille indicatrice, pour faciliter la mesure des angles, aux tangentes desquelles les intensités des courants sont proportionnelles.

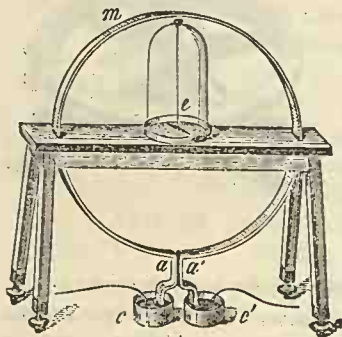


Fig. 1404.

**Limite de précision de la boussole des tangentes.** — L'aiguille n'étant pas infiniment petite, ses pôles ne sont pas exactement à la même distance de tous les points du circuit  $ama'$ . Aussi, plusieurs physiciens, parmi lesquels MM. Poggen-dorff, Weber, Lenz, Despretz, Bravais, Gauguain,...., ont-ils cherché, soit par l'expérience, soit par le calcul, jusqu'à quel point on peut avoir confiance dans la méthode des tangentes. Despretz<sup>1</sup> faisait passer un courant constant dans la bande

circulaire de cuivre, affaiblissait ce courant dans un rapport connu, au moyen d'une dérivation convenable, et comparait le rapport des tangentes de déviations, au rapport connu des intensités des courants. Il a reconnu ainsi que, pour obtenir des résultats précis, il faut que le diamètre du circuit soit de 1 mètre quand l'aiguille a 3<sup>cm</sup> de longueur. Mais alors l'appareil est peu sensible, à moins qu'on ne remplace le ruban métallique par un fil de cuivre faisant plusieurs tours.

Blanchet et de la Provostaye, en partant des lois de l'électro-magnétisme, que nous exposerons plus tard, ont trouvé, par le calcul, que l'intensité  $c$  d'un courant, produisant la déviation  $\alpha$ , est donnée par la formule

$$c = t (1 + 3d^2) \tan \alpha - \frac{15 d^2}{8} \sin 2 \alpha,$$

dans laquelle  $d$  est le rapport entre la distance des pôles de l'aiguille aimantée

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, 5<sup>e</sup> série, t. XXXV, p. 450.

et le diamètre du circuit, et qui se réduit à  $c = t \operatorname{tang} \alpha$ , si l'on suppose  $d$  infiniment petit. Despretz a trouvé les résultats donnés par la formule, d'accord avec l'expérience ; les différences correspondant à peine à quelques minutes de degré. Mais cette formule ne peut être d'un usage pratique, d'autant plus que la distance des pôles d'une aiguille courte ne peut être évaluée avec précision.

Une des causes d'erreur de la boussole des tangentes vient de ce que les pôles de l'aiguille s'éloignent sensiblement du plan du cercle, quand la déviation augmente. M. Gaugain a cherché à éviter cette cause d'erreur en plaçant le centre de l'aiguille à une distance convenable de ce plan, de manière que l'un de ses pôles s'en rapproche pendant que l'autre s'en éloigne. La *fig. 1405* représente l'appareil avec lequel il a expérimenté. Le cercle rhéophore *ab* et l'aiguille *e* sont soutenus par des supports séparés *n* et *d*, dont le dernier, *d*, peut s'éloigner de l'aiguille en glissant dans une coulisse *ce'*. Des expériences

faites avec deux cercles de diamètre différent, ont montré que les tangentes des déviations sont proportionnelles aux intensités des courants, quand la distance entre le centre de l'aiguille et le centre du cercle, est le quart du diamètre de ce dernier. Pour qu'on pût faire varier le courant dans un rapport connu, le cercle était entouré d'un faisceau de quatre fils identiques régulièrement tordus ensemble, qu'on réunissait, de manière à faire passer le courant deux, trois, ou quatre fois, à volonté, autour de l'aiguille, et à doubler, tripler ou quadrupler son action,

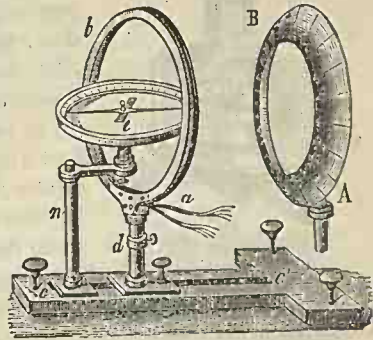


Fig. 1405.

que l'on comparait ensuite aux tangentes des déviations. Pour éviter l'influence des variations d'intensité de sa pile de Daniell, M. Gaugain alternait les observations faites dans les divers cas ; et, au moyen de fils additionnels introduits dans le circuit en dehors du cercle, il faisait en sorte que la résistance totale fût toujours la même.

La loi trouvée par M. Gaugain n'a été obtenue qu'avec deux cercles différents ; mais Bravais l'a confirmée par le calcul. — Il résulte aussi de cette loi, que les circuits circulaires de différents diamètres produisant des déviations dont les tangentes varient comme les intensités, sont situés sur un cône droit ayant son sommet au centre de l'aiguille, et dont le diamètre de base est quadruple de la hauteur. M. Gaugain est parti de là pour construire une boussole des tangentes à multiplicateur : Il enroule sur une portion de cône *AB* (*fig. 1405*) ayant les proportions indiquées, et qu'il substitue au cercle *ab*, un fil de cuivre faisant beaucoup de tours, et il éloigne ce cône de manière que son sommet soit au centre de l'aiguille. — Jacobi, en employant deux cônes multiplicateurs placés

de chaque côté de l'aiguille et ayant leur sommet commun en son centre, annule l'influence des défauts d'installation qu'elle pourrait comporter.

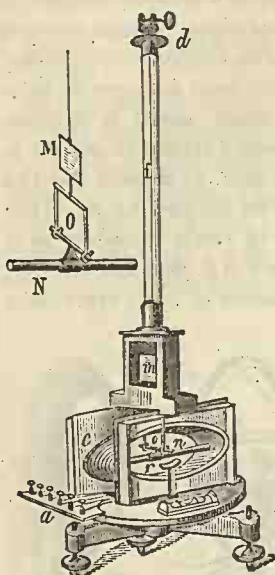


Fig. 1406.

en faisant tourner l'appareil autour d'un axe vertical porté par son pied. Le fil de suspension  $f$  est fixé au petit treuil d'un micromètre  $d$  semblable à celui de la balance de Coulomb (1509), ce qui permet d'appliquer la méthode de torsion.

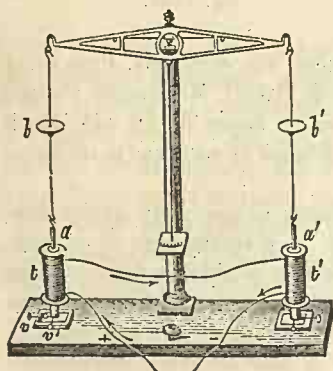


Fig. 1407.

en sens opposé autour des tubes  $t, t'$ , l'aimant est soulevé dans l'un d'eux et s'enfonce dans l'autre, et il faut, pour rétablir l'équilibre, mettre sur l'un des

**2058. Magnétomètre électrique de Weber.** — Cet appareil très-précis, qui peut servir de déclinomètre (1564), se prête à l'application de la méthode des tangentes, quand on n'opère que sur de très-petites déviations. Un ou plusieurs fils recouverts de soie,  $c$  (fig. 1406), enroulés sur un cylindre elliptique, ou sur un cadre, en cuivre épais qui amortit les oscillations, aboutissent à des bornes fixées sur une plaque d'ivoire  $a$ . Dans le cadre, est suspendu, par un faisceau de fils de soie sans torsion ou par deux fils parallèles (1566), un barreau aimanté  $n$ , représenté à part en  $N$ . Ce barreau est accroché au-dessous d'un rectangle  $o, O$ , qui embrasse, sans le toucher, le haut du multiplicateur, comme dans le rhéomètre de Peelet (2053). Un miroir plan  $M, m$ , fixé perpendiculairement au barreau  $N, n$ , sert à mesurer avec une grande précision les petites déviations par la réflexion d'un pinceau lumineux (1677). Un petit arc divisé  $r$  peut aussi donner approximativement ces déviations ; il sert principalement à amener l'aimant au zéro,

**2059. Balance électro-magnétique.** — Cet instrument, imaginé par Becquerel, fait connaître les intensités des courants au moyen de poids. Aux bassins  $b, b'$  d'une balance sensible au milligramme (fig. 1407), sont suspendus des barreaux aimantés  $a, a'$  qui entrent sans frottement dans des tubes de verre verticaux  $t, t'$  entourés d'un fil de cuivre revêtu de soie et faisant plusieurs milliers de tours. Ces tubes peuvent être centrés par rapport aux axes des aimants, au moyen de vis de rappel,  $v, v'$ . Si l'on fait passer un courant

plateaux  $b$ ,  $b'$  des poids en rapport avec l'intensité du courant. Par exemple, le courant d'un couple zinc et cuivre de 4 centimètres carrés plongé dans l'eau distillée, étant équilibré par  $2\text{mg},5$ , il fallut  $35\text{mg}$ , après qu'on eut ajouté à l'eau une goutte d'acide sulfurique. Le second courant était donc égal à 14 fois le premier.

L'action attractive n'agissant pas de la même manière que la répulsive, Jacobi n'emploie que la force répulsive, en mettant les deux bobines du même côté l'une au-dessus, l'autre au-dessous de l'aimant unique.

**Rhé-électromètre.** — Marianini a construit, sous le nom de *rhé-électromètre*, un appareil qui peut servir aux courants instantanés comme aux courants continus. Sur le côté d'une boîte contenant l'aiguille aimantée horizontale est un support vertical qui porte un électro-aimant formé d'un barreau de fer doux horizontal, autour duquel est enroulé en hélice le fil rhéophore revêtu de soie. Quand on lance le courant dans ce fil, l'aiguille est déviée. On peut faire varier la sensibilité de l'instrument en plaçant l'électro-aimant à différentes hauteurs sur son support.

**2060. Galvanomètre de Wiedemann.** — Cet instrument, très-sensible, est représenté (fig. 1408) tel que le construit M. Ducretet. L'aiguille aimantée est remplacée par un aimant circulaire  $A$  surmonté d'un petit miroir, pour la mesure des déviations au moyen d'un pinceau lumineux réfléchi. L'aimant est suspendu, par un fil métallique, à un micromètre  $BT$ , et se meut dans une

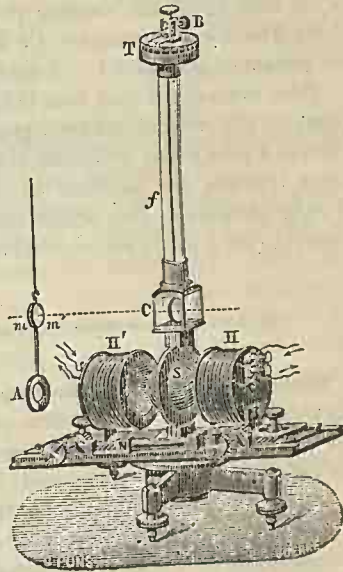


Fig. 1408.

boîte sphérique en cuivre pur  $s$ , qui amortit ses oscillations. Deux bobines identiques  $H$ ,  $H'$  peuvent, au moyen de crémaillères à pignon, être rapprochées de la sphère  $s$  jusqu'à l'envelopper. Quand les deux bobines sont à la même distance de la sphère, un courant les parcourant simultanément en sens contraire, laisse l'aimant en repos. Mais, si alors on déplace une des bobines, il se produit une déviation. On peut modifier à volonté la sensibilité de l'instrument en changeant la position des bobines. On peut aussi le faire fonctionner comme rhéomètre différentiel en faisant passer les courants à comparer chacun dans une des bobines, placées à égale distance de la sphère  $s$ .

**2061. Comparaison des rhéomètres.** — Nous avons vu que la force magnétique d'un courant est proportionnelle à sa force chimique (1993).

M. Marié-Davy est parti de là pour rendre les divers rhéomètres comparables *entre eux* : il observe la déviation que leur fait subir un courant, dont l'intensité constante est mesurée par le volume de gaz dégagé dans un voltamètre pendant l'unité de temps. Par exemple, si nous considérons une *boussole des tangentes*, l'intensité  $I$  du courant sera  $I = k \operatorname{tang} d$ ,  $k$  étant une constante qu'il faut évaluer pour chaque instrument. Or, on prend pour unité l'équivalent d'électricité, c'est-à-dire la quantité qui décompose 1 équivalent d'eau (1994). L'intensité du courant sera donc représentée par le nombre d'équivalents d'eau qu'il décompose en une minute. Soit  $I'$  ce nombre et  $d$  la déviation de la boussole des tangentes ; on aura  $I' = k \operatorname{tang} d$ , d'où l'on tirera la valeur de  $k$ , et alors la formule donnera pour chaque déviation, l'intensité, en équivalents d'électricité par minute. On ferait de même pour la boussole des sinus, en partant de la formule  $I = k \sin d$ .

Nous avons décrit plus haut (1831) des rhéomètres dont l'aiguille, mobile dans un plan vertical, est assez grande pour être distinguée de loin. Les rhéomètres à petit miroir réflecteur remplissent le même rôle, et nous décrirons, dans l'optique, des appareils au moyen desquels on projette sur un écran l'image grossie des plus petites aiguilles, de manière à en rendre les mouvements faciles à suivre par un nombreux auditoire.

## II. Lois des intensités des courants. — Lois d'Ohm et de Pouillet.

**2062. Résistance des fils d'après leurs dimensions.** — La RÉSISTANCE qu'un fil métallique introduit dans un circuit oppose au passage de l'électricité, est 1<sup>o</sup> en raison directe de sa longueur ; 2<sup>o</sup> en raison inverse de sa section. La loi des sections pouvait se prévoir, l'électricité passant également par tous les points de la section (2037). Ces lois peuvent encore s'énoncer ainsi : la CONDUCTIBILITÉ d'un fil métallique est en raison inverse de sa longueur et en raison directe de sa section. On peut dire enfin que, la longueur étant constante, la conductibilité est proportionnelle à la masse du fil ; cette masse étant proportionnelle à la section. — Ces lois ont été énoncées pour la première fois par H. Davy. Pour les démontrer, il détournait d'un voltamètre, au moyen du fil à étudier, toute l'électricité fournie par une pile, admettant que ce résultat était obtenu quand il ne voyait plus de dégagement de gaz. Il trouva que, pour qu'il en fût ainsi, deux fils de même métal et de même section devaient avoir des longueurs proportionnelles au nombre des couples de la pile. Il prouva ensuite que deux fils de même métal détournent également toute l'électricité d'une même pile, quand leurs longueurs sont proportionnelles à leurs sections ; d'où il déduisit la loi des sections. Ces expériences étaient loin d'être convaincantes, la méthode étant peu précise, le galvanomètre et les piles à courant constant n'étant pas encore connus.

Becquerel a employé une méthode indépendante des variations de la pile.



On fait passer en sens contraire dans un rhéomètre différentiel R (fig. 1409), deux courants égaux provenant d'une même pile P, dont les rhéophores se bifurquent. Tout étant identique dans les deux circuits, l'aiguille aimantée reste au zéro. Si ensuite on réunit les coupes de mercure  $a, a'$  et  $b, b'$  par des fils métalliques, et si ces fils détournent du rhéomètre les mêmes quantités d'électricité, l'aiguille reste encore au zéro. Or, Becquerel ayant réuni  $a, a'$  par un fil quelconque, reconnu qu'il fallait, pour que l'aiguille restât au zéro, réunir  $b, b'$  par deux, trois... fils de même substance et de même section que le fil  $aa'$ , quand la longueur était double, triple...; ou par un seul fil de même longueur et de section double, triple... Comme on peut admettre que l'électricité éprouve deux fois moins de résistance à passer dans deux fils égaux que dans un seul, les deux lois se trouvent démontrées<sup>1</sup>.

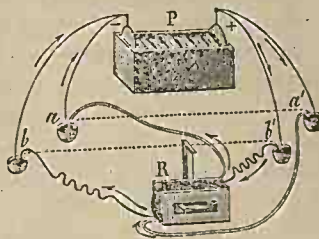


Fig. 1409

**2063. Méthode de Pouillet.** — Pour démontrer directement ces mêmes lois, Pouillet fait passer dans les deux fils qu'il compare, les courants de deux couples thermo-électriques identiques. Ces couples (fig. 1410) sont formés de deux barreaux de bismuth  $ac, a'c'$  coulés dans un même moule et auxquels sont soudés des fils de cuivre de même longueur. Après s'être assuré, au moyen du rhéomètre différentiel, que les extrémités  $a, a'$ , et les extrémités  $c, c'$  plongées dans les mêmes bains, donnent deux courants égaux, on complète le circuit de chaque couple avec deux brins du même fil de cuivre, dont on enroule une partie sur le cadre d'un même rhéomètre, de manière que les nombres de tours soient proportionnels aux longueurs totales des fils. Par exemple, si le fil de cuivre du couple  $ac$  est 4 fois plus long que celui du couple  $a'c'$ , on fait faire 4 tour au second fil, et 4 tours au premier. Alors quand les deux courants passent en sens contraire dans les deux fils, l'aiguille du rhéomètre reste au zéro. Le fil le plus long doit donc agir 4 fois sur l'aiguille pour contrebalancer l'action du plus court, qui n'agit qu'une fois; le courant qui parcourt ce dernier est donc 4 fois plus intense que l'autre, quoique les sources soient identiques. — La loi des sections se vérifie de la même manière, en faisant faire sur le cadre, à deux fils de même longueur, des nombres de tours en raison inverse des sections. Il faut veiller surtout à l'identité de substance des fils, les prendre dans le même paquet, et, quand on compare les sections, faire tirer à la filière des portions d'un même fil.



Fig. 1410.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XXXII, p. 420.

La *boussole des sinus* peut servir à constater les lois avec une pile constante quelconque. Après avoir mesuré l'intensité du courant qu'elle donne, on introduit successivement dans le circuit, des fils de même matière et de dimensions différentes, et l'on mesure la diminution d'intensité produite, diminution proportionnelle à la longueur, et en raison inverse de la section des fils.

**2064. Cas des colonnes liquides.** — Les lois de la résistance des fils métalliques s'appliquent aux colonnes liquides. Pour faire varier la section, M. Fechner faisait passer le courant suivant la longueur d'une auge dans laquelle plongeaient deux lames métalliques servant d'électrodes, et qui contenait un liquide dont il faisait varier la profondeur; la résistance variait en raison inverse de la section, tant que celle-ci ne dépassait pas notablement l'étendue de la surface des électrodes. — Pour la loi des longueurs, on fait passer le courant à travers une colonne liquide contenue dans un tube de verre; on fait varier la longueur de la colonne en écartant plus ou moins les électrodes, qui doivent toujours rester plongées dans le liquide afin que la résistance au passage soit toujours la même. — Pouillet a aussi fait des expériences sur les lois de la résistance des liquides. Ces sortes d'expériences se font avec des appareils que nous décrirons en étudiant les conductibilités (2092).

Les méthodes que nous venons de passer en revue peuvent servir à comparer les conductibilités de fils métalliques de nature différente. Réciproquement, les méthodes que nous décrirons en parlant de la mesure des conductibilités, ont servi à vérifier les lois qui viennent de nous occuper.

**2065. Conséquences.** — **Longueur réduite.** — Désignons par  $c, l, s$  la conductibilité, la longueur et la section d'un fil; par  $c', l', s'$  les mêmes quantités pour un second fil; il résulte des lois énoncées que leurs résistances seront proportionnelles à  $l : cs$ , et  $l' : c's'$ ; la résistance étant en raison inverse de la conductibilité. Ces deux fils produiront donc la même résistance  $r$ , ou seront *équivalents*, quand on aura

$$\frac{l}{cs} = \frac{l'}{s'c'}, \quad \text{ou} \quad ls'c' = l'sc; \quad \text{d'où} \quad l = l' \frac{sc}{s'c'};$$

formule qui donne la longueur  $l$  que doit avoir un fil de section  $s$  et de conductibilité  $c$ , pour produire le même effet qu'un autre fil de longueur  $l'$ , de section  $s'$ , et de conductibilité  $c'$ . La valeur de  $l$  se nomme la *longueur réduite* du premier fil comparé au second.

On peut calculer la longueur d'un fil unique de section  $s$  et de conductibilité  $c$  qui produirait la même résistance que plusieurs fils soudés les uns à la suite des autres. Soient  $s', c', l'; s'', c'', l''; s''', c''', l''' \dots$  les quantités correspondantes à ces fils. La longueur,  $l$ , sera égale à la somme des longueurs réduites qui correspondent à chacun d'eux; on aura donc

$$l = l' \frac{sc}{s'c'} + l'' \frac{sc}{s''c''} + l''' \frac{sc}{s'''c'''} + \dots = sc \left( \frac{l'}{s'c'} + \frac{l''}{s''c''} + \frac{l'''}{s'''c'''} + \dots \right)$$

**2066. LOIS D'OHM ET DE POUILLET.** — Dans ce qui précède, nous n'avons considéré que la diminution qu'un fil de métal interposé dans un circuit fait éprouver à l'intensité d'un courant donné; nous allons maintenant étudier les lois relatives aux conditions dont dépend cette dernière intensité. Ces conditions sont : 1<sup>o</sup> la *force électromotrice* qui fournit l'électricité; 2<sup>o</sup> les *résistances* que le fluide éprouve à se propager dans le circuit, résistances que de La Rive a le premier considérées. Les lois dont il s'agit sont connues sous le nom de *lois d'Ohm*, parce que c'est G.-S. Ohm, d'Erlangen qui les a découvertes, en partant de considérations théoriques, et les a publiées et développées, en 1827, dans son traité de la *théorie mathématique de la pile galvanique*. Ce travail présenté sous une forme trop abstraite, a d'abord été peu remarqué, et la plupart des physiciens ont hésité à entreprendre la vérification des résultats qu'il contenait. Lenz et Jacobi ont contribué surtout à le répandre. Cependant, il était encore si peu connu en France, que huit ans plus tard, Pouillet entreprenait de belles recherches sur le même sujet, et arrivait par la méthode expérimentale, à la plupart des résultats trouvés par Ohm, dont le mémoire a été plus tard sagement traduit par M. Gauguain.

Ohm s'est proposé de faire, pour la propagation de l'électricité, ce que Fourier avait fait pour celle de la chaleur. Il part de l'hypothèse de la transmission de l'électricité, de molécule à molécule, par des excès infiniment petits de *potentiel*, comme Fourier le faisait pour la chaleur se propageant de molécule à molécule par des excès de température. Aussi, cette analogie dans le point de départ apporte-t-elle de grandes ressemblances dans les méthodes analytiques employées par les deux géomètres. Ohm est arrivé ainsi à représenter l'intensité  $I$  d'un courant, par la formule  $I = E : R$  dans laquelle  $E$  représente la somme des *forces électromotrices* agissant dans le circuit, et  $R$  la somme des *résistances* qu'il oppose à la propagation de l'électricité, exprimée numériquement par la longueur réduite de toutes ses parties, y compris la pile.

Voici par quelles considérations élémentaires Ohm démontre cette formule, dans la première partie de son ouvrage; il emploie, au lieu du mot *potentiel*, celui de *tension*, qui ne doit pas être entendu dans le sens de *densité électrique*, ou pression sur l'air en un point de la surface d'un corps (1626), et que nous pouvons cependant conserver sans inconvénient, après avoir averti du sens particulier qui lui est donné par Ohm.

**2067. Formule d'Ohm.** — Considérons un circuit composé d'un couple  $P$  (fig. 1411) et d'un fil unique homogène et cylindrique  $f$ . Développons ce fil suivant une ligne droite  $AA'$ , et représentons par les ordonnées  $AB, A'B'$  les tensions égales et de signe contraire qui existent aux deux pôles de la pile. Ces tensions sont de plus en plus faibles à mesure qu'on s'éloigne des extrémités  $A, A'$ , la propagation se faisant par les excès infiniment petits de tension de chaque molécule par rapport à la suivante; et au milieu  $C$ , où se fait le passage des tensions positives aux tensions négatives, il y a une section où la tension est nulle. Il s'établit un état d'équilibre mobile dans lequel il passe à chaque instant

la même quantité d'électricité par chaque tranche ; ce qui exige que la différence de tension entre deux tranches successives soit constante dans toute la longueur du fil. On démontre, en suivant la même marche que pour la distribution des températures dans un mur (II, 956), que cette condition est remplie quand les tensions de A en C et de A' en C forment une progression arithmétique décroissante, pour des distances aux points A ou A' formant des progressions arithmétiques croissantes ; d'où il résulte que les extrémités des ordonnées représentant les tensions, forment une ligne droite BB'. — On compare le mouvement de l'électricité dans un fil à celui de la chaleur dans un mur indéfini, et non dans une barre, parce que l'électricité ne se perd pas sensiblement par la surface du fil conjonctif<sup>1</sup>.

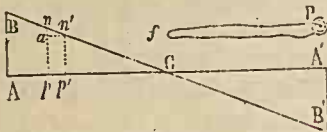


Fig. 1414.

Cela posé, considérons deux ordonnées infiniment voisines  $np$ ,  $n'p'$  ; la différence de tension des tranches qui leur correspondent est représentée par la différence constante  $na$ , qui détermine le mouvement

de fluide constituant l'électricité dynamique. On voit que ce mouvement est partout le même, mais que la tension varie d'un point à l'autre ; de même que le flux de chaleur qui traverse un mur est constant dans toute son épaisseur, tandis que la température change d'une tranche à l'autre. Quand on a  $pp' = 1$ , la différence  $na$  se nomme la *chute électrique* ; elle est égale à  $na' : an'$ , qui est évidemment égal à  $AB : AC$ , ou à  $\tan \alpha$ , en appelant  $\alpha$  l'angle BCA. Ohm admet que la quantité d'électricité qui passe par une tranche du fil, et par conséquent l'intensité du courant, est proportionnelle à la chute ; cette intensité est donc  $I = K (BA : AC)$ ,  $K$  étant une constante qui dépend de la nature et des dimensions du fil. Or,  $AC$  n'est autre chose que la moitié de la longueur  $L$  du fil conjonctif, et  $BA$  la tension aux pôles de la pile, tension que l'on peut prendre pour mesure de la force électromotrice  $E$  qui la produit, en supposant, pour le moment, que l'électricité n'éprouve aucune résistance en traversant les parties solides et liquides de la pile pour se rendre des surfaces attaquées où elle prend naissance à l'un et l'autre pôle. On a donc  $I = K (E : L)$ , ce qui montre déjà que l'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice et en raison inverse de la longueur du fil. Mais toute l'électricité qui correspond à  $AB$  ou à la force électromotrice  $E$  ne passe pas dans le fil conjonctif, celui-ci présentant une certaine résistance. Cette résistance est en raison inverse de la section  $s$  et du pouvoir conducteur  $c$  du fil (2062) ; donc, la quantité d'électricité qui passe d'une tranche à la suivante, et par conséquent l'intensité du courant, est

<sup>1</sup> Dans l'hypothèse où l'extrémité A' du circuit communiquerait avec le sol, la ligne droite BB' irait de B en A', en supposant que A soit le point de départ de l'électricité en plus, dont la tension est représentée par AB.

proportionnelle à  $sc$ . La constante  $K$  est donc égale à  $K'sc$ , et la formule devient

$$I = K'sc \frac{E}{L} \quad \text{ou} \quad I = \frac{E}{R}, \quad [1]$$

en remarquant que  $L : K'sc$  représente la résistance  $R$  du fil, d'après sa section, sa conductibilité et sa longueur. Telle est la formule d'Ohm, exprimant ce qu'il nomme la *loi fondamentale de la pile voltaïque*.

**2068. Cas d'un circuit non homogène.** — Supposons maintenant que le circuit soit composé de plusieurs fils placés à la suite les uns des autres, de longueur, de section et de nature différentes. La même quantité d'électricité devra toujours passer par toutes les sections, quelles que soient leurs positions. Mais la chute électrique, partout la même dans un même fil, sera différente d'un fil à l'autre. Comme la quantité d'électricité qui passe est en raison inverse de la résistance, il faudra nécessairement que la chute soit elle-même proportionnelle à cette résistance, et soit, comme elle, en raison inverse de la conductibilité et de la section. Par exemple, si le fil se compose de trois parties différentes  $AD, DD', D'A'$  (fig. 1412), la série des tensions sera représentée par une ligne brisée telle que  $BNN'B'$ , et les chutes électriques dans les diverses parties seront  $\tan \alpha, \tan \alpha', \tan \alpha''$ . La formule s'appliquera à ce cas, en représentant par  $R$  la somme des résistances des parties  $AD, DD', D'A'$ . — Enfin, s'il y a dans le circuit des électrolytes, des espaces à franchir sous forme d'étincelle; si la pile, comme cela a toujours lieu, présente une certaine résistance, la formule s'appliquera encore, en prenant pour  $R$  la somme de toutes les résistances du circuit, y compris la pile.



Fig. 1412.

**2069. FORMULE DES PILES.** — Il résulte de ce qui précède que l'intensité  $I$  d'un courant qui circule dans un fil conjonctif homogène de longueur  $L$ , peut être représentée par la formule

$$I = \frac{E}{L + r}, \quad [2]$$

en désignant par  $r$  la longueur de fil dont la résistance équivaut à celle de la pile, ou sa *longueur réduite* (2065), et par  $E$  la *force électromotrice*, représentée par la tension aux pôles quand le circuit est ouvert. On voit que, si la résistance de la pile est insensible, comme pour les couples thermo-électriques à grande section, on a  $I = E : L$ , c'est-à-dire que l'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du fil homogène. Si, au contraire, la pile présente une résistance sensible, comme les piles hydro-électriques, l'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du fil, augmentée d'une quantité constante  $r$ ,

qui représente la résistance particulière de la pile. Cet énoncé s'applique aussi au cas où il y a plusieurs résistances différentes interposées dans le fil conjonctif; L exprimant alors la somme des longueurs réduites qui équivalent à ces résistances.

**Intensité donnée par plusieurs couples.** — Supposons que dans la formule [2],  $E$  et  $r$  soient la force électromotrice et la résistance d'un seul couple,  $L$  et  $r$  étant toujours exprimés en longueurs réduites; et considérons plusieurs couples réunis les uns à la suite des autres. Ohm admet que chacun d'eux produit un courant qui traverse la pile, comme si ce couple était seul; de manière que la force électromotrice, ou la tension aux pôles qui la mesure, serait la somme  $\Sigma E = E + E' + E'' \dots$  des forces électromotrices de ces couples. En outre, le courant produit par chaque couple ayant à traverser tous les autres, trouvera une résistance égale à la somme  $\Sigma r = r + r' + r'' \dots$  des résistances de chacun d'eux; on aura donc :

$$[3] \quad I = \frac{E + E' + \dots}{L + r + r' + \dots} = \frac{\Sigma E}{L + \Sigma r}; \text{ qui devient } I = \frac{nE}{L + nr} \quad [4]$$

quand il y a  $n$  couples égaux. Ces formules expriment que l'intensité du courant est proportionnelle à la somme des forces électromotrices des couples, et en raison inverse de la résistance *totale* du circuit, y compris la pile.

**2070. Discussion.** — La formule [4] montre que : 1° l'intensité du courant augmente avec le nombre des couples; car, en divisant les deux termes par  $n$ , on voit que la valeur de  $I$  croît en même temps que  $n$ . — 2° L'augmentation est d'autant plus sensible que  $L$  est plus grand par rapport à  $r$ , c'est-à-dire que la partie extérieure du circuit présente plus de résistance, car alors les variations du terme  $L : n$  sont elles-mêmes plus grandes, quand  $n$  varie, et l'intensité du courant change beaucoup avec le nombre des couples. — 3° S'il

n'y a pas de résistance extérieure, on a  $L = 0$ , et  $I = \frac{nE}{nr} = \frac{E}{r}$ . L'intensité est donc la même qu'avec un seul couple; ce que nous avons déjà déduit de considérations toutes différentes (1846, 1996). — 4° L'intensité reste la même, quand chaque couple que l'on ajoute est accompagné d'une résistance extérieure égale à  $L$ , ou, en d'autres termes, quand la résistance augmente proportionnel-

lement au nombre des couples; car la formule est alors  $I = \frac{nE}{nL + nr} = \frac{E}{L + r}$ .

— 5° Si  $L$  est très-grand,  $I$  est très-petit, à moins que  $n$  ne soit aussi très-grand; ce qui montre qu'il faut employer un grand nombre de couples quand on a de grandes résistances à vaincre, comme dans l'électrolyse des corps peu conducteurs, dans la production de l'arc voltaïque, etc.

Si, au lieu de réunir plusieurs couples les uns à la suite des autres, on en réunit un nombre  $m$  par les pôles de même nom, de manière à former un couple unique, sa résistance est  $r : m$ , la section étant  $m$  fois plus grande (2064) et la formule devient  $I = E : \left( L + \frac{r}{m} \right)$ . On voit que si  $L$  est très-grand,

l'intensité augmente à peine avec  $m$ ; mais s'il est très-petit, l'intensité s'accroît notablement, et est proportionnelle à la surface du couple quand  $L$  est négligeable; ce que nous savions déjà (1996).

Supposons enfin que l'on augmente en même temps le nombre  $n$  et l'étendue  $m$  des éléments, on aura

$$I = \frac{nE}{L + \frac{nr}{m}} = \frac{E}{\frac{L}{n} + \frac{r}{m}} \quad [5]$$

formule qui montre que, en augmentant le nombre des éléments, on produit le même effet que si l'on diminuait dans le même rapport la résistance du circuit extérieur; et que, augmenter leur surface, revient à diminuer la résistance de la pile. Si  $L$  est très-grand, il y a avantage à réunir les couples les uns à la suite des autres, et s'il est très-petit, il est préférable de les réunir pôle à pôle, de manière à former des couples à grande surface.

**2071. Application aux rhéomètres.** — Quand on introduit un rhéomètre multiplicateur dans un circuit, le fil de l'instrument ajoute sa résistance à celle du circuit, et le courant s'affaiblit, et d'autant plus que ce fil est plus fin et plus long. Quoique l'action sur l'aiguille soit répétée autant de fois qu'il y a de tours, il peut donc arriver, si la résistance primitive du circuit est faible, que cette aiguille soit moins déviée que si le courant ne l'entourait qu'une fois. Il ne faut donc employer un multiplicateur à grand nombre de tours qu'autant que le circuit extérieur est très-résistant. — En effet, soit  $I$  l'intensité d'un courant,  $I'$  celle qu'il présente quand on interpose un multiplicateur à  $m$  tours;  $I$  et  $I'$  étant donnés par un rhéomètre à un seul tour de fil emprunté au circuit primitif. Soit aussi  $L$  la longueur réduite qui représente la résistance primitive totale du circuit, et  $l$  la longueur réduite d'un tour du rhéomètre. Quand cet instrument sera introduit, la longueur totale du circuit sera  $L + ml$ , et l'on aura  $(L + ml)I' = L \times I$ .  $M$  représentant l'action du multiplicateur sur son aiguille, supposons qu'on ait  $M = mI'$ ; en remplaçant  $I'$  par sa valeur, il viendra

$$M = mI \frac{L}{L + ml} = mI \frac{1}{1 + \frac{ml}{L}}$$

Si  $L$  est très-grand par rapport à  $ml$ , par exemple quand le circuit contient une pile hydro-électrique,  $(ml : L)$  est négligeable devant 1, et il vient  $M = mI$ . Le rhéomètre donne alors des intensités proportionnelles au nombre de tours, et sa sensibilité est maximum. Si  $(ml : L)$  n'est pas négligeable, la valeur de  $M$  s'abaisse au-dessous de  $mI$ , à mesure que le nombre  $m$  de tours augmente. Ce qui ne veut pas dire que la sensibilité diminue; car  $M$ , au-dessous de son maximum  $mI$ , peut avoir une valeur supérieure à celle qui correspondrait à un moindre nombre de tours, quoique celle-ci s'approche davantage de son

maximum. Si  $l$  augmente, c'est-à-dire si la résistance qui correspond à chaque tour augmente,  $M$  diminue, et d'autant plus que  $L$  est plus petit. Si  $L$  est assez petit pour être négligé devant  $ml$ , on aura sensiblement  $M = I(L : l)$ ; la sensibilité sera donc en raison inverse de  $l$ , et indépendante du nombre de tours. En effet, le circuit n'étant alors formé que du fil du rhéomètre, l'intensité du courant varie en raison inverse, et l'action sur l'aiguille, en raison directe de sa longueur, en supposant que tous les tours agissent de la même manière. Il résulte de là qu'il faudra employer un fil gros faisant peu de tours, quand on aura affaire à une pile à faible résistance, on voit aussi qu'il faut toujours, dans une même série d'expériences, se servir du même rhéomètre.

**2072, COURANTS DÉRIVÉS.** — Si l'on joint par un fil métallique  $ab$  (fig. 1413) deux points  $a, b$  d'un autre fil parcouru par un courant, ce courant se divise aux points de jonction; la partie qui passe dans le fil  $ab$  se nomme *courant dérivé*, et ce fil, *fil de dérivation*. Le fil  $mabn$  est le *circuit principal*, et  $ab$ , *l'intervalle de dérivation*. Il est évident que le courant en  $ab$  sera moins intense que dans les autres parties du circuit principal, mais on voit aussi que le courant primitif sera augmenté en dehors des points  $a$  et  $b$ , la présence du fil de dérivation diminuant la résistance du circuit total entre ces deux points. Nous allons chercher d'après Pouillet, en partant des conditions du courant primitif,

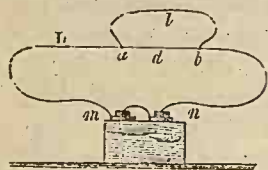


Fig. 1413.

les valeurs du courant dérivé, du courant dans l'intervalle  $ab$ , et du courant principal dans les parties qui sont en dehors des points de dérivation.

Soit  $I$  l'intensité du courant primitif, et  $L$ , la longueur réduite de toutes ses parties, y compris la pile  $mn$ ;  $I'$  son intensité après l'addition du fil de dérivation;  $i$  l'intensité dans l'espace  $ab = d$ ; et enfin  $D$  l'intensité du courant dérivé et  $l$  sa longueur réduite, c'est-à-dire la

longueur qu'il aurait s'il avait la même section  $s$  et la même conductibilité que le fil auquel on rapporte les longueurs réduites. Au lieu du fil de longueur  $l$ , nous pourrions prendre un fil de longueur  $d$ , à la condition de lui donner une section  $s'$  telle que l'on ait  $ds = ls'$  (2065). On peut alors considérer les points  $a, b$  comme réunis par deux fils de même longueur  $d$ , et ayant pour sections  $s$  et  $s' = sd : l$ , ou par un seul fil de section  $s + s' = \frac{s(l+d)}{l}$ . Ce fil de longueur  $d$  revient lui-même à un fil unique de section  $s$  et de longueur  $x$  moindre et telle que l'on ait  $x(s + s') = sd$ , d'où  $x = \frac{sd}{s + s'} = \frac{ld}{l + d}$ . On peut donc, au lieu des deux fils qui joignent les points  $a$  et  $b$  du circuit principal, considérer un fil unique de longueur  $x$  plus petite que  $ab$ , ce qui diminue la longueur  $L$  de ce circuit, de la quantité  $d - x$ . L'intensité du courant primitif sera donc



augmentée, et sera donnée par la proportion  $I' : I = L : L - (d - x)$ ; d'où, en remplaçant  $x$  par sa valeur

$$I' = I \frac{L}{L + x - d} = I \frac{(l + d)L}{(l + d)L - d^2}. \quad [1]$$

Pour obtenir les intensités  $i$  et  $D$  du courant en  $ab$  et du courant dérivé, remarquons que ces intensités ont une somme égale à  $I'$ , et qu'elles sont entre elles comme les sections  $s$  et  $s' = sd : l$  qu'auraient les deux fils sous la même longueur  $d$ ; on a donc  $i + D = I'$ , et  $Dl = di$ . Tirant  $i$  et  $D$  de ces deux équations, et remplaçant  $I'$  par sa valeur [1], il vient :

$$i = I \frac{Ll}{(l + d)L - d^2}, \quad \text{et } D = \frac{Ld}{(l + d)L - d^2} \quad [2]$$

valeurs qui sont entre elles en raison inverse des longueurs réduites  $d$  et  $l$  qui leur correspondent. On voit aussi que l'intensité  $D$  du courant dérivé est proportionnelle à la distance de dérivation  $d$ .

**Discussion.** — Si les longueurs réduites  $d$  et  $l$  étaient égales, le courant devrait se partager également entre les deux fils  $ab$ ,  $alb$ , avec l'intensité  $\frac{1}{2} I'$ . En effet, si l'on remplace  $l$  par  $d$ , il vient

$$I' = I \frac{2L}{2L - d}, \quad \text{et } i = D = I \frac{L}{2L - d} = \frac{1}{2} I'. \quad [3]$$

On peut trouver la première valeur directement, en remarquant que, introduire le fil  $l$  égal à  $d$ , revient à diminuer de moitié la distance  $d$ , ou à remplacer  $L$  par  $L - \frac{1}{2} d$ . — Si nous supposons  $d$  très-petit par rapport à  $L$ , en divisant par  $L$  les deux termes des valeurs de  $I'$ ,  $i$  et  $D$ , et négligeant  $d^2 : L$ , il vient  $I' = I$ ,  $i = I \frac{l}{l + d}$ ,  $D = I \frac{d}{l + d}$ . Le courant primitif n'est donc pas sensiblement altéré, et les rapports de  $i$  et de  $D$  restent les mêmes. Si, de plus  $d$  étant nul, les points de dérivation se confondent, il vient  $I' = I$ ,  $i = I$ ,  $D = 0$ ; ce qu'il était facile de prévoir.

Supposons maintenant que les points de dérivation soient aux pôles mêmes de la pile, et séparons la longueur réduite  $r$ , qui correspond à la pile, de la longueur totale  $L$ . Alors la résistance du circuit extérieur seul sera représentée par  $L - r$ , nous aurons  $d = L - r$ , et les formules [1] et [2] deviendront

$$[4] \quad I' = I \frac{(l + L - r)L}{(L - r)r + Ll}, \quad i = I \frac{Ll}{(L - r)r + Ll}, \quad D = I \frac{L(L - r)}{(L - r)r + Ll}$$

$I'$  est, dans ce cas, l'intensité dans la pile,  $i$  et  $D$  les intensités dans les deux fils qui joignent ses pôles. — Si la pile n'offrant pas de résistance, on a  $r = 0$ , il vient  $I' = I \frac{L + l}{l}$ ,  $i = I$ , et  $D = \frac{l}{l}$ . Ainsi le courant n'est pas modifié dans le circuit primitif  $d$ , mais il passe en outre, dans le fil de dérivation, un

courant d'intensité en raison inverse de sa longueur  $l$ , ce qui fait que l'intensité du courant dans la pile est modifiée.

Considérons enfin le cas où, les points de dérivation étant aux pôles, on a  $l = d = L - r$ ; il vient, en remplaçant  $l$ , dans [4], ou  $d$ , dans [3], par  $L - r$

$$I' = I \frac{2L}{L+r}, \quad i = D = I \frac{L}{L+r}.$$

Si en même temps on a  $r = 0$ , il vient  $I' = 2I$ ,  $i = D = I$ , résultats faciles à interpréter, et qu'on pourrait trouver directement. Pouillet a vérifié la plupart de ces résultats par l'expérience.

**2073. Cas de plus de deux points de dérivation.** — Dans ce qui précède, il n'est question que de deux points de dérivation. Quand il y en a davantage le problème est plus compliqué. M. Weber a donné des formules pour le résoudre, et M. Kirchhoff est arrivé au même but, en s'appuyant sur les deux principes suivants : 1° Quand un courant se subdivise, la somme des intensités dans les parties séparées est égale à l'intensité dans la partie non divisée. Si donc on prend positivement un courant marchant vers un point, et négativement celui qui s'en éloigne, la somme algébrique des intensités des courants au point de division est nulle, ce qu'on exprime par l'équation  $\Sigma I = 0$ . — 2° Dans la formule  $I = E : R$ , la force électromotrice  $E$  n'est autre chose que la différence des potentiels aux extrémités du circuit, différence égale à  $ir$  en supposant un seul fil de résistance  $r$ , et égale à  $ir + i'r' + i''r'' + \dots$ , s'il y a plusieurs fils les uns à la suite des autres parcourus par des courants d'intensités  $i, i', i'' \dots$ . On aura donc  $\Sigma ir = E$ . Les relations  $\Sigma I = 0$  et  $\Sigma ir = E$ , ou *lois de Kirchhoff*, fourniront autant d'équations que d'inconnues, pour résoudre les problèmes les plus compliqués<sup>1</sup>.

**2074. Vérifications expérimentales des lois d'Ohm.** — Les formules d'Ohm étant basées sur des considérations théoriques en partie hypothétiques, il était important de les vérifier par l'expérience. C'est ce qu'ont fait plusieurs physiciens. Dès 1826, Ohm avait soumis la formule  $I = A : (L + r)$  au contrôle de l'expérience, au moyen d'une pile thermo-électrique, dont les soudures alternatives étaient à 0° et à 100°. L'intensité du courant était mesurée par la torsion du fil de suspension d'une aiguille aimantée, maintenue dans la direction du courant. Pour chacune des longueurs du fil conjonctif on commençait par calculer les constantes  $A$  et  $r$ . Pour cela on observait deux valeurs,  $I_1 = A : (L + r)$ ,  $I_2 = A : (L' + r)$  et l'on tirait les valeurs de  $A$  et de  $r$ , qu'on portait dans la formule générale. Voici quelques nombres trouvés par ce moyen :

Longueur des fils en pous. . . . .	2	4	6	10	18	34	66	130
Valeurs de $I$ , par expérience. . . . .	305	282	258,25	223,5	178	124,75	78	44
Id. déduites de la formule. . . . .	305,5	280,5	259	224,75	177,75	125,5	79	45

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 493 et 4<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 446.

Les résultats consignés dans les deux dernières lignes présentent un accord satisfaisant, eu égard aux difficultés de ces sortes d'expériences.

Ohm n'avait guère expérimenté qu'avec des piles thermo-électriques, lorsque, en 1831, M. Fechner publia sous le titre : *Résultats numériques d'observations de la pile galvanique*, un grand travail expérimental dans lequel il a vérifié les lois d'Ohm et les formules des piles. Les constantes étaient déterminées dans chaque cas, en donnant différentes valeurs aux dimensions du circuit extérieur, et au nombre des couples, et mesurant l'intensité du courant par la méthode des oscillations (2052). Il a aussi retrouvé par l'expérience les propriétés des courants dérivés, et son travail constitue un ensemble tellement remarquable que les lois d'Ohm sont quelquefois désignées sous le nom de *lois de Fechner*. Ces expériences présentaient de grandes difficultés, les piles à courant constant n'étant pas alors connues. M. Fechner attendait que la pile, dont il maintenait le circuit fermé, se fût affaiblie, afin que la diminution d'intensité ne fût plus sensible (1852), et il employait la méthode des alternatives. M. Lenz et Jacobi ont aussi vérifié les lois d'Ohm, par des méthodes analogues.

Vers 1838, Pouillet trouvait, de son côté, comme nous l'avons dit (2066) les lois des intensités des courants, par la méthode expérimentale. Il reconnut d'abord que l'intensité du courant d'un couple thermo-électrique, dont la résistance est négligeable, est en raison inverse de la longueur du fil interpolaire. Il opéra ensuite sur un couple constant de Daniell, et trouva que l'intensité est en raison inverse de la longueur du fil interpolaire, *augmentée d'une quantité constante*. Il observait d'abord l'intensité du courant quand il passait dans une boussole des tangentes, puis il ajoutait successivement des paquets de fils de longueur connue,  $L, L', L'' \dots$ . Supposant ensuite que les longueurs réelles du circuit étaient  $x, L + x, L' + x, L'' + x \dots$ , il déterminait  $x$  au moyen de deux observations *quelconques*, en écrivant que les intensités sont entre elles comme ces dernières longueurs. Or, la valeur de  $x$  était toujours la même, quelles que fussent les deux longueurs de fil interposées successivement;  $x$  représentait donc la résistance propre du couple et de la boussole des tangentes, exprimée en longueur de fil de même espèce que le fil interpolaire. Pouillet a aussi trouvé les formules des piles, et a constaté qu'un seul couple donne un courant aussi intense que plusieurs couples placés les uns à la suite des autres, quand ce courant ne traverse qu'une boussole des tangentes à résistance négligeable. Il a encore trouvé et vérifié par de nombreuses expériences les formules des courants dérivés<sup>1</sup>.

La loi de la pile suppose que sa résistance intérieure reste la même, quelle que soit l'intensité du courant. Or, cette résistance est compliquée par celle du passage de l'électricité, des lames métalliques aux liquides, et réciproquement (1933). D'après M. Marié-Davy, cette dernière résistance varierait avec

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. IV, p. 257.

l'intensité du courant, et, par suite, la formule des piles, telle qu'elle a été établie par Ohm, Fechner, Pouillet..., ne serait pas tout à fait exacte; conclusion à laquelle ont aussi conduit des observations directes<sup>1</sup>. Ces résultats ayant motivé certains doutes, Despretz a soumis de nouveau la formule des piles au contrôle de l'expérience, en s'entourant de précautions minutieuses<sup>2</sup>. Il mesurait les intensités des courants d'une pile de Daniell, au moyen de la boussole des tangentes, et calculait la résistance en comparant l'intensité  $I$  dans le circuit composé de la pile et de la boussole seulement, à l'intensité  $i$ , après l'introduction d'un fil additionnel de longueur  $l$ . Si  $R$  est la résistance de la pile et de la boussole réunies, on a  $I : i = R + l : R$ ; d'où  $R = \frac{il}{I - i}$ . La moyenne des valeurs de  $R$  obtenues avec un fil de 80<sup>m</sup> s'est trouvée constamment supérieure de  $\frac{4}{439} = 0,0071$ , à la moyenne des valeurs obtenues avec un fil de 10<sup>m</sup>. Ainsi, la résistance est un peu plus grande avec le courant le plus fort. Despretz attribue cette différence à l'empatement du zinc de la pile par le sulfate, qui ne se dissout pas immédiatement, et forme une couche d'autant plus épaisse qu'elle se forme plus rapidement, c'est-à-dire que le courant est plus intense. C'est pour cela que les piles très-énergiques augmentent d'intensité par la rupture du circuit, qui laisse au sulfate de zinc le temps de se dissoudre. Despretz a conclu de ses recherches que l'intensité d'un courant est bien en raison inverse de la résistance totale du circuit, mais que la constance de la résistance de la pile peut ne pas se vérifier rigoureusement dans les fortes piles, à cause de l'empatement du zinc. Les lois d'Ohm sont donc exactes en elles-mêmes; mais il faut, pour les vérifier, écarter toutes les causes accidentelles qui peuvent les masquer. Du reste, ces lois ont trouvé une nouvelle confirmation dans les expériences suivantes sur la chute électrique et sur la distribution des tensions dans le fil conjonctif.

**2075. Vérification de la loi des tensions dans le fil conjonctif<sup>3</sup>.** — M. Kohlrausch, en 1853, a comparé directement les tensions aux différents points d'un fil conjonctif. Il se servait d'un condensateur à lame d'air dont l'épaisseur, très-petite, était limitée par trois petits amas de gomme laque. Une fois le condensateur chargé, il enlevait un des plateaux et mettait l'autre en communication avec un électromètre de torsion analogue à celui de Peltier (1673), dont l'aiguille était suspendue à un fil de verre.

M. Kohlrausch a d'abord vérifié que la tension aux pôles de la pile est proportionnelle à la force électromotrice  $E$  de la formule d'Ohm. Pour cela, il réunissait les pôles par un fil conjonctif; puis, au bout de quelque temps, il rompait le circuit et mettait les deux bouts du fil en communication avec les deux plateaux du condensateur; celui-ci se chargeait aussitôt au maximum, et il mesurait la

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 440, et t. XXII, p. 401.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXIV, p. 781.

<sup>3</sup> *Bibl. de Genève (Arch. des sc.)*, t. XXII, et *Ann. de ch. et de phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XII.

charge avec l'électromètre. La force électromotrice était évaluée par la méthode de Wheatstone, décrite plus loin (2100). Voici quelques résultats :

Nature des couples..	Zinc et platine.	Zinc et charbon.	Zinc et cuivre.	Argent et cuivre.
Force électromotrice.	28,22	26,29	18,81	14,08
Tension aux pôles...	28,22	26,15	18,88	14,29

Le cuivre et le zinc étaient plongés dans une solution de sulfate du même métal; le platine ou le charbon, dans l'acide nitrique; et l'argent, dans une solution de sel marin. On peut conclure de ces résultats que *la force électromotrice est proportionnelle à la tension aux deux extrémités du fil d'un circuit, au moment où il vient d'être rompu.*

Pour étudier les tensions aux divers points du circuit *fermé*, le même physicien fit communiquer avec le sol un point de ce circuit; puis, avec le condensateur, deux points placés à égale distance du premier, et il mesura les tensions à ces deux points. Ces tensions étaient égales, produites par des électricités contraires, et proportionnelles aux distances des deux points. — Dans une seconde série d'expériences, deux fils d'argent de diamètre différent, ou deux fils de même diamètre et de nature différente, furent soudés l'un au bout de l'autre; le point de jonction communiquant avec le sol, les tensions à égale distance de ce point furent en raison inverse des sections ou des conductibilités, et, par conséquent, en raison directe des résistances spécifiques des fils. Des expériences analogues, faites sur des liquides, ont donné des résultats semblables.

On peut calculer facilement, au moyen de la construction d'Ohm (2067), l'état de tension de chaque point du circuit. Considérons un fil rhéophore communiquant par un bout avec le sol, et par l'autre avec le pôle positif d'une pile constante, et supposons que ce fil forme le côté horizontal d'un triangle rectangle dont l'autre côté de l'angle droit représente la force électromotrice de la pile. Une ordonnée élevée d'un point du fil jusqu'à l'hypothénuse représentera la tension en ce point, et on pourra la calculer par une simple proportion en fonction de la distance du point à l'extrémité, de la longueur du fil, et de la force électromotrice. Les résultats ainsi calculés ont été comparés à ceux que donne l'expérience, de la manière suivante :

Un fil métallique très-long communique, au moyen d'une lame de cuivre, avec une auge remplie d'une solution de sulfate de cuivre, dans laquelle est un vase poreux plein d'une solution de sulfate de zinc, contenant une lame de zinc, de manière à former un couple de Daniell. Le point communiquant avec le sol était au pôle négatif, sur le zinc. Les points successivement explorés au moyen du condensateur, furent d'abord 3 points, 1, 2, 3, pris sur le fil, à des distances croissantes de la lame de zinc, puis le point de jonction, 4, du fil avec la lame de cuivre; enfin, 3 points, 5, 6, 7, pris dans le sulfate de cuivre à des distances

de 2,02, 4,02, 8 pouces de cette lame. Dans le tableau suivant, la seconde ligne représente les distances,  $D$ , des points touchés à la lame de zinc.

Points touchés.. . . .	1	2	3	4	5	6	7	8
Valeurs de $D$ .. . . .	118,5	237	355,5	474	610,3	745,3	879	1014
Tensions calculées.. . . .	0,93	1,86	2,89	3,73	4,80	5,86	6,91	7,98
Tensions observées.. . . .	0,85	1,85	2,69	3,70	5,03	5,99	6,93	7,96

L'accord entre les deux dernières lignes ne pouvait être plus satisfaisant, en égard aux incertitudes que comporte la mesure des tensions.

M. L. Clarke a vérifié la loi des tensions par la méthode suivante : Un long fil communique par un bout avec le sol, et par l'autre avec le pôle *positif* d'une pile dont le pôle négatif est joint au sol ; on fait communiquer le point dont on veut évaluer la tension, au pôle *positif* d'une pile auxiliaire ou d'épreuve, par un fil contenant un rhéomètre. Le pôle négatif de cette seconde pile communique avec la terre. Si le potentiel au point considéré est plus grand ou plus faible que celui de la pile d'épreuve, on le reconnaîtra à la déviation du rhéomètre. Si l'aiguille aimantée de cet instrument reste en repos, c'est que le potentiel cherché est égal à celui de la pile auxiliaire. — On prend d'abord pour celle-ci un couple de Daniell chargé d'eau, pour qu'il soit bien constant, et on le fait communiquer avec un point du fil, placé à une distance,  $D$ , de l'extrémité jointe au sol telle que le rhéomètre reste au zéro. On trouve ensuite que, pour des points situés à des distances  $2D$ ,  $3D$ ,  $4D$ ... l'aiguille reste encore au zéro si l'on compose la pile d'épreuve de 2, 3, 4... couples égaux au premier. M. N. Breguet a disposé un appareil au moyen duquel l'expérience se fait facilement et rapidement.

Il résulte des expériences que nous venons de décrire, que les formules d'Ohm sont vérifiées par l'expérience, ce qui justifie les hypothèses au moyen desquelles on les a établies.

**2076. Tensions aux différents points d'une plaque.** — Les expériences qui précèdent sont relatives à l'état des tensions dans un conducteur linéaire. M. Kirchhoff a soumis les hypothèses d'Ohm à l'épreuve, dans le cas où le conducteur est une large lame, d'épaisseur négligeable<sup>1</sup>. Il a déterminé par le calcul, l'état stationnaire des tensions aux différents points de la plaque, et cherché la forme des *courbes d'égale tension* (analogues aux lignes isothermes pour la chaleur), en s'appuyant sur cette condition, conséquence immédiate du principe d'Ohm (2066), qu'il n'y a aucun mouvement d'électricité d'un point à l'autre de chacune de ces courbes, et que l'électricité se meut dans une direction qui leur est toujours normale. — Dans le cas d'une plaque indéfinie ou limitée par une courbe d'égale tension, dans laquelle les électricités arrivent en deux points, les courbes d'égale tension sont des circonférences ayant leur centre sur la ligne qui joint les électrodes, et auxquelles sont normales toutes les circonférences qu'on peut faire passer par les électrodes. Ces résultats ont été vérifiés

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XL, p. 445, et t. XLI, p. 496.

sur un disque de cuivre de 33<sup>cm</sup> de diamètre dans lequel les électricités pénétraient par deux points du contour, en appuyant en deux points les bouts du fil d'un rhéomètre, dont l'aiguille n'était pas déviée quand ces points appartenait à une même courbe. M. Kirchoff a aussi calculé l'expression analytique des tensions aux divers points, ainsi que les déviations d'une aiguille aimantée placée très-près du disque rhéophore, et a vérifié les résultats par l'expérience.

M. Kirchoff n'a considéré que des plaques circulaires. M. G. Quincke a examiné deux cas plus compliqués : 1° celui d'une plaque carrée dans laquelle les électrodes communiquent avec un point et avec l'extrémité d'une diagonale ; 2° celui d'un disque dont une moitié était en plomb et l'autre en cuivre, l'électricité arrivant par deux points pris sur le même métal à égale distance du diamètre de soudure. Les résultats de l'expérience ont toujours été d'accord avec ceux du calcul. — Nous ajouterons enfin que M. Smaasen, en 1846, a traité par le calcul le cas général de la propagation dans un conducteur à trois dimensions<sup>1</sup>.

**2077. Vérifications avec l'électricité de frottement.** — Les lois d'Ohm n'avaient été vérifiées que sur des circuits bon conducteurs, et avec l'électricité des piles. Il était important de les vérifier sur l'électricité de frottement, qui tend, dans l'état de repos, à se porter à la surface des corps, en la faisant écouler lentement dans le sol par un conducteur médiocre, comme un fil de coton, un ruban de soie, une colonne d'huile, etc. C'est ce qu'a fait M. Gauguin par deux méthodes différentes<sup>2</sup>, et il a reconnu que les lois d'Ohm s'appliquent encore ; ce qui prouve qu'il n'y a qu'un seul mode de propagation de l'électricité, du moins dans les rhéophores étroits.

La première méthode consistait à mesurer le temps pendant lequel l'électricité devait s'écouler par un fil de coton, pour que la tension du corps électrisé diminuât d'une quantité donnée. L'appareil était celui qui avait servi à étudier l'état variable (2041). Quand le fil, aboutissant au sol, avait pris l'état définitif, on observait dans chaque cas, le temps que mettaient les feuilles d'or de l'électromètre à passer d'un écart de 20°, à 17°, et la quantité d'électricité écoulee en une seconde était en raison inverse de ce temps, temps qui était en outre proportionnel à la longueur du fil de coton communiquant avec le sol. — Il faut supposer qu'il n'y a pas de perte par l'air ; ce que l'on peut admettre quand l'écoulement est rapide et la tension faible.

Dans la seconde méthode, on faisait aboutir le fil de coton au bouton d'un électromètre de décharge (1662), et l'on maintenait constante la charge du réservoir, ou l'écart des feuilles du premier électroscope, en lui fournissant de l'électricité au moyen d'une aiguille isolée, qui la puisait sur un électrophore. Le flux électrique serait proportionnel au nombre de décharges de l'électromètre par minute, si sa tension moyenne était indépendante du rapprochement

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XLV, p. 203, et t. XL, p. 236.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIX, p. 5.

de ces décharges, ce qui n'est pas évident. C'est pourquoi M. Gaugain s'est arrangé de manière à avoir toujours des décharges de même rapidité. Il fit d'abord communiquer les électroscopes par un fil de coton de 1<sup>m</sup>,64 de longueur, puis par deux fils de même grosseur et de longueur double, et il vit que la rapidité des décharges n'était pas changée. Chaque fil de longueur double laissait donc passer la moitié du flux électrique que laissait passer le fil de 1<sup>m</sup>,64. — Quand la tension du réservoir était réduite de moitié, la rapidité des décharges avec deux fils de 1<sup>m</sup>,64 restait encore la même; ce qui prouve que l'écoulement est proportionnel à la tension, la quantité d'électricité absorbée par l'électromètre de décharge étant supposée négligeable.

Pour vérifier la loi des tensions aux divers points du fil joint au sol, on place en son milieu un second électroscope identique au premier, et donnant un écart moindre  $d$ , qui correspond à une tension *moitié moindre*; car en rétablissant la tension du premier instrument, déchargeant le second, et faisant toucher leurs boutons, on reconnaît qu'ils se partagent la charge et que chacun présente l'écart  $d$ .

M. Gaugain a reconnu que plusieurs fils de coton égaux donnent le même nombre de décharges quand ils sont serrés en faisceau, ou écartés les uns des autres, et qu'il en est de même d'un ruban de soie étendu ou roulé en tube; vérifiant ainsi que la résistance ne dépend pas des surfaces, mais seulement de la section, à laquelle elle est inversement proportionnelle, comme pour les fils métalliques. Des expériences faites sur des colonnes d'huile contenues dans des auges de gomme laque, ont conduit aux mêmes résultats.

**2078. Charge dynamique.** — La loi qui précède prouve que le mouvement électrique se fait également par tous les points de la section. Cependant une certaine quantité d'électricité se porte à la surface, en produisant une tension pouvant se manifester par des attractions et répulsions. Pour montrer l'existence de cette *charge dynamique*, ainsi qu'il l'appelle, M. Gaugain sépare brusquement le fil, de son électromètre, au moment d'une décharge, puis il sépare ce fil du réservoir d'électricité, le fait de nouveau communiquer avec le réservoir de décharge, et évalue la charge qui lui restait, par les décharges qu'il donne en perdant l'électricité qu'il avait conservée. Il a trouvé ainsi, que cette charge, à section égale, dépend de la surface, et qu'elle est la moitié de la *charge statique*, c'est-à-dire de celle que prendrait le fil, si, étant isolé, il restait en communication avec le réservoir d'électricité. Il résulte de là qu'on ne peut dire que le flux électrique est rigoureusement le même dans tous les points de la section; mais pour les conducteurs même médiocres et pour les faibles tensions des piles qui n'ont pas un très-grand nombre d'éléments, l'influence de la *charge dynamique* est assez faible pour que les résultats paraissent les mêmes que si elle n'existait pas.



## § 3. MESURE DES CONDUCTIBILITÉS.

## I. Conductibilité des solides.

**2079. Constantes des piles.** — Les formules d'Olm contiennent deux constantes : la *force électromotrice* de la pile qui fournit le courant, et la résistance des différentes parties du circuit, résistance qui dépend elle-même des dimensions de ses différentes parties et de leur *conductibilité*. Quand on veut employer les formules des courants, il faut avant tout connaître les valeurs de ces constantes. Nous allons nous occuper d'abord des *conductibilités*.

Les premières recherches sur les conductibilités des fils métalliques ont été faites par Van Marum et Priestsley, puis par M. Harris et M. Riess, en comparant les longueurs de fils qui pouvaient être fondues par la décharge d'une batterie (1707). Mais cette méthode suppose que l'*échauffement* des fils est en raison inverse de leur conductibilité ; principe qui ne peut être démontré qu'après qu'on a mesuré cette conductibilité : il y a donc cercle vicieux. Heureusement qu'on peut se passer des effets calorifiques, en employant les courants voltaïques. Avant de faire connaître les méthodes employées par divers physiciens, nous allons décrire certains appareils dont on fait fréquemment usage dans ces sortes de recherches.

**2080. Rhéostats.**

Quand on veut évaluer les conductibilités et les forces électromotrices, on a à comparer les intensités de courants successifs, au moyen de rhéomètres ; les incertitudes que comporte l'usage de ces instruments ont conduit à se passer de mesurer les déviations de l'aiguille, en introduisant dans le circuit la résistance, facile à calculer, d'un fil métallique dont on fait varier la longueur de manière à toujours ramener l'aiguille à la même position. Poggendorff, Jacobi et Wheatstone ont, les premiers, imaginé pour cela des instruments, que Jacobi a nommés *volta-gomètres*, ou simplement *gomètres* ; Wheatstone, *rhéostats*, et M. Marié-Davy, *empodiomètres*.

La figure 1414 représente le rhéostat de Wheatstone : Sur un cylindre de bois ou de verre *aa'* est creusée une rainure en hélice, au fond de laquelle s'enroule un fil fin de cuivre, soudé par un bout à un anneau adapté à la base du cylindre. L'autre bout du fil est fixé à un second cylindre *cc'*, en laiton, parallèle

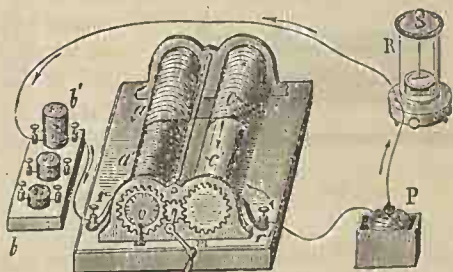


Fig. 1414.

au premier, et pouvant tourner dans le même sens et avec la même vitesse, sous l'action d'une manivelle  $m$  et d'un engrenage, de manière que le fil abandonne l'un des cylindres, pendant qu'il s'enroule sur l'autre. Le nombre de tours et de fractions de tours est indiqué par l'index fixe  $o$ .

Pour introduire l'appareil dans un circuit, on fait communiquer les fils de ce dernier avec des ressorts  $r, r'$ , qui s'appuient, l'un,  $r'$ , sur le cylindre de laiton, l'autre,  $r$ , sur l'anneau du cylindre de bois. Le courant parcourt alors tous les tours du fil du rhéostat dans la portion  $a'$  qui se trouve sur le cylindre de bois, passe de là au cylindre de laiton, qu'il traverse directement, et arrive au ressort  $r'$ . Plus il y aura de fil enroulé sur le cylindre de bois, plus sera grande la longueur de fil introduite dans le circuit par le rhéostat, et l'on pourra, en faisant varier cette longueur, amener l'aiguille d'un rhéomètre  $R$  dans une position déterminée. — Quand la résistance à introduire dépasse les limites du rhéostat, on interpose, en outre, dans le circuit, une ou plusieurs bobines,  $bb'$ , de fils de cuivre dont les résistances sont connues.

Dans le rhéostat précédent, le mauvais contact du fil avec le cylindre métallique peut occasionner des erreurs. Cet inconvénient n'existe pas dans le rhéostat de Jacobi (fig. 1415) : sur un cylindre de bois ou de verre, à rainure en hélice, est enroulé un fil métallique, dont un des bouts est accroché, isolé, à l'extrémité du cylindre, et l'autre soudé à une virole fixée à l'axe, et sur laquelle s'appuie un ressort  $r$ . Le courant arrive par le fil  $fr$ , et sort par le fil  $f'$ , qui communique avec une barre métallique isolée  $oo'$  munie d'un curseur  $c$ . Ce curseur porte un petit ressort qui s'appuie sur le fil dans la rainure, et est déplacé comme un écrou en glissant sur la barre  $oo'$ , quand on fait tourner le cylindre. La longueur de fil introduite par ce rhéostat est égale à la somme des tours de fil compris en  $cr$ .

Fig. 1415.

L'appareil de Viard (1937) constitue un rhéostat facile à construire et commode dans beaucoup de cas. — M. Crova, au lieu de déplacer un fil de platine, tend parallèlement deux fils de platine dans un gros tube vertical de verre contenant du mercure; le courant passe d'un fil à l'autre par la surface du mercure, dont on fait varier le niveau en soulevant plus ou moins un vase contenant du mercure et communiquant, par un tube en caoutchouc, avec la partie inférieure de la colonne. Une division tracée sur le tube fait connaître la longueur de la partie des fils qui sort hors du mercure.

**2081. Rhéostats à mercure.** — Despretz a remarqué que les rhéostats à fils peuvent donner des résultats erronés, à cause de l'inégalité de conductibilité qu'ils présentent souvent en leurs différentes parties. Les rhéostats à mercure

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 265.

sont exempts de cet inconvénient. Celui de Jacobi, qu'il nomme *agomètre*, consiste en un tube de verre étroit et bien calibré, contenant une colonne de mercure, dans laquelle un fil rigide de platine s'enfonce de quantités mesurées sur une échelle, de manière à faire varier la longueur de mercure que le courant doit parcourir, et, par suite, la résistance; le mercure résistant plus que le platine même sous une plus grande section. La figure 1423 représente un rhéostat de ce genre. Quelquefois, le tube est en forme d'U, et le courant passe d'une branche à l'autre, à travers le mercure, par deux fils rigides en platine qu'on enfonce plus ou moins dans les deux branches.

Dans l'*agomètre* de M. E. Becquerel, un tube divisé horizontal, de 2<sup>mm</sup> environ de diamètre, reçoit un fil de cuivre rigide qu'on y enfonce plus ou moins, en refoulant le mercure dans un réservoir où sa résistance est nulle. L'extrémité du fil de cuivre est garnie d'un fil de soie formant piston, et est amalgamée, pour éviter la résistance au passage.

### 2082. Caisses de résistance.

— Quand on a besoin d'introduire de grandes résistances dans un circuit, comme dans les essais des fils télégraphiques, on emploie des rhéostats particuliers désignés sous le nom de *boîtes* ou *caisses de résistance*. La figure 1416 représente la disposition imaginée par M. Siemens.

Les bobines *o, p, q, r, s, t, ...*, de résistances connues, sont formées de fils métalliques garnis de soie, dont les extrémités aboutissent à des plaques de cuivre *A, a, c, e, ...*, de manière que le courant introduit par les bornes d'attache *A, A'*, passe d'une bobine à l'autre. On peut supprimer à volonté le passage par certaines bobines, en enfonçant, entre les plaques, des chevilles de cuivre; par exemple, si l'on enfonce les chevilles *m* et *n*, le courant ne passe pas par les bobines *q* et *t*. Pour éviter l'action des spires de l'hélice les unes sur les autres, le fil est enroulé après avoir été plié en double, de manière que le courant circule en sens opposé dans deux spires contiguës, et que les extrémités se séparent en haut, où elles sont soulevées à deux plaques voisines. Pour n'avoir pas de trop grosses bobines, on emploie des fils de maillechort, dont la résistance est 13 fois plus grande que celle du cuivre, et est 10 fois moins influencée par la chaleur. M. Siemens compose sa caisse de 16 bobines, dont les résistances sont :

1	2	2	5	10	10	20	50
100	100	200	500	1000	1000	2000	5000

de manière qu'on peut, en les combinant, former tous les nombres, de 1 à 10000. M. Maxwell, en graduant les résistances des bobines suivant les

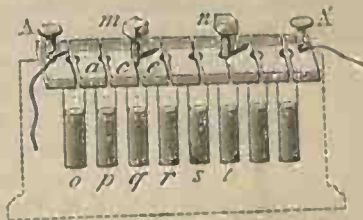


Fig. 1416.

puissances 1, 2, 4, 8, 16... de 2, obtient tous les nombres avec la moindre quantité de bobines.

**2083. Rhéostat de pression.** — Dans cet instrument, très-sensible et cependant à grande résistance, M. Eddison a utilisé l'effet du tassement sur la conductibilité des matières pulvérulentes. Dans un tube en ébonite *tt'* (fig. 1417), sont empilées des rondelles d'étoffe de soie recouvertes de charbon en poudre, et formant une colonne C, que l'on introduit dans le circuit par les fils A, A'. Le courant traverse la colonne, dont on fait varier la conductibilité en la comprimant plus ou moins, au moyen de la vis V, à tête micrométrique, R, qui permet d'évaluer le degré de compression d'après les tours et fractions de tours. On approprie le nombre des rondelles et la quantité de charbon interposé aux genres de courants qu'on a à étudier<sup>1</sup>.

**2084. Unités de résistance.** — Jacobi avait proposé d'adopter pour unité de résistance, la résistance d'un fil de cuivre de 1<sup>m</sup> de long et de 1<sup>mm</sup> de diamètre. Et, comme la conductibilité peut être sensiblement modifiée par des impuretés ou des modifications de structure même légères, il envoya à divers physiciens un fil de cuivre qu'il proposa de prendre comme étalon, pour lui comparer la résistance d'une longueur égale du fil de leur rhéostat. M. Weber avait proposé une unité de résistance établie d'après certains effets d'induction, mais exigeant des manipulations trop compliquées pour la pratique.

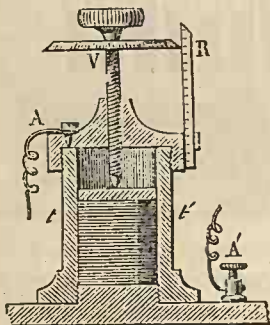


Fig. 1417.

Pouillet, le premier, a pris la résistance du mercure pour terme de comparaison (2085), et M. Siemens a adopté pour unité de résistance, celle d'une colonne de mercure à 0°, de 1<sup>m</sup> de longueur et de 1<sup>mm</sup> carré de section. C'est ce qu'on nomme l'unité Siemens. La construction de cette unité n'est pas facile à cause des inégalités de section aux divers points d'un même tube capillaire de verre. Mais il n'est pas difficile de trouver de ces tubes ayant une forme régulière légèrement conique, sur une longueur de 1<sup>m</sup>, et M. Siemens a donné des formules qui permettent alors de calculer leur résistance, en fonction des dimensions extrêmes<sup>2</sup>.

En 1861, l'Association britannique a proposé une autre unité, connue sous le nom d'unité britannique ou de *Ohm*, qui équivaut à 1,0486 unité Siemens, de sorte que celle-ci vaut 0,9536 *Ohm*. On peut ensuite considérer des multiples et sous multiples décimaux de ces unités et leur appliquer les préfixes *déca*,

<sup>1</sup> *L'Électricité*, revue scientifique illustrée, t. I, p. 255.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LX, p. 250.

*hecto, kilo, .....; déci, centi, ..... On nomme généralement mégOhm, une réunion d'un million d'Ohm, et micrOhm, une valeur de un millionième d'Ohm.*

Une fois l'unité définie, on construit au moyen de fils métalliques, des étalons présentant une résistance égale à l'unité, à une température  $t$  inscrite sur la boîte qui contient le fil, qui est revêtu de soie et imbibé de paraffine. Ce fil a été replié en deux avant d'être enroulé, ses extrémités aboutissent à de larges électrodes de cuivre, pour éviter la résistance au passage, et la bobine est enveloppée d'une gaine de laiton, ce qui permet de la plonger dans un bain à la température  $t$ .

**2085. CONDUCTIBILITÉ DES FILS MÉTALLIQUES.** — H. Davy, puis Becquerel, ont, les premiers, comparé les pouvoirs conducteurs des métaux pour l'électricité voltaïque. Ils employaient les procédés au moyen desquels ils ont établi les lois de la résistance des fils (2062); seulement, ils comparaient des fils de substance différente.

**Expériences de Pouillet.** — Les courants, produits par les deux couples thermo-électriques égaux  $a, a'$  (fig. 1418), passaient en sens contraire dans un rhéomètre différentiel R. Dans l'un des deux circuits, d'ailleurs identiques, était intercalé le fil à essayer  $f$ , et dans l'autre, un rhéostat à fil de platine  $mp$ , communiquant avec le circuit, d'une part en  $c$ , et de l'autre en  $m$ , par un curseur, formé d'un morceau de liège portant une cavité remplie de mercure que traversait le fil de platine, et dans laquelle plongeait l'extrémité du fil rhéophore. En faisant glisser ce curseur le long du fil,  $cp$ , on ramenait, par tâtonnement, le rhéomètre au zéro. Alors le fil  $f$  produisait la même résistance que la partie  $mc$  du fil de platine. Si donc  $l, s, c$  étaient la longueur, la section et la conductibilité du premier fil,  $l', s', c'$  les mêmes quantités pour le fil de platine, on avait (2062),  $l s' c' = l' s c$ , d'où  $c : c' = s' l : s l'$ , pour le rapport des conductibilités.

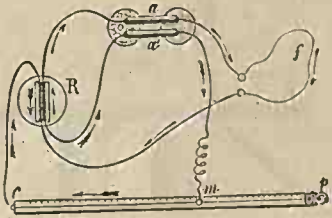


Fig. 1418.

Pouillet a ensuite comparé la conductibilité de son fil de platine, à celle du mercure renfermé dans un tube de verre de diamètre connu, dont les extrémités s'engageaient dans de larges vases, et mis à la place du fil  $f$ . — Il a pu ainsi évaluer la conductibilité de divers métaux, par rapport à celle du mercure qui est beaucoup moins conducteur que les autres; 50 fois moins environ que l'or, l'argent, le cuivre. Il a reconnu qu'il suffit de très-petites quantités de matières étrangères pour modifier notablement les résultats. Par exemple, l'argent, dont la conductibilité est 51 quand il contient 0,037 d'alliage, ne donne plus que 47, 42 et 39 quand il en contient 0,100; 0,143, et 0,253. L'or pur a donné le nombre 39; et 13 seulement quand il contenait 0,049 d'alliage. Cette influence des impuretés explique, au moins en grande partie, les différences que présentent les résultats trouvés par divers physiiciens. — *L'état physique a*

aussi une influence sensible : le cuivre écroui conduit moins que le cuivre recuit — M. Wartmann ayant comprimé un fil de cuivre enveloppé de gutta-percha et plié en zig-zag, par un effort croissant jusqu'à 5770 kil. a vu sa conductibilité diminuer, pour reprendre sa première valeur quand on cessait de comprimer. — M. Matteucci a reconnu que le bismuth liquide conduit mieux qu'à l'état solide, et d'après M. Matthiessen, il en est de même de l'alliage fusible de Rose ; ce qui tient à leur structure cristalline, qui leur donne une très-faible conductibilité à l'état solide (1,19 pour le bismuth).

**2086. Influence de la chaleur.** — Pouillet a reconnu que la chaleur diminue la conductibilité des métaux<sup>1</sup>. M. E. Becquerel en 1846, a étudié cette influence au moyen de l'appareil (fig. 1419)<sup>2</sup>. P est un couple de Daniell; le courant se bifurque en *o*, en formant deux courants partiels qui circulent *en sens contraire*, dans un rhéomètre différentiel *m*. L'un de ces deux courants parcourt ensuite le fil *c'*, traverse le rhéostat R, et revient à la pile en *o'*. L'autre suit la route *crfFaCo'*. Le fil à essayer *rsi'* est légèrement tendu entre deux pincettes *r, r'*;

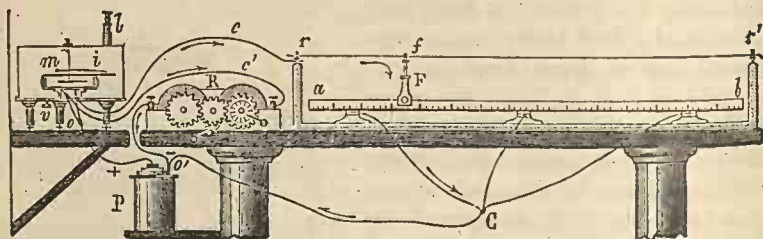


Fig. 1419.

un curseur de cuivre F, terminé par une pince *f*, et mobile sur une règle divisée *ab*, sert à limiter la partie *rf* du fil, que doit parcourir le courant. La règle de cuivre *ab*, très-épaisse et communiquant à la pile par trois fils réunis en C, ne présente pas de résistance sensible. La longueur du fil du rhéostat parcourue par le courant est mesurée en cinquième de millimètres. Chacun des fils du rhéomètre fait 10 tours, et l'aiguille porte un brin de paille *i*, de 20<sup>cm</sup> de longueur formant une aiguille indicatrice.

Voici maintenant comment on opère : le courant étant établi, et l'aiguille du rhéomètre *m*, ramenée au zéro, ce que l'on voit au moyen du microscope *l*, on fait glisser le curseur F de manière à augmenter la distance *rf*, d'une quantité connue ; l'aiguille *i* se déplace, et l'on allonge la partie libre du fil du rhéostat, jusqu'à ce que cette aiguille revienne au zéro. Les longueurs introduites dans les deux circuits présentent alors la même résistance, et l'équation  $cs' = c's'l$  donne

<sup>1</sup> Le tellure semble faire exception ; mais M. F. Exner a montré que la chaleur lui fait subir un changement de structure qui explique cette anomalie.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 242.

le rapport  $c : c'$  des conductibilités du fil du rhéostat et du fil d'épreuve  $rf$ .

Pour opérer à différentes température, on enroule le fil d'épreuve autour d'un tube de verre  $ab$  (fig. 1420) plongé dans une éprouvette AB remplie d'huile agitée, dont un thermomètre  $t$  donne la température. Les extrémités du fil, de longueur connue, sont fixées à des tiges de cuivre à grande section  $c, c'$  par lesquelles on introduit ce système dans le circuit, à la place du fil  $rf$  (fig. 1419). L'aiguille du rhéomètre étant au zéro, on chauffe au bain-marie l'éprouvette AB (fig. 1420); l'aiguille  $i$  se déplace, et on allonge le fil du rhéostat jusqu'à ce qu'elle revienne au zéro. L'allongement de ce fil représente l'accroissement de résistance produite par la chaleur, et on la compare à celle du fil froid.

Il résulte d'expériences faites jusqu'à 100°, que la résistance augmente comme l'accroissement de température. Si donc la résistance d'un fil métallique est  $r$  à 0°, et si  $s$  est l'augmentation de la résistance pour 1°, la résistance à  $t$ ° sera  $R = r(1 + st)$ .

On ne peut attribuer l'influence de la chaleur sur la résistance du fil, aux changements de volume qu'il éprouve en se dilatant; car la dilatation diminue au contraire la résistance. En effet, soit  $\alpha$  le coefficient de dilatation,  $l$  la longueur, et  $d$  le diamètre du fil à 0°; sa résistance, qui, à 0°, est proportionnelle à  $l : d^2$  (2062), ne l'est, à  $t$ °, qu'à  $\frac{l(1 + \alpha t)}{d^2(1 + \alpha t)^2} = \frac{l}{d^2(1 + \alpha t)}$

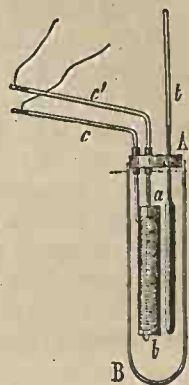


Fig. 1420.

Voici le tableau des résultats trouvés par M. E. Becquerel :

SUBSTANCES	RÉSISTANCES VERS 13°.		CONDUCTIBILITÉS		COEFFICIENTS d'augmen- tation de résistance pour 1°.	CONDUCTIBILITÉS pour la chaleur.
	Métal écroul.	Métal recuit.	Métal écroul.	Métal recuit.		
Argent.....	107,00	100,00	93,45	100,00	0,004022	100,0
Cuivre.....	112,25	109,36	89,08	94,44	0,004097	73,6
Or.....	155,31	152,77	64,39	65,46	0,003397	53,2
Cadmium....	406,94	"	24,57	"	0,004040	"
Zinc.....	413,84	"	24,46	"	0,003675	"
Étain.....	734,26	"	13,66	"	0,005615	14,5
Palladium..	714,59	"	43,98	"	"	"
Fer.....	824,89	817,44	12,12	12,25	0,004729	11,9
Plomb.....	1212,90	"	8,25	"	0,004549	8,5
Platine....	1243,47	1227,48	8,04	8,15	0,001861	8,4
Mercure....	5550,45	"	"	1 80	0,001040	"

Ces résultats sont rapportés à la conductibilité de l'argent recuit, représentée par 100. L'avant-dernière colonne donne le coefficient d'augmentation de la résistance pour une élévation de température de 1°, entre 0° et 100°, et la dernière renferme les conductibilités pour la chaleur, d'après MM. Wiedemann et Franz (II, 964).

On voit que l'ordre des conductibilités est le même pour l'électricité que pour la chaleur. Le cuivre est un des meilleurs conducteurs, et l'aluminium en est peu éloigné (33,76, d'après M. Matthiessen). On voit que l'influence de la chaleur sur la résistance, peu sensible pour le mercure, est très prononcée pour l'étain, le fer, le plomb, et que les coefficients ne varient pas régulièrement comme les nombres des colonnes précédentes; la chaleur altère donc les rapports des conductibilités. Rappelons enfin l'influence sur l'échauffement des fils par les courants, de la résistance produite par la chaleur (1936).

Les expériences précédentes n'ont été faites que jusqu'à 100°; M. Lenz a opéré jusqu'à 200°. Il est arrivé, en général, aux mêmes conclusions que M. E. Becquerel, et a trouvé les nombres suivants, en prenant pour terme de comparaison la conductibilité du cuivre à 0° représentée par 100.

	Argent,	cuivre,	or,	étain,	laiton,	fer,	plomb,	platine.
A 0° . . . . .	136,25	100	79,79	30,84	29,30	17,74	14,62	14,16
A 100° . . . . .	94,45	73	65,20	20,44	21,78	10,87	9,61	10,93
A 200° . . . . .	68,72	54,82	54,49	14,78	21,45	7,00	6,76	9,00

Quand on connaît la résistance  $r$  à 0°, et le coefficient  $s$  d'augmentation de résistance pour 1°, on calcule la résistance  $R$  à  $t$  O, par la formule  $R = r(1 + st)$  semblable à la formule des dilatations.

**Métaux alcalins, etc.** — M. Matthiessen a étudié les conductibilités de nombreux métaux, entre autres de métaux *alcalins* et *terreux*, qui étaient réduits en fils, en les forçant, par compression, à sortir par un orifice de diamètre convenable. Tantôt l'opération se faisait dans l'huile de naphte, tantôt à l'air, et à chaud, suivant la nature du métal. Voici les résultats trouvés à la température de 16 à 20°, la conductibilité de l'argent étant prise pour terme de comparaison et représentée par 100.

Sodium,	magnésium,	calcium,	potassium,	lithium,	strontium.
37,43	25,47	22,14	20,85	19,00	6,71

Le *potassium* et le *sodium* étaient renfermés dans des tubes de verre. Leur conductibilité diminue quand la température s'élève. Le sodium a présenté une diminution brusque à son point de fusion, 93°,4, et le potassium, seulement une diminution très rapide, mais sans saut brusque.

**Sélénium** — Ce corps présente ce phénomène très remarquable, découvert

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. L, p. 492 et LIV, p. 255.



par M. W. Smith, que la lumière augmente sa conductibilité<sup>1</sup>. M. Siemens, en chauffant du sélénium pendant longtemps à 210°, l'a transformé en une masse cristalline à grains grossiers, dont la conductibilité, analogue à celle des métaux, diminue quand la température augmente. Deux spirales de platine, noyées dans la masse à une distance de 1<sup>mm</sup> l'une de l'autre y apportant le courant, si l'on expose la masse à la lumière diffuse, sa conductibilité est doublée, et, à la lumière du soleil, décuplée. L'accroissement est à peu près proportionnel à l'intensité lumineuse; dès qu'on supprime la lumière, la conductibilité s'abaisse presque instantanément. La chaleur obscure, au lieu de l'augmenter, la diminue.

M. Siemens pense que l'action de la lumière sur le sélénium est analogue à celle de la chaleur, qui le change, avec dégagement de chaleur, en une masse de conductibilité analogue à celle des métaux. On peut rapprocher ces phénomènes, de ce fait, constaté par MM. Adams et Dag, que la lumière développe des courants dans un morceau de sélénium, quand elle éclaire inégalement ses divers points.

**2088. Cas d'un courant instantané.** — M. Guillemain a obtenu des résultats singuliers en employant la décharge d'une batterie, au lieu d'un courant continu<sup>2</sup>. 1° Deux fils de plomb et de cuivre, d'une quinzaine de mètres de longueur, sont tendus entre deux lames métalliques par lesquelles on peut faire passer la décharge. Deux fils de platine fins de 10<sup>cm</sup> de long séparent les premiers fils, de ces lames. Quand la décharge passe, le fil de platine du côté du plomb est seul fondu, comme si le plomb, qui résiste 10 à 20 fois plus que le cuivre, était moins résistant. — 2° On remplace le fil de plomb par un second fil de cuivre, et l'on cherche la décharge capable de fondre les deux fils de platine; on substitue un fil de fer à l'un des fils de cuivre, et la même décharge ne peut faire fondre le fil de platine du côté du fil de cuivre restant, quoique le fer résiste 7 fois plus que le cuivre qu'il remplace. Ces résultats paraissent dus à l'effet du choc électrique et peuvent être rapprochés des phénomènes étudiés par M. E. Villari, qui a découvert qu'un fil de fer s'échauffe davantage quand le courant qui le traverse est intermittent, et que l'accroissement de chaleur est d'autant plus prononcé que les intermittences sont plus rapprochées, et qu'il l'est encore plus quand le courant est renversé à chaque interruption. Les changements de position répétés qu'éprouvent les molécules expliquent cet accroissement de chaleur.

**2089. CONDUCTIBILITÉ DES CORPS NON MÉTALLIQUES.** — On n'a pu jusqu'à présent mesurer la conductibilité des corps solides non métalliques, à cause de la difficulté de leur donner des dimensions bien déterminées. On a seulement reconnu s'ils sont bons, assez bons, peu, très peu conducteurs. MM. Henrici et Hausmann, et M. Wartmann, entre autres, ont fait beaucoup d'expériences à ce sujet, et les résultats qu'ils ont obtenus sont généralement d'accord. Sur

<sup>1</sup> *Annales de Poggendorff*, t. CLVI, p. 334, et *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. V, p. 21, et t. VII, p. 206.

<sup>2</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. II, p. 50, et t. IV, p. 157.

320 espèces minérales examinées par M. Wartmann, il ne s'en est trouvé que 67 de conductrices <sup>1</sup>. Les minéraux opaques et brillants conduisent généralement le mieux, et parmi les cristaux qui n'appartiennent pas au système régulier, il en est qui ne présentent pas la même conductibilité dans les différentes directions. La structure a parfois une très grande influence; par exemple, le diamant est isolant, et le graphite conduit bien. M. W. Beetz a trouvé pour ce dernier, suivant les variétés, les conductibilités 4,55; 11; 1,38, par rapport à celle du mercure représentée par 100. Le charbon de bois est conducteur quand il a été calciné. M. Violette a constaté que les charbons de bois légers qui servent à la fabrication de la poudre, conduisent mieux que la

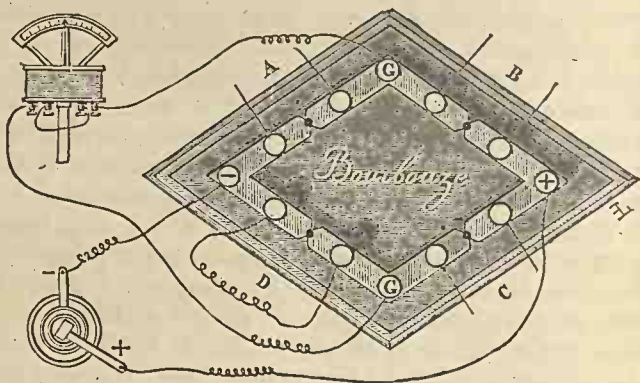


Fig. 1421.

plombagine artificielle, quand ils ont été préparés à une température de 1500°. Nous avons vu la conductibilité du charbon pour la chaleur présenter des particularités analogues (II, 955).

La chaleur, qui diminue la conductibilité des métaux, augmente celle des corps non métalliques. Le sulfure d'argent devient conducteur quand on le chauffe, même faiblement; le fluorure de plomb, avant la chaleur rouge; le bi-iodure de mercure, vers 140°. Le verre chauffé devient d'autant plus conducteur, qu'on s'approche davantage de la chaleur rouge. M. Buff a trouvé pour sa résistance à 200°, 250°, 300°, 350° et 400°, les nombres 258, 158, 17, 12, et 8. L'augmentation de conductibilité de ces corps dépend du passage de l'électricité par électrolyse; car ils sont décomposés par le courant quand ils sont échauffés, même avant d'approcher du point de liquéfaction, et les quantités décomposées augmentent avec la température.

**2090. Pont de Wheatstone.** — Dans la télégraphie électrique, on a fréquemment à mesurer la résistance de très longs fils. On a imaginé pour

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), t. XXII, p. 84.

cela différentes méthodes promptes et sûres, parmi lesquelles celle dite du *pont de Wheatstone*, dont Wheatstone rapporte l'invention à M. Christie, d'Edimbourg, et qui est indépendante de la pile et du rhéomètre employés.

Le *pont de Wheatstone* consiste en un quadrilatère formé de quatre bandes de cuivre, A, B, C, D (fig. 1421), dont deux sommets opposés communiquent avec une pile, et dont les deux autres, G, G', sont réunis par un fil qui traverse le quadrilatère comme un pont, et contient un rhéomètre. Le courant de la pile se divise entre la partie supérieure et la partie inférieure du quadrilatère, et si les potentiels aux deux sommets G, G', sont égaux, il ne passe aucune partie du courant par le rhéomètre. Il est facile de voir qu'il en est ainsi quand les résistances  $a, b, c, d$  des quatre côtés A, B, C, D satisfont à la relation  $ac = bd$ . En effet, si  $t$  est la différence des potentiels aux sommets opposés qui reçoivent

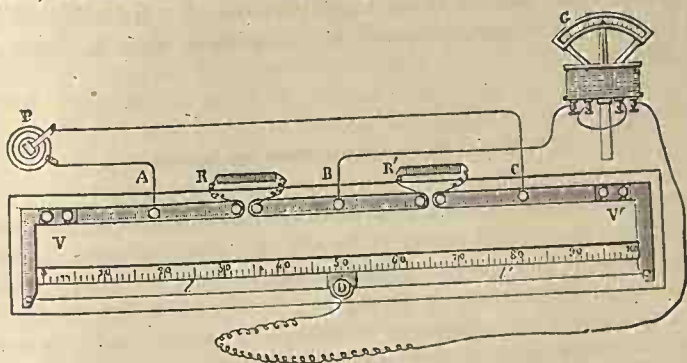


Fig. 1422.

les électrodes de la pile, et si  $a, b, c, d$  représentent les longueurs réduites exprimant les quatre résistances, on a (2067), pour le potentiel  $x$  au sommet G supérieur,  $x = t \frac{a+b}{b}$ , et au sommet G inférieur,  $x' = t \frac{c+d}{c}$ , et pour que les deux valeurs soient égales, il faut que  $bd = ac$ .

Les quatre bandes portent, en A, B, C, D, des interruptions de chaque côté desquelles sont des bornes d'attache destinées à recevoir des fils résistants. En D on intercale la résistance  $d$  que l'on veut évaluer; en A et B des résistances dont le rapport  $a : b$  est connu, et en C un rhéostat au moyen duquel on dispose de la résistance  $c$ , de manière que l'aiguille du rhéomètre A reste au zéro; et la formule  $bd = ca$  donne alors  $d = \frac{a}{b} c$ , la résistance des bandes de cuivre étant négligeable.

Au lieu de faire varier  $c$ , on peut faire varier  $a : b$ . L'appareil reçoit alors souvent la forme (fig. 1422). Les électrodes de la pile P aboutissant aux points  $a$  et  $c$  d'une bande de cuivre isolée, on intercale en R la résistance à évaluer, et

en  $R'$ , une résistance connue. Les extrémités du fil du rhéomètre aboutissent l'une en B, et l'autre en D sur un curseur qui glisse le long d'un fil de manière à faire varier le rapport  $a : b$  des longueurs ou des résistances de ses deux parties ; rapport donné par une règle divisée. Il faut s'assurer de l'homogénéité du fil, en faisant des expériences en sens inverse, qui devront donner le même résultat si le fil est homogène. Il faudra aussi, dans tous les cas, opérer rapidement pour que les fils n'aient pas le temps de s'échauffer sensiblement.

Le pont de Wheatstone peut servir à comparer les résistances, et, par conséquent les conductibilités des fils de différente nature. Il peut aussi donner la résistance d'un rhéomètre par sa propre déviation. Il suffit pour cela de le placer en R, de réunir les points B et D par un fil interrompu, et de déplacer D jusqu'à ce que la déviation du rhéomètre soit la même quand on réunit et quand on sépare les deux bouts du fil interrompu placé entre B et D ; auquel cas ce fil ne reçoit aucun courant. L'équation  $bd = ca$  donne alors la résistance  $d$  du rhéomètre.

## II. Mesure de la conductibilité des liquides.

**2091.** Les liquides sont beaucoup moins bons conducteurs que les métaux. Les dissolutions acides et salines et les sels en fusion conduisent le mieux. Les huiles essentielles sont généralement isolantes. Nous avons exposé (2002) les motifs qui font attribuer la propagation de l'électricité dans les liquides, à la décomposition qui accompagne le passage du courant ; aussi, la mesure de leurs conductibilités présente-t-elle des difficultés particulières, à cause des altérations que produit l'électrolyse, et des résistances au passage, des électrodes au liquide, et réciproquement. Les premières recherches suivies sur ce sujet ont été faites, en 1826, par Marianini ; mais la méthode qu'il employait comportait, à cette époque, de nombreuses causes d'erreur.

**Expériences de Pouillet**<sup>1</sup>. — Pouillet, en 1837, a d'abord vérifié les lois de la conductibilité, sur des colonnes liquides renfermées dans des tubes de dimensions connues ; puis il a comparé la conductibilité du platine à celle d'une solution saturée de sulfate de cuivre à la température de 15°. Le liquide était renfermé dans un tube de 1<sup>m</sup> de long et de 2<sup>cm</sup> de diamètre. Le fil de platine, de 0<sup>mm</sup>, 144 de diamètre, et de 200<sup>m</sup> de longueur était tendu en zig-zag sur une planche. La colonne liquide était introduite dans un circuit contenant une boussole des tangentes, puis remplacée par une longueur de fil de platine produisant la même déviation. En ramenant à la même section, Pouillet a trouvé que la dissolution saturée de sulfate de cuivre conduit 2 546 680 fois moins que le platine, ou 16 500 000 fois moins que le cuivre, qui conduit 6,5 fois mieux que le platine.

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Acad. des sc.*, t. IV, p. 487, et *Éléments de phys.* (1856), t. I, p. 641.

Pour comparer la conductibilité, représentée par 100, de la dissolution de sulfate de cuivre à celle des autres liquides, Pouillet, après avoir observé la déviation quand le tube rempli de cette dissolution était introduit dans le circuit, substituait à ce tube un tube vertical A (fig. 1423) contenant l'autre liquide, et dans lequel le courant entrait par la tige métallique  $t'$ , et sortait par la partie inférieure garnie d'une virole métallique. On enfonçait ensuite la tige  $t'$  dans le liquide, de manière à obtenir la même déviation que dans la première expérience. La nature des métaux mis en contact avec le liquide variait avec la nature de celui-ci. Pouillet a trouvé ainsi les nombres 64, 44, 31, pour des dissolutions de sulfate de cuivre étendues de 1, 2, 4 volumes d'eau; 41,7 pour une solution saturée de sulfate de zinc; 0,25 et 1,5 pour l'eau distillée et pour l'eau contenant  $\frac{4}{200000}$  d'acide nitrique. — D'après Cavendish et Marianini, l'eau de mer conduit 100 fois mieux que l'eau distillée.



Fig. 1423.

**2092. Expériences de M. E. Becquerel<sup>1</sup>.** — La marche suivie a été la même que pour les fils métalliques (2086). L'appareil employé réalise, avec perfectionnements, une disposition, indiquée par Wheatstone dans son Mémoire sur les rhéostats, pour éviter l'influence de la résistance au passage, le courant conservant toujours la même intensité. Deux éprouvettes verticales  $ab$ ,  $a'b'$  (fig. 1424), contenant le liquide à étudier, reçoivent des tubes de verre  $o$ ,  $o'$ , de diamètre connu, maintenus par des bouchons à une distance de 4<sup>cm</sup> du fond des éprouvettes. En  $e$ ,  $e'$  sont des disques de platine soutenus par des fils de platine  $ef$ ,  $e'f'$  enveloppés de tubes de verre; l'un,  $e'f'$ , traverse un bouchon dans lequel il peut glisser; l'autre,  $ef$ , est porté par un bras que l'on peut abaisser ou élever de quantités mesurées à moins de  $\frac{1}{10}$  mm, au moyen d'un vernier et d'une échelle gravée sur la crémaillère qui sert à effectuer le déplacement. Des lames métalliques  $c$ ,  $c'$  sont soutenues horizontalement près de l'ouverture inférieure des tubes  $o$ ,  $o'$ , par des fils de même métal entourés de tubes de verre. L'appareil est introduit dans le circuit d'une pile de 3 ou 4 couples, contenant le

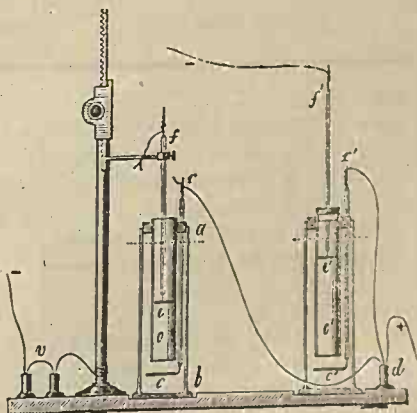


Fig. 1424.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 267.

rhéomètre *m* de la figure 1419. Le courant, arrivé en *d* (fig. 1424), se bifurque; une partie suit la route *r'c'e'f'*, en traversant la colonne liquide *ce'*, et parcourt ensuite un des fils du rhéomètre différentiel; l'autre partie suit la route *drecfv*, et parcourt en sens contraire le second fil, qui vient aboutir, comme le premier, au pôle négatif de la pile. Cela posé, l'aiguille du rhéomètre étant amenée au zéro par un déplacement convenable de la lame de platine *e*, on remplace l'arc *v* par un fil de platine de dimensions connues, l'aiguille quitte le zéro, et on l'y ramène en abaissant la lame *e*, de manière à diminuer la résistance de la colonne liquide *ce*. La résistance du fil introduit en *v* est alors équivalente à celle d'une colonne liquide ayant le diamètre du tube *o*, et une longueur égale à la quantité dont on a abaissé la lame *e*.

Il est essentiel d'éviter l'altération du liquide par l'électrolyse. Quand on opère sur une dissolution saline, on met en *c*, *c'* des lames du métal que contient le sel, lames qui agissent comme électrodes solubles. Si le métal ne peut être mis en lame, ou si l'on n'opère pas sur une dissolution saline, on forme les lames *c*; *c'*, d'un métal oxydable, pour empêcher tout dégagement de gaz. Le sel qui se produit alors tombe au fond de l'éprouvette *ab*, et ne modifie pas la conductibilité de la colonne *ce*. Dans ce cas, on emploie un courant faible, pour éviter un trop grand dégagement d'hydrogène en *e*, *e'*, et l'on incline un peu les lames *e*, *e'* pour en faciliter le départ. L'aiguille du rhéomètre est cependant toujours un peu agitée. — Voici le tableau des résultats trouvés par M. E. Becquerel :

SUBSTANCES	DENSITÉS	TEMPÉRA- TURES	POUVOIRS CONDUCTEURS
Argent pur. ....	»	0°	100 000 000
Eau saturée de sulfate de cuivre.....	1,1707	9,25	5,42
Id. de chlorure de sodium à 9°,50.	»	13,40	31,52
Id. de nitrate de cuivre.....	1,6008	13,00	8,995
Id. de sulfate de zinc.....	1,4410	14,40	5,77
250 gr. d'eau, 30 gr. d'iodure de potassium.	»	12,50	11,20
220 cent. cubes d'eau, 20 <sup>cc</sup> d'acide sulfurique concentré.....	»	19,00	88,68
Acide azotique à 36°.....	»	13,10	93,77
30 gr. de protochlorure d'antimoine, 120 <sup>cc</sup> d'eau et 100 <sup>cc</sup> d'acide chlorhydrique....	»	15,00	112,01

On voit que la dissolution qui conduit le mieux conduit à peu près un million de fois moins que l'argent.

**2094. Influence des quantités de sel dissous.** — Les dissolutions salines qui ont un point de saturation, comme celles de *sulfate de cuivre*, de *sel marin*, conduisent d'autant mieux qu'elles sont plus concentrées. En appelant *C* leur conductibilité, et *q* la quantité de sel dissous dans l'unité de volume,

M. E. Becquerel représente la *résistance*, R, par la formule empirique

$$R = \frac{1}{C} = A + \frac{B}{q};$$

A et B sont des constantes dépendant de la nature du sel et de la température; on les détermine au moyen de deux couples de valeurs de R et de q. D'après cette formule, les conductibilités et les poids de sel renfermés dans le même volume sont représentés par les abscisses et les ordonnées d'une hyperbole équilatère à asymptotes parallèles aux axes des coordonnées.

Pour les solutions des sels *déliquescents*, comme le nitrate de cuivre, le sulfate de zinc, la conductibilité augmente d'abord avec la concentration, et atteint un maximum, à partir duquel elle diminue quand on ajoute du sel; de sorte que deux dissolutions d'un même sel, l'une concentrée, l'autre très-étendue, peuvent donner les mêmes résultats. Il existe un maximum semblable pour les mélanges d'eau et d'acide sulfurique; car l'eau acidulée conduit mieux que l'eau pure et que l'acide concentré. La formule s'applique aux sels *déliquescents*, pour les états de concentration inférieurs au maximum de conductibilité. Cependant, il résulte d'expériences de M. Marié-Davy sur le sulfate de zinc, qu'il y aurait, au moins pour ce sel, deux maximum de conductibilité: l'un, quand la solution a pour densité 1,0542; l'autre, qu'avait trouvé M. E. Becquerel, quand elle a la densité 1,2537<sup>1</sup>.

Antérieurement, Matteucci était arrivé à plusieurs résultats remarquables en comparant les conductibilités de sels anhydres à l'état de fusion ignée<sup>2</sup>. Le courant d'une pile traversait d'abord un voltamètre, A, puis se bifurquait; un des courants partiels traversait un second voltamètre, a, et l'autre, la substance à étudier. La différence entre les volumes de gaz recueillis dans les deux voltamètres A, a, représentait la quantité d'électricité qui traversait la substance, et, par conséquent, était proportionnelle à sa conductibilité. Après avoir constaté qu'il n'y a aucune relation entre la conductibilité à l'état de fusion et la composition chimique, Matteucci compara le pouvoir conducteur d'un certain nombre de sels, en fusion et en dissolution concentrée. Il trouva que les sels qui, fondus, conduisent mieux que l'eau (azotate de potasse ou d'argent, chlorure de sodium ou de calcium, acétate de plomb), conduisent beaucoup moins, dissous que fondus. Quand le sel dissous était placé dans l'un des courants partiels, à la place du voltamètre, tout le courant passait par le sel en fusion. Ayant ensuite comparé entre elles les dissolutions des mêmes composés, il vit que celles qui conduisaient le mieux contenaient le sel le meilleur conducteur à l'état de fusion; d'où il conclut que le courant est transmis par le corps dissous, et que l'eau ne fait que lui donner l'état liquide nécessaire à l'électrolyse. — Des expériences faites avec le nitrate d'argent dissous dans l'eau ou l'alcool l'ont conduit à admettre que la conductibilité de la solution est la même, quand la distance entre les molécules du nitrate dissous est aussi la même.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 422.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 498.

Il résulte de ce qui précède que les sels qui, fondus, conduisent moins bien que l'eau, doivent mieux conduire dissous que fondus; il en est ainsi des protochlorures d'antimoine et d'étain. Le bichlorure d'antimoine et le perchlorure d'étain, qui, en fusion, ne conduisent pas du tout, ne doivent pas conduire, et par conséquent ne pas se décomposer quand ils sont dissous; et Matteucci admet que leur décomposition n'est qu'un effet secondaire produit par les éléments du dissolvant d'abord décomposé.

Matteucci a encore reconnu qu'un nouveau sel ajouté à une dissolution saline augmente sa conductibilité, comme si le premier sel n'existait pas, pourvu qu'il n'y ait pas de précipité. Il en résulte que si l'on mêle plusieurs sels à une dissolution, on augmente de plus en plus sa conductibilité. C'est ainsi qu'en ajoutant des chlorures de cuivre et d'iode et du protochlorure d'étain, à une dissolution de sel marin, on lui communique une conductibilité approchant de celle des métaux.

**2094. Influence de la chaleur.** — Pour comparer les conductibilités des liquides à différentes températures, M. E. Becquerel chauffait au bain-marie l'éprouvette *ab* (fig. 1424), jusqu'à ce que la température parût fixe. Des expériences faites sur des solutions de sulfates de cuivre et de zinc, et sur l'acide nitrique, ont prouvé que la chaleur *augmente* le pouvoir conducteur des liquides, au lieu de le diminuer comme pour les métaux; ce qui tient, au moins en partie, à ce que la chaleur facilite l'électrolyse (1972). Il suffit d'une différence de 20 à 30° pour doubler leur conductibilité; à 100°, elle peut être jusqu'à quatre fois plus grande qu'à 0°; tandis que celle des métaux diminue, entre les mêmes limites, dans des rapports beaucoup plus faibles, dont les extrêmes sont  $\frac{10}{11}$  et  $\frac{10}{16}$  pour le mercure et l'étain.

M. Hankel a aussi étudié l'influence de la température sur la résistance des liquides, par une méthode analogue à celle de M. E. Becquerel, et est arrivé aux mêmes conclusions<sup>1</sup>. Il a reconnu, de plus, que : 1° l'augmentation de conductibilité, due à une certaine élévation de température, est d'autant moins prononcée que celle-ci est d'avance plus élevée; 2° plus la dissolution est concentrée, plus l'augmentation est sensible; ce qu'il penche à attribuer à ce que la chaleur accroît d'autant plus la mobilité des molécules, que la dissolution, plus concentrée, était d'abord moins fluide. L'acide sulfurique diversement concentré est surtout dans ce cas.

Il résulte d'expériences de MM. F. Kohlrausch et O. Grotrian, faites au moyen du pont de Wheatstone (2090) sur 8 chlorures alcalins, entre 0° et 40°, et en employant des courants alternatifs pour éviter la polarisation, que la conductibilité croît proportionnellement à la température, sauf pour les liquides visqueux, pour lesquels elle croît plus rapidement; ce que l'on savait déjà pour l'acide sulfurique et certains sels. Si l'on représente par  $c$  la conductibilité à 0°, elle sera à  $t$ ,  $c(1 + at)$ . Le coefficient  $a$  n'a varié que de  $\frac{1}{35}$  environ pour les

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. IV, p. 66.



solutions contenant 5 pour 100 des chlorures étudiés, et il varie d'autant moins que la solution est plus étendue<sup>1</sup>.

**2096. RÉSISTANCE AU PASSAGE** — Quand l'électricité passe d'un métal dans un autre, il se manifeste une résistance attestée par l'échauffement qui se produit au point de jonction (1930). Une résistance analogue s'observe au passage d'un liquide dans un solide ou réciproquement, et nous avons vu qu'on doit l'attribuer à la *polarisation* des lames métalliques produite par l'électrolyse (1983). M. E. Becquerel et M. Marié-Davy ont cherché, chacun de leur côté, les lois de cette résistance<sup>2</sup>.

Dans les expériences de M. E. Becquerel, les lames,  $c$ ,  $c'$  (fig. 1424) sont appliquées contre les extrémités des tubes  $o$ ,  $o'$ . Une partie du courant qui se divise en  $d$ , passe par le tube  $o'$  et par le rhéomètre différentiel; l'autre  $dr$ , traverse successivement le tube  $o$ , un rhéostat particulier, une boussole des sinus donnant l'intensité absolue, et enfin le rhéomètre différentiel, et retourne à la pile. Le rhéostat, nommé *banc de résistance*, est formé de deux fils de platine tendus parallèlement sur une poutre horizontale; les bouts placés à une même extrémité sont joints au circuit. Ces fils communiquent en deux points, par un lourd curseur de cuivre, dont la position est indiquée sur une règle divisée qui lui sert de guide, de manière que si on le déplace d'une quantité  $a$ , le circuit varie d'une longueur de fil égale à  $2a$ .

Pour évaluer la résistance au passage, l'aiguille du rhéomètre différentiel étant au zéro, on abaisse la lame  $e$ , et en même temps on déplace le curseur de manière à maintenir l'aiguille au zéro. On obtient ainsi la longueur de fil de platine résistant autant que la portion de colonne liquide qu'on a supprimée. On peut déduire de là la résistance de la colonne entière  $cc$ , telle qu'elle serait s'il n'y avait pas de perte au passage. Pour mesurer ensuite directement la résistance de cette colonne, on abaisse la lame  $e$  jusqu'au contact de la lame  $c$ ; et si la longueur de fil équivalente à la colonne entière est plus grande que celle qui représente la résistance calculée de cette colonne, c'est qu'il y avait au passage une perte qui n'existe plus quand les lames se touchent, et qui est égale à l'excès de la résistance observée sur la résistance calculée. — M. E. Becquerel a encore opéré en employant, au lieu de l'éprouvette  $ab$ , une auge dans laquelle plongeaient deux lames verticales, dont une pouvait se rapprocher de l'autre au moyen d'un pignon et d'une crémaillère horizontale divisée.

Dans la méthode de M. Marié-Davy, le liquide qui reçoit les deux lames, fait partie d'un circuit contenant un rhéostat. Le courant ayant une intensité déterminée, on supprime le liquide, et on ramène le courant à la même intensité en produisant, au moyen du rhéostat, une résistance équivalente à celle du liquide. S'il y avait une résistance au passage dépendant du courant, on le reconnaîtrait en ce que le résultat donné par le rhéostat changerait avec l'intensité de ce courant.

<sup>1</sup> Ann. de Pogg, t. CLIV pp. 1 et 215; et Journal de Physique, t. IV, p. 345.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XX, p. 62; t. XIX, 422, et XVII, 257.

D'après M. E. Becquerel, quand il n'y a pas polarisation, par exemple quand les lames sont formées avec le métal du sel dissous, la résistance au passage est insensible. Cependant, M. Marié-Davy l'a toujours trouvée appréciable ; ce qui peut provenir de ce que le sel produit aux dépens de la lame positive, ne se dissout pas aussitôt et *empâte* la surface (2074).

La résistance au passage se manifeste nettement quand il y a polarisation, et d'autant plus que le courant persiste plus longtemps. De La Rive a reconnu que la résistance diminue quand on chauffe l'électrode négative, et M. Vorseleman de Heer, quand on l'agite vivement ; c'est que l'on fait ainsi disparaître les dépôts. L'électrode positive ne donne pas les mêmes résultats parce qu'il s'y forme peu de dépôts. Cette circonstance nous explique un phénomène curieux observé par Matteucci : dans un vase plein d'eau divisé en deux par une membrane, on verse d'un côté quelques gouttes de chlorure d'iode ; et l'on constate qu'un courant lancé à travers ce vase est 5 ou 6 fois plus intense quand l'électrode négative plonge dans l'eau pure ; les substances provenant de la décomposition du chlorure d'iode étant alors arrêtées par la membrane, et ne venant pas se déposer au pôle négatif.

La résistance au passage diminue quand l'intensité du courant augmente, mais non proportionnellement ; on peut la représenter par la formule empirique :

$$r = a + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2} + \dots$$

$i$  étant l'intensité, et  $a, b, c, \dots$  des constantes qu'on détermine dans chaque cas, au moyen de trois couples de valeurs de  $r$  et de  $i$ . Becquerel et M. Marié-Davy, en ne conservant que les trois premiers termes, ont retrouvé d'une manière satisfaisante les résultats de leurs expériences ; on peut même, dans quelques cas, se contenter de deux termes, et écrire  $r = a + \frac{1}{2}b$ . — M. Marié-Davy remarque que la formule d'Ohm,  $i = \frac{E}{L + r}$ , doit être modifiée, si l'on veut tenir compte de la résistance au passage, qui ne peut manquer d'exister dans la pile. La résistance intérieure se compose alors de deux parties, dont une est cette perte au passage ; on a donc  $r = r_1 + a + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2} = r' + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2}$ , et la formule de la pile d'où l'on tirera la valeur de  $i$ , devient,

$$i = \frac{E}{L + r' + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2}}$$

M. Marié-Davy a trouvé que cette nouvelle formule représente mieux ses propres expériences et celles de Pouillet et Fechner, que la formule plus simple dans laquelle on suppose la résistance de la pile indépendante de l'intensité du courant. Du reste, les deux formules diffèrent d'autant moins que  $i$  est plus grand, c'est-à-dire le courant plus intense.

## III. De la conductibilité des gaz.

**2097. Conductibilité des gaz très-chauds.** — A la température ordinaire, les gaz sont isolants pour les courants des piles à faible tension, même quand ils sont très-raréfiés; mais, à une haute température, ils laissent passer les plus faibles courants. Erman, lorsqu'il découvrit l'*unipolarité* (1982), avait vu l'aiguille du rhéomètre dévier, dans un circuit fermé au moyen d'une flamme; mais, ce résultat pouvant être attribué aux particules solides ou aux vapeurs que contient la flamme, il fallut expérimenter sur des gaz purs. C'est ce qu'a fait M. E. Becquerel<sup>1</sup>, au moyen de l'appareil (fig. 1425). Le courant, fourni par un ou plusieurs couples, C, circule autour d'un rhéomètre R à 24,000 tours, passe par un *agomètre* particulier AB, arrive au tube *nn'*, dans lequel il traverse

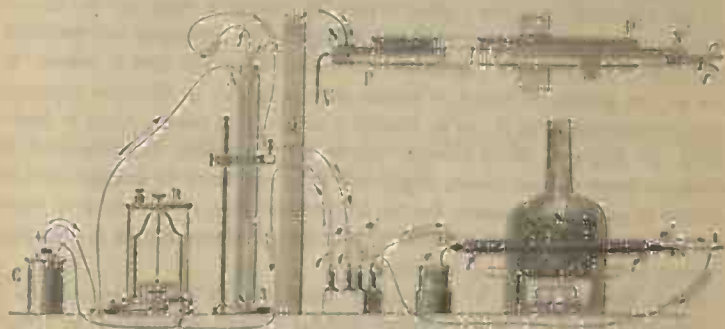


Fig. 1425.

le gaz chaud, et revient à la pile par le fil *of*, l'axe *o* et le fil *oj*. Au moyen des quatre godets à mercure *e', e, e', e*, on peut, en changeant de place les axes *o, e'*, intervertir le sens du courant dans le tube à gaz *nn'*; il suffit, pour cela, de joindre *e', e'*, au lieu de *e, e'*. Le tube *nn'*, représenté à part en *NN'*, est en platine sans soudure, traverse un fourneau, et est percé de contact de charbon par un tube en terre *PP, pp'*. Le gaz est introduit par un robinet *e*, et peut sortir en *V, v*, à travers de l'eau ou du mercure. Si l'on veut faire varier la pression du gaz, on fait communiquer le tube *V* avec une pompe pneumatique.

Pour faire passer l'électricité à travers le gaz du tube *NN'*, on fait communiquer ce tube, par le fil *N*, avec l'un des pôles de la pile; l'autre pôle communique, par le fil *n*, avec une tige *n'* de platine, au bout d'un peu d'isolant, pour augmenter sa rigidité. Cette tige, destinée à boucher *N* par du verre, est soutenue par un anneau de verre enroulé de gutta serena, lequel anneau bouché

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, Paris, t. XXXIX, p. 323.

fourneau pour que la gomme laque ne soit pas altérée. M. E. Becquerel s'est assuré que le passage de l'électricité se faisait bien à travers le gaz, et non par l'intermédiaire des bouchons et de l'anneau *m* rendus conducteurs par la chaleur, en remplaçant la tige, dans les expériences faites sur l'air chaud, par un fil de platine passant à travers le tube non fermé, et tendu entre deux supports isolants; ou bien en faisant passer le courant entre deux fils de platine tendus parallèlement sans toucher le tube; les résultats sont restés les mêmes. Avec les deux fils tendus, le tube de platine pouvait être remplacé par un tube de porcelaine.

L'agomètre AA, séparé du fourneau par un mur M, se compose d'une éprouvette AB remplie de liquide, dans lequel plonge un tube capillaire *oo'* bien calibré, divisé sur verre en demi-millimètres. Un fil de platine, *fl* peut s'enfoncer plus ou moins dans ce tube, pour faire varier la longueur *ol* de la colonne liquide que traverse le courant arrivant par le fil Ao.

Voici comment on opère : ayant séparé du circuit le tube *mn'* en faisant communiquer les godets *c, c'*, on donne à l'aiguille du rhéomètre une déviation déterminée, au moyen de l'agomètre. On introduit ensuite dans le circuit, le tube *mn'*, en plaçant les arcs *a, a'* comme dans la figure; la déviation diminue, mais en enfonçant le fil *fl*, on la ramène à sa première valeur. Alors la diminution de longueur de la colonne liquide de l'agomètre fait connaître la résistance propre du gaz chaud, augmentée de la résistance au passage entre le métal et le gaz; les résistances des fils de communication et des arcs *a, a'* étant négligeables. Il faut opérer rapidement, pour que la colonne liquide *lo* n'ait pas le temps d'être échauffée par le courant.

**2098. Résultats.** — 1° Les gaz ne commencent à être conducteurs qu'à la chaleur rouge, puis leur résistance diminue de plus en plus, et, au rouge blanc, ils laissent passer les plus faibles courants. Cependant leur résistance est toujours très grande. Celle de l'air, au rouge, est égale à 30 000 fois environ celle de l'eau contenant  $\frac{1}{20000}$  de sulfate de cuivre.

2° Les divers gaz ont, au rouge, la même résistance, puis les différences se prononcent de plus en plus, s'atténuent ensuite et disparaissent à peu près au rouge blanc. Voici les résistances de quelques gaz, celle de l'air étant 1.

Hydrogène,	hydrogène	oxygène,	chlore,	azote	a. carbonique.
Entre	proto-carboné	entre	au plus	et son protoxyde,	entre
0,3 et 0,4	vers	0,4 et 0,7	0,92	à peu près	1,2 et 2.
	0,4			1	

On voit qu'il n'y a aucun rapport entre les résistances et les densités.

3° La résistance est plus faible quand le tube de platine sert d'électrode négative; le fluide positif entrant par la plus petite surface; tandis que cette résistance est indépendante du sens du courant, quand il passe entre deux fils tendus. On remarque un résultat semblable pour les liquides, la polarisation, qui est surtout prononcée à l'électrode négative y étant d'autant moins sensible

en chaque point que cette électrode présente une plus grande surface. Il peut y avoir un effet semblable pour le platine plongé dans les gaz.

4° La résistance diminue avec la pression du gaz. Cependant le courant est toujours complètement intercepté, même dans le vide, au-dessous du rouge. Au-dessus du rouge, les différences entre les résistances des divers gaz à la même température sont de plus en plus faibles à mesure que la pression diminue; et quand elle n'est plus que de 2<sup>mm</sup>, les résistances sont égales. Pour l'air à la température rouge, les pressions étant successivement 760, 137, 40 et 2<sup>mm</sup>, les résistances sont représentées par les nombres 20,9; 7,1; 4,8; 3,8.

5° On a trouvé, sur l'air, que la résistance varie avec l'intensité du courant, ce que M. E. Becquerel penche à attribuer à la résistance au passage. Quand le courant d'une même pile est modifié au moyen du rhéostat, la résistance diminue quand l'intensité augmente, et d'autant plus que la pile possède un plus grand nombre de couples. La résistance dépend aussi, à égalité d'intensité, du nombre des couples; elle augmente en même temps que ce nombre. Par exemple, le rhéomètre marquant 15°, la résistance de l'air, au rouge, a été 572 pour 10 couples à auge et 292, pour 20 couples.

#### § 4. — COMPARAISON DES FORCES ÉLECTROMOTRICES, ET DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ.

##### I. Des forces électromotrices des diverses espèces de couples.

**2099.** La formule d'Ohm,  $i = E : R$ , contient la somme  $E$  des forces électromotrices du circuit (2067); cette quantité représente l'effort qui tend à vaincre les résistances qu'il renferme. Elle dépend du nombre des couples et de leur nature; mais nous verrons qu'elle est indépendante de la grandeur des plaques qui les composent, comme cela résulte, du reste, des expériences de M. Kohlrauch (2075), qui l'a trouvée proportionnelle à la tension aux pôles. Cette tension, indépendante de la grandeur des couples, peut par conséquent servir de définition à la force électromotrice, quelle que soit l'opinion que l'on adopte sur l'origine de l'électricité voltaïque. Plusieurs physiciens ont imaginé des méthodes pour mesurer le terme  $E$ , en vue soit d'appliquer la formule qui le contient, soit de comparer les différents systèmes de couples.

**2100. COMPARAISON DE LA FORCE DES COUPLES.** Ohm a indiqué la première méthode de comparaison des forces électromotrices de deux couples: on mesure au rhéomètre les intensités  $i$  et  $i'$  des courants que donne un des couples quand on introduit successivement dans son circuit des longueurs  $l$ ,  $l'$  d'un même fil, pour augmenter la résistance primitive  $r$ . On a alors:

$$i = \frac{E}{r + l}, \quad i' = \frac{E}{r + l'}; \quad \text{d'où} \quad E = \frac{i i'}{i - i'} (l' - l),$$

en éliminant  $r$ . On trouve de même pour l'autre couple, une valeur  $E'$ , et l'on divise  $E$  par  $E'$ . Les deux valeurs de  $E$  et  $E'$  dépendent évidemment de l'instrument avec lequel on mesure  $i$  et  $i'$ ; mais le rapport  $E : E'$  en est indépendant, ainsi que de l'unité choisie pour exprimer  $i$  et  $i'$ .

**Méthodes de Fechner**<sup>1</sup>. — On dispose les deux couples à comparer, dans un même circuit, d'abord de manière que les courants qu'ils produisent marchent dans le même sens, ensuite de manière qu'ils marchent en sens contraire, et l'on mesure, par la méthode des oscillations, les intensités des courants résultants. Si l'on admet que ces intensités sont égales à la somme,  $s$ , puis à la différence,  $d$ , des courants particuliers de chaque couple, on a, en représentant par  $r$ ,  $r'$  les résistances individuelles de ces couples (2069) :

$$s = \frac{E + E'}{r + r'}, \quad d = \frac{E - E'}{r + r'}; \quad \text{d'où} \quad \frac{E}{E'} = \frac{s + d}{s - d}.$$

Les deux méthodes qui précèdent ne conviennent bien qu'aux couples à courant constant; car, pour les autres, indépendamment des variations de la quantité même à évaluer, les résistances  $r$  et  $r'$  changeant d'une expérience à l'autre, on ne peut songer à les éliminer.

La seconde méthode de Fechner est indépendante des variations de  $r$  et  $r'$  : On ajoute aux circuits dans lesquels on introduit les couples à comparer, une même résistance  $R$ , assez grande pour que  $r$  et  $r'$  soient négligeables; on mesure les intensités  $i$  et  $i'$ , et l'on a

$$i = \frac{E}{r + R}, \quad i' = \frac{E'}{r' + R}; \quad \text{ou} \quad i = \frac{E}{R}, \quad i' = \frac{E'}{R}; \quad \text{d'où} \quad \frac{E'}{E} = \frac{i'}{i},$$

en négligeant  $r$  et  $r'$  devant  $R$ . Cette méthode a été appliquée par M. Joule, qui prenait la résistance  $R$  égale à plus de 300 fois  $r$  et  $r'$ ; et par M. E. Becquerel, qui la prenait égale à 30,000 fois celle d'un couple de Grove, et mesurait  $i$  et  $i'$  en milligrammes, au moyen de la *balance électromagnétique* (2059).

**Méthode de Wheatstone**<sup>2</sup>. — Supposons deux couples constants. On commence par faire passer à travers un rhéostat et un rhéomètre, le courant du premier couple, et l'on modifie la résistance de manière à obtenir une déviation déterminée indiquant une certaine intensité  $i$ ; on a alors  $i = E : r$ . On fait ensuite tourner le rhéostat de manière à obtenir une autre intensité, et l'on a  $i' = E : (r + l)$ . On opère de même avec le second couple, en reproduisant successivement les mêmes intensités  $i$ ,  $i'$ ; on a d'abord  $i = nE : nr$ , la résistance devant être  $nr$  pour que la valeur de  $i$  reste la même qu'avec l'autre couple. Ajoutant ensuite une longueur de fil  $l'$ , de manière à obtenir l'intensité  $i'$ , on a  $i' = nE : (nr + l')$ . Les deux valeurs de  $i'$  étant égales, on a  $E : (r + l) = nE : (nr + l')$ , d'où  $l' = nl$ . Le rapport cherché  $n$  est donc

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 91.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 274.

égal au rapport des longueurs de fil du rhéostat ajoutées successivement, pour passer de  $i$  à  $i'$ .

**Méthode de Pouillet.** — Pour comparer la force d'un couple hydro-électrique à celle de son couple thermo-électrique normal (2063), Pouillet introduit dans le circuit, avec le couple, une boussole des sinus et le fil de platine qui lui a servi à comparer les conductibilités des liquides à celle des métaux (2092). Les portions du fil introduit sont telles, que les déviations restent les mêmes quand on opère avec l'un ou l'autre couple. La formule  $i = E : R$  montre qu'alors les forces  $E$  des couples sont entre elles comme les résistances totales des deux circuits, exprimées en longueur du fil de platine. Les longueurs réduites de la boussole et de chaque couple sont déterminées d'avance.

**Méthode de M. Singer.** — Dans cette méthode, avec laquelle on n'a pas besoin de connaître la résistance du couple, on observe la déviation,  $\alpha$ , d'une boussole des tangentes introduite dans le circuit, et l'on a  $\text{tang } \alpha = E : R$ . Si l'on introduit une résistance additionnelle  $\rho$ , on a  $\text{tang } \alpha' = E : (R + \rho)$ . Remplaçant

$R$  par sa valeur tirée de la première équation, il vient  $\text{tang } \alpha = \frac{E \text{ tang } \alpha'}{E + \rho \text{ tang } \alpha'}$ ;

et, si l'on suppose  $\rho = E$ , on a  $\text{tang } \alpha' = \frac{\text{tang } \alpha}{1 + \text{tang } \alpha}$ . Si donc on introduit

dans le circuit une résistance  $\rho$ , telle que la déviation soit  $\alpha'$  donnée par la dernière égalité, cette résistance représentera la force électromotrice du couple, exprimée en longueur de fil du rhéostat qui fournit la résistance  $\rho$ .

**Méthode par l'électromètre capillaire.** — Nous avons vu, en décrivant cet instrument (1987), comment il se prête à la mesure des forces électromotrices; nous n'avons donc qu'à renvoyer à ce que nous avons dit à ce sujet.

**2101. Méthode d'opposition.** — Voici quel est le principe de cette méthode, employée par M. Jules Regnault<sup>1</sup>. Quand deux couples *égaux* sont disposés en sens inverse dans le même circuit, il n'y a pas de courant, ou plutôt les deux courants contraires s'entre-détruisent. Si l'un des couples est plus fort que l'autre, l'intensité du courant résultant se calcule au moyen de la différence des forces électromotrices des deux couples. Si donc on a deux couples donnant séparément des courants dont les intensités sont  $E : r$  et  $E' : r'$ , et, si l'on met ces courants *en opposition* dans le même circuit, l'intensité du courant

résultant sera, d'après la formule d'Ohm,  $i = \frac{E - E'}{r + r'}$ . Ce principe, que Faraday

semble avoir admis implicitement, est vérifié par un grand nombre de ses expériences, et il est facile de voir quelle serait la marche à suivre pour l'établir. L'intensité serait nulle si l'on avait  $E = E'$ , quels que soient  $r$  et  $r'$ . — Si, au

lieu de deux couples, on considère deux piles, on aura  $I = \frac{nE - n'E'}{R + R'}$ ,  $R$  et  $R'$  étant les résistances totales de ces piles. Si le couple d'une des piles est pris

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXIV, p. 453.

pour unité, on a  $E' = 1$  ; et, si l'on oppose un seul couple  $E$ , à un nombre  $n'$  d'unités tel que l'on ait  $I = 0$ , on aura  $E = n'$ , c'est-à-dire que le couple considéré équivaldra à autant de couples-unité qu'il aura fallu en employer pour contrebalancer le courant qu'il produit.

L'unité adoptée par M. J. Regnaud est le couple d'une pile thermo-électrique bismuth et cuivre, dont les soudures sont alternativement à  $0^{\circ}$  et à  $100^{\circ}$ . Cette pile avait 60 éléments, dont il introduisait dans le circuit un nombre convenable pour annuler le courant du couple à étudier. Mais, comme ces 60 unités étaient insuffisantes pour contrebalancer la plupart des couples hydro-électriques, il employait aussi, comme intermédiaire, un couple hydro-électrique d'une constance remarquable, disposé comme le couple de Daniell, et formé de cadmium plongé dans une solution de sulfate de cadmium, et de zinc dans une solution de sulfate

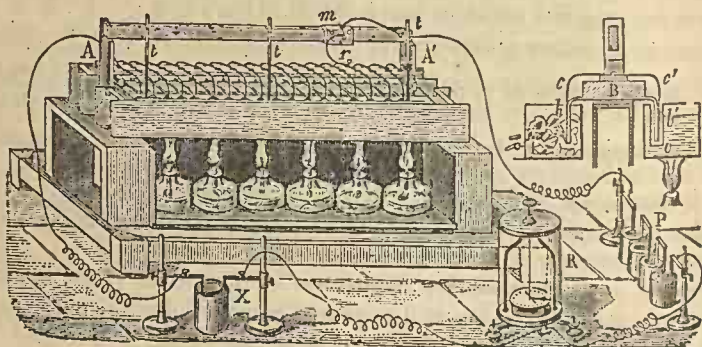


Fig. 1426.

de zinc saturée à  $14^{\circ}$ . Ce couple constituait une unité d'un ordre supérieur, équivalant à 55 unités thermo-électriques, quelles que fussent ses dimensions.

La figure 1426 représente l'ensemble de l'appareil.  $AA'$  est la pile thermo-électrique,  $X$  le couple qu'on veut lui comparer,  $R$  un rhéomètre de 2,400 tours, et  $P$ , 4 couples zinc-cadmium équivalant chacun à 55 unités thermo-électriques. Le courant du couple  $X$ , et ceux des piles  $AA'$  et  $P$  circulent en sens contraire. — On voit en  $bcc'b'$ , à droite de la figure, un des couples thermo-électriques ; il est formé d'un barreau de bismuth  $bb'$  coulé dans un tube de verre qui lui sert d'enveloppe, et d'un fil de cuivre bien recuit  $cc'$ , uni par un bout à l'extrémité de la branche  $b$ , et, par l'autre, à la branche opposée du barreau suivant. Le cuivre a été joint au bismuth, sans métal intermédiaire, en enfonçant le bout recourbé en crochet dans le bismuth tenu en fusion à son extrémité par une flamme d'alcool. Toutes les soudures du côté  $b$  plongent dans de la glace fondante ; et, pour éviter que l'électricité ne passe de l'une à l'autre, chaque couple a été enduit d'une couche isolante de cire vierge. Les branches du côté  $b'$  plongent dans de la cire maintenue en fusion dans une auge



*ob'*, par de l'eau bouillante que chauffent des lampes à alcool. Des thermomètres *t*, *t*, *t* donnent la température de la cire. M. J. Regnaud s'est assuré de l'identité de ces couples en comparant une série quelconque de 55 d'entre eux à son couple zinc-cadmium. On fait varier le nombre des couples introduits dans le circuit, au moyen d'un curseur *m* muni d'un ressort *r*, qui touche un des arcs de cuivre des couples, de manière à mettre en dehors du circuit tous ceux qui sont compris entre *r* et *A'*.

Plusieurs physiciens, entre autres M. Raoul<sup>1</sup>, ont imaginé d'autres méthodes pour comparer les forces électromotrices; nous aurons occasion d'en citer quelques-unes: par exemple, la méthode de compensation (2104).

**2102. RÉSULTATS GÉNÉRAUX.** — I. Wheatstone a reconnu que: 1° *la grandeur des éléments n'a pas d'influence sur la force électromotrice*, comme la théorie l'indique. Ainsi, avec des couples à amalgame de zinc (1857) de dimensions très-différentes, il a toujours fallu 30 tours du rhéostat pour faire passer le rhéomètre de 45° à 40°. — 2° *La proportion de zinc contenue dans l'amalgame n'a pas d'influence*; ce qui pouvait se prévoir, car changer la quantité de zinc revient à faire varier le nombre de points attaqués. Cette loi a été confirmée par M. J. Regnaud<sup>2</sup>.

II. **Nombre des couples.** — *La force électromotrice est proportionnelle au nombre des couples.* Ce principe, admis par Ohm (2069), a été vérifié par les expériences de Fechner, Pouillet, et Wheatstone, qui a vu avec ses couples à amalgame que, pour amener le rhéomètre de 45° à 40°, il fallait 30, 61, 91, 120, 150 tours du rhéostat, quand le courant était fourni par 1, 2, 3, 4, 5 couples. Poggendorff a fait une vérification semblable sur la réunion de couples de Grove et de Daniell. Rappelons que, si la force électromotrice augmente avec le nombre de couples, la *quantité d'électricité* reste la même, quand la *résistance extérieure est négligeable*. Si, dans une pile, on augmente les dimensions de certains couples, la force électromotrice ne varie pas; mais, la résistance de ces couples étant moindre, la quantité d'électricité du courant est plus grande.

III. **Diaphragmes.** — Il résulte d'expériences de M. J. Regnaud, faites sur des couples de Daniell et des couples zinc-cadmium, et avec des diaphragmes de porcelaine poreuse, terre de pipe, baudruche, diverses sortes de bois, que la nature et l'épaisseur des diaphragmes poreux n'ont pas d'influence sur la force électromotrice. M. Gaugain avait déjà constaté ce fait sur la pile de Daniell, par la méthode d'opposition. Il a aussi reconnu qu'il n'en est pas ainsi pour les couples de Wheatstone, ce que M. J. Regnaud a confirmé: tandis qu'un couple de Daniell l'emportait de 3 unités thermo-électriques sur le couple à amalgame de zinc et à diaphragme de porcelaine; ce dernier surpassait le premier de 26, 44, et 103 unités, quand son diaphragme était en terre de pipe, baudruche ou bois de hêtre. Cette exception est attribuée par M. Gaugain à un

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 317.

<sup>2</sup> Nous verrons plus loin (2115) qu'il ne faut pas qu'il y ait trop de mercure.

dépôt de cuivre, visible dans l'intérieur du vase poreux rempli d'amalgame, dans lequel pénètre du sulfate de cuivre. M. J. Regnauld ayant placé le vase poreux dans un autre de même nature, et ayant rempli l'intervalle d'une solution de sulfate de zinc, la force du couple fut indépendante du diaphragme.

**IV. Influence des dissolutions.** — 1<sup>o</sup> Wheatstone a constaté que la force électromotrice maximum d'un couple à deux liquides a lieu quand la plaque positive plonge dans une solution d'un sel du même métal ; auquel cas sa surface ne change pas de nature. Par exemple, avec un couple de cuivre et amalgame de zinc, il faut 30 tours du rhéostat pour faire passer le rhéomètre de 45° à 40°, quand le cuivre plonge dans une solution de sulfate de cuivre ; et 20 tours quand il plonge dans l'acide sulfurique dilué. Avec le platine au lieu de cuivre, il faut 40 tours, quand il plonge dans une solution de chlorure de platine, et 27 seulement dans l'eau acidulée.

2<sup>o</sup> Le même physicien a reconnu sur des couples à amalgame de zinc, que la force électromotrice est indépendante du genre de sel dans lequel plonge la lame positive, quand ce sel contient le même métal que la lame. Par exemple, si celle-ci est en cuivre, la force est la même avec le sulfate, le sulfate ammoniacal, l'acétate, le perchlorure, ou le nitrate de cuivre, quoique l'intensité magnétique du courant change beaucoup de l'une à l'autre solution, à cause des différences de conductibilité. Le nitrate seul a donné des résultats incertains, sans doute à cause de l'action de l'acide nitrique sur le mercure.

3<sup>o</sup> M. J. Regnauld a reconnu, avec des couples de Daniell et des couples zinc-cadmium, que, les deux lames plongeant dans des solutions de sels du même métal, la force électromotrice ne dépend pas du degré de concentration de la solution, depuis 1 jusqu'à  $\frac{1}{100}$ . La limite est un peu moins éloignée pour le métal qui prend le fluide positif, que pour l'autre.

4<sup>o</sup> Le même physicien a constaté, sur des couples zinc-cadmium, zinc-cobalt, zinc-nickel, zinc-aluminium, dont chaque lame plongeait dans une solution du même métal, que la force électromotrice varie très-peu quand on change l'acide du sel. Mais cette loi ne paraît être suffisamment approchée que pour les métaux très éloignés l'un de l'autre dans la série électromotrice.

**V. Nature des lames.** — 1<sup>o</sup> Soit trois métaux A, B, C dans leur ordre électromoteur, la force de la combinaison A, C des extrêmes est égale à la somme des forces des combinaisons A, B ; B, C. Cette loi a été constatée par Wheatstone sur les deux séries *potassium, zinc, cuivre* ; *potassium, zinc, platine*. Voici les nombres de tours du rhéostat donnant la force des couples :

{ Amalgame de <i>potassium</i> , sulfate de <i>zinc</i> , <i>zinc</i> amalgamé. . . . .	29 tours.
{ Amalgame de <i>zinc</i> , sulfate de <i>cuivre</i> , <i>cuivre</i> . . . . .	30
Amalgame de <i>potassium</i> , sulfate de <i>cuivre</i> , <i>cuivre</i> . . . . .	59 tours.
{ Amalgame de <i>potassium</i> , sulfate de <i>zinc</i> , <i>zinc</i> . . . . .	29 tours.
{ Amalgame de <i>zinc</i> , chlorure de <i>platine</i> , <i>platine</i> . . . . .	40
Amalgame de <i>potassium</i> , chlorure de <i>platine</i> , <i>platine</i> . . . . .	69 tours.

2° M. Joule a reconnu par la seconde méthode de Fechner, que la différence entre les forces électromotrices de deux couples contenant des métaux négatifs différents, reste constante quand ces métaux plongent dans la même solution, quel que soit l'autre métal qui complète le couple.

**2103. Remarques.** — On a fait de nombreuses observations sur les forces électromotrices des différentes combinaisons voltaïques. Les nombres donnés par les physiciens diffèrent souvent notablement; cela tient à l'imperfection des méthodes, à la polarisation différente des lames, aux impuretés des métaux, aux irrégularités du fil des rhéostats, à la concentration des liquides. Remarquons aussi, que l'intensité des courants se mesurant au moyen de rhéomètres *multiplicateurs* différents, les nombres trouvés ne peuvent être comparables. M. du Moncel a donné le moyen de passer des nombres obtenus avec un rhéomètre, à ceux qu'aurait donnés un autre instrument, de construction connue <sup>1</sup>. Le couple pris pour terme de comparaison n'est pas non plus le même. M. J. Regnauld a adopté le couple thermo-électrique bismuth-cuivre, Pouillet, son couple normal à soudures réunies par un fil de cuivre de 20<sup>m</sup> de long et de 1<sup>mm</sup> de diamètre, et dont il avait trouvé l'intensité égale à  $\frac{1}{101}$  de celle d'un couple à amalgame de zinc. Wheatstone avait trouvé sensiblement le même rapport; mais M. J. Regnauld trouve  $\frac{1}{133}$ , et il attribue cette grande différence à la nature du diaphragme, dont nous avons vu l'influence sur le couple à amalgame (2102), et à la présence des soudures réunissant les deux métaux du couple thermo-électrique. M. J. Regnauld pense que, si l'on construit le couple-unité avec toutes les précautions qu'il indique (2101), on lui trouvera toujours la même valeur. Voici d'après M. E. Becquerel, les valeurs des forces électromotrices des couples les plus usités, rapportés à l'unité thermo-électrique.

Couples de. . . . .	Wollaston,	Smée,	Grove,	Bunsen,	Daniell.
Valeurs de E. . . . .	99	121	326	819	187

Dans les couples suivants rapportés par M. J. Regnauld à son couple thermo-électrique, chaque métal plonge dans une solution dont il forme la base.

Métaux.	Nature des dissolutions salines	Valeurs de E
Zinc pur, cadmium. . . . .	sulfates . . . . .	55
	chlorures, bromures et azotates. . . . .	42
	iodures. . . . .	45
Zinc amalgamé, cadmium. . . . .	sulfates . . . . .	58
Zinc pur, cobalt. . . . .	chlorures. . . . .	114
	azotates . . . . .	94
Zinc pur, nickel. . . . .	sulfates . . . . .	127
	chlorures. . . . .	109
	azotates. . . . .	131
Zinc pur, cuivre (Daniell) . . . . .	sulfates, acétates ou chlorures. . . . .	174
	azotates . . . . .	160

<sup>1</sup> Annales télégraphiques, nos de mars-avril 1864.

**2104. Force électromotrice absolue. Méthode de compensation.** —

Pour appliquer la formule d'Ohm,  $i = E : R$ , il faudrait connaître la valeur de  $E$ , non plus par comparaison à la force électromotrice d'un couple choisi arbitrairement, mais d'une manière absolue, en exprimant  $i$  en équivalents d'électricité, ou en poids d'hydrogène dégagé dans un voltamètre en 1 minute; et les résistances en fonctions de l'unité adoptée, soit une colonne de mercure de 1<sup>mm</sup>

carré de section et de 20<sup>m</sup> de longueur. M. Pogendorff a imaginé une méthode qu'il nomme de compensation, et qui conduit directement à ce résultat :

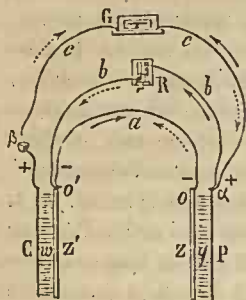


Fig. 1427.

Considérons deux couples : l'un à courant constant ZP (fig. 1427), de Grove, par exemple, l'autre CZ' que l'on veut étudier. On réunit ces deux couples par leurs pôles de même nom, au moyen du fil  $a$ , et du fil  $ce$  qui contient un rhéomètre  $G$ , et peut être interrompu en  $\beta$ ; un troisième fil  $bb$ , comprenant un rhéostat  $R$ , réunit les lames  $Z'$  et  $P$ . Le couple constant ZP fournit un courant qui circule suivant  $= abo'ao$ , et dont une partie est dérivée

en  $xc\beta o'ao$ . Les intensités  $i$  et  $D$  des deux courants sont données par les formules [2] (2072), dans lesquelles nous remplacerons  $L$  par  $b + a$ , et l'intervalle de dérivation  $d$  par  $b$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  étant les longueurs réduites exprimant les résistances du fil  $a$ ; du fil  $b$  et de la pile ZP; du fil  $c$  et de la pile CZ'. L'intensité  $I$ , dans le circuit  $abo'ao$ , quand il n'y a pas de circuit dérivé, étant  $I = \frac{E}{a + b}$

d'après la loi d'Ohm, ces formules donnent, en désignant par  $S$  la quantité  $(c + b)a + cb$ ,

$$i = I \frac{(a + b)c}{(c + b)(b + a) - b^2} = \frac{Ec}{(c + b)a + cb} = \frac{Ec}{S}, \quad \text{et } D = \frac{Eb}{S}$$

Le couple CZ' fournit aussi un courant suivant  $\beta czoao'$  dont une partie est dérivée en  $abo'$ . Ici l'intervalle de dérivation est  $o'oz = a$ , et  $L$  est égal à  $a + c$ , et  $l$ , à  $b$ . Les courants ont les directions des flèches ponctuées; les intensités  $i'$ ,  $D'$  de ceux qui circulent en  $a$  et  $b$  sont données par les formules [2], celle,  $I'$ , du courant en  $c$ , par la formule [1] (2072), et l'on a

$$i' = I \frac{(a + c)b}{(b + a)(c + a) - a^2} = \frac{E'b}{S}, \quad D' = \frac{E'a}{S}, \quad I' = \frac{E'(b + a)}{S}$$

Les deux courants  $D$  et  $I'$  qui passent par le rhéomètre  $R$  marchant en sens

contraire, on disposera le rhéostat R de manière que l'aiguille reste au repos, quand le circuit, d'abord interrompu en  $\beta$ , sera subitement fermé. On aura alors  $D = I'$ , ou  $\frac{E'}{E} = \frac{b}{b+a}$ , qui donne le rapport entre les forces électromotrices des deux couples.

Remarquons, en outre, que les deux courants  $i$  et  $D'$  qui traversent le fil  $b$  sont de même sens, et que leurs intensités réunies peuvent se déduire de la déviation  $\alpha$  d'une boussole de sinus, et l'on aura  $k \sin \alpha = i + D' = \frac{Ec + E'a}{S}$ , formule dans laquelle  $k$  est déterminé, pour la boussole employée, en fonction de l'équivalent d'électricité (2061). Remplaçant  $E$  par la valeur  $E = E' \frac{b+a}{b}$  et  $S$  par  $ca + ba + sb$ , on tire  $E' = bk \sin \alpha$ . La quantité  $b$  est donnée par le rhéostat, et s'exprime en colonne de mercure.

Comme on ne ferme le circuit en  $\beta$  que pendant un instant, au moment d'observer, il n'y a pas de polarisation préalable des lames du couple ZC, et l'on obtient sa force électromotrice absolue telle qu'elle est en ce moment.

M. Boischa et M. du Bois-Raymond ont modifié de diverses manières cette méthode de compensation<sup>1</sup>.

**2105. Force électromotrice du couple-unité.** — Les forces électromotrices des divers couples ci-dessus (2103) sont rapportées au couple thermo-électrique. Si donc on connaissait la force électromotrice absolue de ce dernier, il suffirait de la multiplier par les rapports connus, pour avoir les forces absolues des autres couples. Or, Pouillet a trouvé que son couple normal, dont la résistance équivaut à celle de 20<sup>m</sup> de fil de cuivre de 1<sup>mm</sup> de diamètre, donnait un courant dont l'intensité était 2665 fois moindre que celle du courant d'un couple de Daniell dégageant 2 centimètres cubes d'hydrogène en 500<sup>s</sup>. Comme 1<sup>cc</sup> d'eau contient 1241<sup>cc</sup>,61 d'hydrogène, il faudra, pour décomposer 1<sup>cc</sup> d'eau, ou dégager  $\frac{1}{5}$  de gramme d'hydrogène, 1241<sup>cc</sup>,61  $\times \frac{1}{5}$  2665 = 1654,445 fois la quantité d'électricité qui passe dans le couple thermo-électrique en 500<sup>s</sup>, et, par conséquent, 1654,445  $\times \frac{500}{60}$  = 13787 fois ce qui y passe en 1 minute. Cette dernière quantité est donc capable de dégager en 1 minute  $\frac{1}{13787}$  de  $\frac{1}{5}$  de gramme d'hydrogène, ou  $\frac{1}{123083}$ ; telle est l'intensité du couple thermo-électrique exprimée en poids d'hydrogène dégagé en 1 minute. La résistance du circuit de 20<sup>m</sup> est 20<sup>m</sup> :  $sc$ ; la conductibilité du fil de cuivre étant  $c$ , et sa section  $s = \frac{1}{4}\pi$ . La conductibilité du cuivre par rapport au mercure est 49,45; on a donc, pour la résistance, 20 :  $(\frac{1}{4}\pi \times 49,45) = 0,515$ ; et la formule  $E = Ri$  donne, pour la valeur absolue du couple thermo-électrique,  $E = \frac{0,515}{123083} = 0,000005147$ .

L'Association britannique, en 1861, a proposé pour unité de force électromotrice, sous le nom de *volt*, la force qui, agissant sur un circuit présentant l'unité de résistance, ou *Ohm* (2084), donne l'unité de courant, nommée *Weber*,

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 4<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 456.

c'est-à-dire un courant qui, en une seconde, décompose un milligramme d'eau. Si l'on conçoit un condensateur tel, que l'unité de force électromotrice lui communique l'unité d'électricité, ce condensateur représente l'unité de capacité électrique ou farad.

Le couple de Daniell, pris souvent pour terme de comparaison, donne en une minute, d'après M. Raoult, 0<sup>m</sup>,000718 d'hydrogène dans un circuit présentant l'unité de résistance; mais, la force de ce couple pouvant varier de 5 pour cent sans cause apparente, M. L. Clarke lui a substitué un couple formé de mercure, sur lequel se trouve une couche d'une pâte de sulfate de zinc dans laquelle est suspendu un morceau de zinc pur. Ce couple est d'une constance remarquable, et sa force électromotrice équivaut à 1,457 volt<sup>1</sup>.

**2106. Calcul du courant d'une pile.** — Quand on connaît la force électromotrice d'une pile, on peut calculer l'intensité  $i$  du courant qu'elle fournit, en équivalents d'électricité ou en poids d'hydrogène dégagé en 1<sup>m</sup>, au moyen de la formule  $i = \frac{nE}{R + nr}$ . La quantité la plus difficile à obtenir est la résis-

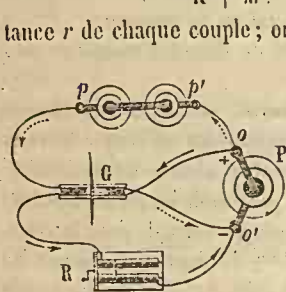


Fig. 1428.

tance  $r$  de chaque couple; on peut l'évaluer quand on connaît la conductibilité des liquides et la grandeur des lames métalliques, mais le calcul laisse beaucoup d'incertitudes, à cause de la polarisation.

Au lieu d'employer le calcul, M. du Moncel<sup>2</sup> mesure directement la résistance des couples par la méthode suivante indiquée par Poggen-dorff. On fait passer à travers deux des couples égaux à étudier  $p, p'$  (fig. 1428), le courant d'un autre couple quelconque  $P$ . Les couples  $p, p'$  sont renversés l'un par rapport à l'autre, de manière à ne pas donner de courant. Le courant de  $P$  se bifurque en  $o$  et  $o'$ ; la partie qui passe par  $p, p'$  parcourt aussi un des fils d'un rhéomètre différentiel  $G$ . L'autre partie parcourt l'autre fil de ce rhéomètre, et passe par un rhéostat  $R$ , que l'on dispose de manière que le rhéomètre différentiel soit au zéro. Alors le fil du rhéostat présente une résistance égale à la somme de celles des deux couples  $p, p'$ . — Comme ces deux couples ne sont jamais tout à fait égaux, et que leurs résistances peuvent différer d'une quantité  $x$ , on recommence en les changeant de place. Si  $t$  et  $t'$  sont les résistances données par le rhéostat dans les deux expériences consécutives, et  $r$  la résistance de chaque couple, on a successivement  $2r + x = t$ ,  $2r - x = t'$ ; d'où  $r = \frac{1}{4}(t + t')$ .

Par cette même méthode, M. du Moncel a confirmé le fait de la variation de résistance de la pile quand la résistance extérieure augmente (2074), en intro-

<sup>1</sup> Journal de physique de M. d'Almeida, t. II, p. 355.

<sup>2</sup> Études des lois des courants (1860), p. 51, et Annales Télégraphiques (1861).

duisant des longueurs égales de fil, dans les deux circuits de l'appareil (fig. 1428), au moyen duquel la résistance de la pile n'est pas dissimulée par celle de ces fils. Par exemple, avec deux couples de Daniell, il a trouvé, en ajoutant 0, 10 et 20 kilomètres de fils dans les deux circuits, les nombres 406<sup>m</sup>, 544<sup>m</sup>, 584<sup>m</sup>, représentant les résistances de la pile en longueur de fil du rhéostat. Un couple de Bunsen a donné les nombres 37<sup>m</sup> et 127<sup>m</sup>, avec 0 et 10 kilomètres de fil. On voit combien peut croître la résistance de la pile avec la longueur du circuit extérieur.

**2107. Forces électromotrices élémentaires.** — Les forces électromotrices que nous avons appris à mesurer sont dues à diverses actions chimiques qui, séparément, produiraient une certaine force électromotrice. Ainsi, dans un couple à deux liquides, il y a à considérer les actions des liquides sur les métaux, celles des liquides entre eux et celles des couches déposées par électrolyse sur les lames métalliques. La force électromotrice que l'on mesure n'est donc que l'effet résultant des actions combinées que nous venons d'énumérer. Il est naturel d'admettre que ces actions élémentaires s'ajoutent les unes aux autres, ou se retranchent quand elles donnent des courants de sens contraire. En désignant par E la force électromotrice résultante, par  $M_i, M'_i, L, M_p, M'_p$  les forces électromotrices développées par les actions des liquides sur les métaux, des liquides entre eux, et, par la polarisation des lames, on aurait

$$E = M_i - M'_i \pm L - M_p - M'_p,$$

$M_i$  correspondant au métal le plus attaqué. Le signe de L dépend du sens du courant produit par l'action mutuelle des deux liquides; les derniers termes sont négatifs, les lames polarisées donnant un courant inverse de celui du couple.

On peut évaluer, dans différents cas, les forces électromotrices élémentaires au moyen de cette loi; mais il faut d'abord qu'elle soit vérifiée par l'expérience. C'est ce qu'on peut faire en en vérifiant les conséquences. Par exemple, si l'on mesure les forces électromotrices E, E' de deux couples à un seul liquide, zinc-cuivre, zinc-fer, par la méthode de Poggendorff, avec laquelle il n'y a pas polarisation des lames (2104), on a :

$$E = Z - C, \quad E' = Z - F; \quad \text{d'où } E - E' = F - C,$$

en appelant Z, C, F les forces électromotrices élémentaires développées par le liquide au contact du zinc, du cuivre et du fer. Le second membre de la dernière équation représente la force électromotrice d'un couple formé du fer et du cuivre des deux autres; et l'on voit que, si la loi est vraie, cette force doit être égale à E - E'. Or, c'est ce que Poggendorff a constaté. Dans une expérience, il a trouvé  $E = 13,79$ ,  $E' = 7,40$ ; d'où  $E - E' = 6,39$ ; et la mesure directe de E - E' a donné, pour le couple fer et cuivre, le nombre 6. La différence est assez petite pour être attribuée aux incertitudes des expériences.

**2108. Force électromotrice de polarisation.** — Les lames polarisées

produisent un courant de sens contraire à celui qui les a polarisées. Pour déterminer la force électromotrice de polarisation des lames de platine d'un voltamètre, Wheatstone évaluait en tours du rhéostat la force du courant, quand le voltamètre faisait partie du circuit, puis quand il en était séparé; la différence des deux résultats représentait la force électromotrice produite par les électrodes du voltamètre.

Dans ces expériences, le rapport de la force électromotrice  $P$  des lames polarisées à celle d'un couple à amalgame de zinc a été trouvé égale à 2,33. La force électromotrice d'un couple étant 30, on voit qu'il faudra, pour décomposer l'eau dans le voltamètre, employer trois de ces couples, de manière à constituer une force égale à 90, qui soit capable de vaincre la force 70 que développent les lames de platine polarisées du voltamètre.

La force de polarisation est due principalement, comme nous allons le voir, à des dépôts de gaz; mais elle peut être produite aussi par des dépôts solides ou liquides, comme l'a constaté entre autres M. M. Raoult, qui a remarqué que les dépôts les plus négatifs sont ceux qui ont le moins d'affinité pour l'oxygène.

**2019. Force de polarisation, due aux gaz.** — M. Svanberg, qui a trouvé aussi à peu près le même rapport ( $P : E = 2,20$ ) sur un couple de Daniell<sup>1</sup>, a avancé que la force de polarisation ne se montre que sur les lames où il se dépose des gaz, ce que MM. Lenz et Saweljev ont aussi conclu d'un grand travail sur le même sujet<sup>2</sup>. Ils opéraient par la méthode de Wheatstone, avec un circuit ne contenant d'abord que la pile, un rhéomètre et le rhéostat; puis avec ce circuit contenant, en outre, le vase à lames polarisées. Ce vase, nommé *cellule à liquide*, renferme un cylindre de terre poreuse rempli d'un liquide dans lequel plonge une des lames; l'autre liquide, qui enveloppe le vase poreux, reçoit la seconde lame. Pour obtenir la force électromotrice due à la polarisation de chaque électrode en particulier, en admettant qu'il ne se développe une semblable force que là où il se dégage un gaz, on emploie d'abord un liquide avec lequel il y ait absence de gaz sur l'une des lames. Considérons, par exemple, la décomposition de l'eau: on opère d'abord au moyen de deux lames de platine plongeant dans l'acide nitrique; l'hydrogène, absorbé par l'acide, n'apparaît pas à l'électrode négative, et l'on mesure la force de polarisation  $p$  due au dépôt de l'oxygène. On répète l'expérience en remplissant la cellule à liquide avec de l'eau acidulée par l'acide sulfurique; il y a dépôt de gaz sur chaque électrode, et l'on obtient une force de polarisation  $P$  due aux deux dépôts réunis. La force électromotrice due à l'hydrogène seul est alors  $p' = P - p$ .

MM. Lenz et Saweljev ont trouvé que la force électromotrice due aux gaz dépend des lames sur lesquelles ils sont déposés et de l'état de leur surface, ce qui paraît tenir à ce que, le dépôt ne les recouvrant jamais entièrement, elles se trouvent en contact avec le liquide par un plus ou moins grand nombre de points, et la nature chimique du métal peut intervenir. De là aussi les différences entre

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. IV, p. 296.

<sup>2</sup> Ann. de Poggendorff, t. LXXVII, p. 497, et Ann. de ch. et de ph., 3e série, t. XX, p. 184.



les résultats trouvés par divers physiciens. — Du reste, la polarisation est plus complète quand elle est faite par électrolyse plutôt que par simple immersion dans un gaz. Par exemple, Poggendorff a trouvé 55 pour la force électromotrice d'un dépôt d'hydrogène fait par électrolyse, et M. Beetz n'a trouvé que 24, dans le cas d'une lame de platine plongée dans ce gaz. La présence de l'ozone peut bien, comme le remarque de La Rive, concourir à une aussi grande différence. M. Svanberg a trouvé, dans l'hydrogène, 12 pour des lames polies de cuivre et de platine, mais à peine 2 pour une lame de cuivre à surface rugueuse; et Poggendorff, 55 pour le platine poli, et 40 pour le platine platiné.

**2110. Variations de la force de polarisation.** — La force électromotrice de polarisation du gaz, qui dépend de la nature et de l'état des électrodes, dépend aussi du liquide qui les baigne, de leur étendue et de leur nombre. Wheatstone, avec 3, 4, 5, 6 couples à amalgame de zinc avait trouvé pour les forces de polarisation des lames d'un voltamètre, 69, 70, 71, 71 qui vont à peine en croissant. Poggendorff ayant fait varier l'intensité du courant principal, de 3 à 76, l'intensité du courant de polarisation ne varia que de 25,4 à 28,4. M. E. Becquerel a repris la question, au moyen de la balance électromagnétique (2059)<sup>1</sup>. Le fil des bobines présentant une résistance égale à 330,000 fois celle d'un couple de Grove, il put employer la méthode de Fechner (2100). L'électricité, fournie par une pile de Bunsen, traversait un vase à cellules, dont les deux compartiments, remplis soit d'acide azotique, soit d'eau contenant  $\frac{1}{10}$  d'acide sulfurique, recevaient des lames d'or ou de platine. Quand l'appareil faisait partie du circuit, la force électromotrice diminuait d'abord, et l'on attendait qu'elle fût à peu près constante. En retranchant ensuite de la force électromotrice totale, celle de la pile, on obtenait la force des lames polarisées. C'est ainsi qu'ont été obtenus les résultats suivants :

NATURE ET DIMENSIONS DES LAMES	NOMBRE DES COUPLES	FORCE ÉLECTROMOTRICE		
		des COUPLES SEULS	DU VOLTAMÈTRE à eau acidulée.	DU VOLTAMÈTRE à acide azotique.
Platine, 6 <sup>cm</sup> sur 4 <sup>cm</sup> ....	1	98 milligr, 5	73,0	18,5
	2	199,0	96,5	»
	4	394,0	101,0	47,5
Platine, 4 <sup>cm</sup> sur 1 <sup>cm</sup> ....	1	98,5	85,0	43,5
	2	199,0	110,0	»
	4	394,0	126,0	53,5
Or, 4 <sup>cm</sup> sur 20 <sup>cm</sup> .....	1	98,5	92,0	51,0
	2	199,0	131,0	»
	4	394,0	136,5	69,0

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XLVIII, p. 200.

Les nombres de ce tableau expriment des milligrammes; pour les exprimer en unités thermo-électriques, il faut les multiplier par 3,25.

Il résulte de l'inspection du tableau que : 1° la force électromotrice de polarisation,  $P$ , augmente avec l'intensité du courant. Ce qui, d'après d'autres expériences, est également vrai pour des fils de platine et d'or de 1<sup>mm</sup> de diamètre, sur lesquels les gaz se dégagent. Les valeurs de  $P$  peuvent être représentées par la formule empirique  $P = a + bi + ci^2$ ,  $i$  étant l'intensité du courant. La valeur de  $c$ , — 0,0000875, est tellement petite, qu'on peut écrire  $P = a + bi$ . — 2°  $P$  diminue quand l'étendue des électrodes augmente; ce qui se conçoit, l'intensité du courant qui passe par chaque point diminuant alors. — 3°  $P$  dépend de la nature du métal et du liquide qui le baigne. — 4° Si l'on opère avec des fils de 1<sup>mm</sup> de diamètre, au lieu de larges lames, les valeurs de  $P$  varient moins avec l'intensité, et, dans chaque cas, approchent plus rapidement d'un état constant; probablement parce que le gaz dégagé agite la couche liquide contiguë, polarisée elle-même ou chargée de gaz. — 5° Dans le vide, la force de polarisation semble un peu plus grande que dans l'air. C'est que, dans le vide, l'air dissous se dégage, et ne diminue plus la polarisation en absorbant de l'hydrogène. Nous avons vu (1854) comment Viard a prouvé l'absorption de l'hydrogène par l'oxygène de l'air, et comment elle explique l'affaiblissement de la pile dans le vide.

Il résulte de toutes les causes de variations des effets de la polarisation, qu'on ne peut que difficilement représenter ces effets par des nombres.

M. Crova a fait un grand travail sur la force électromotrice de polarisation, en suivant deux méthodes différentes<sup>1</sup>. Dans la première, il fait passer le courant d'une pile par une boussole des sinus, par un rhéostat à liquide, et par un voltamètre d'une forme particulière. Soit  $I$  l'intensité du courant,  $h$  la longueur de la colonne du rhéostat; on aura  $I = \frac{E - P}{R + l + h}$ . Si l'on enlève le voltamètre, il faudra, pour avoir la même intensité  $I$ , donner à la colonne du rhéostat une autre longueur  $h'$ ; et l'on aura  $I = \frac{E}{R + h'}$ . En égalant les deux valeurs de  $I$ , on tirera

$$\frac{P}{E} = \frac{h' - h - l}{R + h'}, \text{ ou } \frac{P}{E_1} = \frac{n(h' - h - l)}{R + h'}$$

en représentant par  $E_1$  la force d'un seul couple, de manière qu'on ait  $E = nE_1$ .

— M. Crova est arrivé aux conclusions suivantes :

La force électromotrice de polarisation d'un voltamètre à eau acidulée est égale à celle de la pile, supposée d'abord très faible, et augmente avec elle jusqu'à une certaine limite de force de celle-ci, d'autant moins grande que la

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLVII, p. 413.

température est plus élevée. A partir de cette limite, les gaz se dégagent sur les lames et les accroissements de la force de polarisation sont de moins en moins prononcés, et cette force tend vers un maximum d'autant moins élevé que la température est plus haute. M. Crova a représenté les résultats par la formule empirique  $\frac{P}{E_1} = C - Ne^{-\alpha I}$ , dans laquelle C, N et  $\alpha$  sont des constantes qu'on détermine, pour chaque appareil au moyen d'un certain nombre d'observations.

**2111. Force de polarisation des métaux par l'hydrogène.** — M. E. Becquerel a déterminé, par le moyen suivant, les forces électromotrices de polarisation de l'hydrogène déposé sur divers métaux. Il associe la lame à étudier avec une lame de zinc amalgamé, de manière à former un couple qu'il plonge dans de l'eau acidulée à  $\frac{1}{10}$ , et fait passer à travers, le courant d'une pile de 10 éléments de Bunsen arrivant par la lame. Il prend la force électromotrice E du système avant que la polarisation ait pu se produire dans le couple simple, dont il obtient la force E', en retranchant la force de la pile de Bunsen. Il mesure de nouveau la force de E' après que l'hydrogène s'est déposé sur le métal, et il trouve un nombre moindre E''; E' — E'' représente alors la force du courant inverse de polarisation de la lame. On suppose que l'oxygène ne polarise pas le zinc, avec lequel il se combine. Voici les résultats, en milligrammes, pour des lames de 10<sup>cm</sup> carrés de surface :

Métaux associés au zinc amalgamé.	} or, platine, argent, mercure, cuivre, zinc amalgamé, zinc pur.							
	Force électromotrice.	Avant polarisation.	78 <sup>m</sup> ,75	78,75	68,25	57,25	51,75	0
	Après polarisation.	29,87	35,37	28,50	17,50	24,25	-2	2,00
	De polarisation par l'hydrogène.	48,88	43,38	39,75	39,75	27,50	2	-1,75

On voit combien la polarisation par l'hydrogène affaiblit les piles à un liquide.

**2112. Force de polarisation par divers gaz.** — Pour étudier la force de polarisation du chlore, M. E. Becquerel a mis dans le vase à cellules, d'un côté de l'acide chlorhydrique pur par lequel entre le courant, de l'autre de l'acide azotique. Le chlore se dépose sur l'électrode positive, et l'hydrogène est absorbé par l'acide azotique. En retranchant de la force électromotrice totale, celle de la pile, on a celle de l'appareil à cellules, provenant de l'effet de la polarisation et de celui des deux acides agissant l'un sur l'autre. La force du vase à cellules avant la polarisation, était égale à 52,5; en en retranchant les effets de l'appareil polarisé, on avait la force de polarisation du chlore. On a trouvé ainsi :

Nombre des couples . . . . .	1	2	4	6	8	10	
Force électromotrice . . . . .	de l'appareil seul . . . . .	50 <sup>er</sup> ,5	50	46	42	41,5	42,5
	de polarisation par le chlore . . . . .	2	2,5	6,5	10,5	11	10

On voit que la force de polarisation du chlore est très-faible, et qu'elle augmente avec l'intensité du courant qui traverse les acides. — M. M. Raoult a

trouvé, pour cette force (en faisant passer le courant de 5 couples de Bunsen à travers un couple formé d'une lame de cuivre dans du bichlorure de cuivre, et d'une lame de platine pour électrode positive dans l'acide chlorhydrique concentré), la valeur maximum 21, et 27 quand il remplaçait le platine par du charbon. M. Beetz a comparé les forces électromotrices de divers gaz par la méthode de Poggendorff (2104), et en les substituant successivement à l'oxygène, dans la pile à gaz (1870) autour d'une des lames de platine, l'autre étant entourée d'hydrogène. Voici quelques résultats, l'action de l'hydrogène sur le platine étant prise pour unité :

chlore,	oxygène,	cyanogène,	a. carbonique,	air,	PLATINE,	gaz oléfiant,	a. sulfhydrique
31,49	23,98	21,16	20,97	20,5	20,13	18,36	3,05

Grove avait trouvé le même ordre. M. E. Becquerel a reconnu que la force des couples à gaz diminue rapidement. Quand on ouvre le circuit, elle reprend peu à peu sa première valeur. Nous avons vu que l'électricité des piles à gaz est due à la polarité électrique moléculaire (1871).

**2113. Force électromotrice entre deux liquides.** — Pour évaluer la force électromotrice élémentaire produite par le contact de deux liquides, M. E. Becquerel sépare ces liquides par un vase poreux, y plonge des lames de platine et mesure l'intensité du courant par la balance électromagnétique. Pour éviter la polarisation, il emploie de larges lames de platine, et opère rapidement aussitôt après la fermeture du circuit. Après avoir mis la balance en équilibre, il retire les lames, les lave, les fait rougir, et recommence l'opération. Il admet que les lames en contact avec deux liquides différents ne développent pas de courant sensible, et que tout l'effet est dû aux deux liquides ; ce qui n'est pas évident, car avec la potasse et l'acide azotique, les nombres trouvés ont été 44,5, avec l'argent ou l'or mis à la place du platine, et 60 avec le charbon. Voici les résultats les plus intenses observés, avec indication du signe de l'électricité que prend le liquide intérieur au vase poreux :

	sulfate de cuivre saturé (—).....	5,50		
	eau oxygéné (à 12 vol.) (+).....	7,50		
	chlorure de platine neutre saturé (+)....	7,75		
Eau acidulée (9 d'eau, 1 d'ac. sulfurique)	acide azotique ordinaire (+).....	de 49,25 à 21		
	acide chromique (eau 4, acide 1) (+)....	27,80		
	eau chlorée saturée à 44° (+).....	37,25		
	Proto-sulfate de fer.....	eau chlorée à 44° (+).....	47,00	
Acide chlorhydrique.	acide azotique (+).....	}	52,50	
Dissolution de potasse (eau 4, potasse 1).				55,50
Persulfure de potassium.				72,50

Il résulte de ce qui précède, que la force électromotrice des couples à deux liquides ne provient pas seulement des actions sur les métaux, mais aussi de celles des deux liquides. Par exemple, dans un couple de Grove, dont la force

est, d'après M. E. Becquerel, 98<sup>mg</sup>, une partie, égale à 20<sup>mg</sup> environ, est due aux liquides. Dans un couple à eau acidulée et sulfate de cuivre, dont la force est 58<sup>mg</sup>, les deux liquides produisent un courant opposé, représenté par 5<sup>mg</sup>,5, qui détruit une partie de l'effet des métaux. Du reste, les forces des liquides varient avec leur concentration et avec la température, et constituent principalement la partie variable des couples à deux liquides.

**2114. Forces électromotrices entre liquides et métaux.** — M. E. Becquerel a mesuré ces forces électromotrices, par deux méthodes différentes : 1<sup>o</sup> il forme un couple, d'une lame de platine, du liquide et du métal à étudier, et mesure la force de ce couple par la balance. La lame attaquée n'est pas polarisée, et l'on évite comme ci-dessus (2110) la polarisation de la lame de platine, que l'on suppose toujours ne pas produire de force électromotrice ; cependant, avec les alcalis, il faut la remplacer par une lame d'or, car le platine se comporte comme s'il était attaqué ; — 2<sup>o</sup> chaque lame est contenue dans un vase poreux, et les deux vases sont plongés dans un vase de verre rempli du liquide qui baigne le métal à étudier. Le platine plonge dans de l'acide azotique, dans lequel il n'est pas polarisé. On évalue l'effet des deux liquides l'un sur l'autre, on le retranche de celui du couple, et l'on a la force électromotrice du métal et du liquide étudiés. — Voici quelques résultats, donnés également par les deux méthodes :

MÉTAUX.	FORCES ÉLECTROMOTRICES EN MILLIGRAMMES.						
	Eau distillée.	Eau chlorée.	Eau, 500 SO <sup>3</sup> , HO, 1	Eau, 9 SO <sup>3</sup> , HO, 1	Eau, 10 HCl, 1	Eau, 4 potasse, 1.	Eau, 20 CyK, 1
Zinc amalgamé . . .	»	»	81,50	81,75	82,75	81,00	77,00
Zinc pur . . . . .	31,50	108,75	78,25	79,25	81,00	78,00	77,00
Cadmium . . . . .	»	96,00	64,00	62,75	66,75	55,00	»
Plomb . . . . .	21,00	81,50	52,75	52,75	53,25	50,00	»
Étain . . . . .	»	82,00	51,25	52,25	53,75	67,25	47,00
Fer. . . . .	17,50	83,00	50,75	48,75	49,75	50,0?	29,00
Nickel . . . . .	»	»	34,00	33,75	38,75	24,0?	»
Bismuth . . . . .	»	50,00	26,00	29,50	33,00	36,00	»
Cuivre . . . . .	10,00	61,00	26,00	27,75	36,75	33,00	71,00
Argent . . . . .	{ à peine sensible. }	55,25	9,50	17,25	27,25	0	42,00

Le mercure a donné 25 dans l'eau à  $\frac{1}{10}$  d'acide sulfurique, et l'on a trouvé des résultats nuls pour le platine dans tous les liquides, sauf dans l'eau contenant  $\frac{1}{5}$  de potasse.

Le métal attaqué prend toujours l'état négatif, et l'électricité dégagée est d'autant plus abondante que l'action chimique est plus vive. On voit que l'ordre des métaux, relativement aux forces électromotrices, est généralement le même

avec tous les liquides. Le fer, le nickel, le cobalt donnent avec la potasse des actions qui décroissent rapidement; c'est qu'ils deviennent passifs (1985). Le zinc et le plomb conservent le même rapport de force électromotrice,  $\frac{2}{3}$  environ, avec tous les liquides. La quantité d'acide sulfurique mêlé à l'eau a peu d'influence, car les résultats sont à peu près les mêmes pour les deux solutions employées, sauf avec l'argent.

En prenant la différence des forces électromotrices de deux métaux dans un même liquide, on aurait la force du couple formé par ces métaux dans ce liquide avant toute polarisation. Après la polarisation de la lame la moins attaquée, il faudrait retrancher l'effet dû au dépôt d'hydrogène. Si le couple était à deux liquides, il faudrait aussi tenir compte de l'action des liquides. En faisant ce calcul pour certaines associations de métaux dans divers liquides, on peut trouver des inversions (1842). Nous remarquerons enfin que les lois IV et V énoncées ci-dessus (2102) s'appliquent particulièrement aux actions des liquides sur les métaux.

**2115. Relation entre les forces électromotrices et la chaleur chimique.** — Nous avons vu (1935) que la quantité totale de chaleur,  $Q$ , produite dans un circuit par le passage de l'électricité, en un temps  $\theta$ , est donnée par la formule  $Q = KRi^2\theta = K\frac{E^2}{R}\theta$ ; en remplaçant  $i$  par sa valeur  $i = E : R$ . Si  $\theta$  est le temps employé à produire un équivalent d'électricité, on aura  $i\theta = c$ ,  $c$  étant une constante, d'où l'on tire  $\theta = c : i = cR : E$ ; valeur qui, portée dans l'expression de  $Q$ , donne  $Q = CE$ , en réunissant les deux constantes en une seule  $C$ . La quantité de chaleur dégagée est donc proportionnelle à la force électromotrice. M. E. Becquerel a cherché à vérifier cette relation en comparant les nombres qu'il a trouvés pour  $E$ , aux valeurs de  $Q$  données par MM. Favre et Silbermann (II, 1307). En représentant par 100 les valeurs de  $E$  et de  $Q$  pour le zinc, il a trouvé la loi exacte, avec le zinc et le plomb, dans l'acide sulfurique dilué ou dans l'eau chlorée. Le fer, le cuivre et l'argent ont donné des valeurs de  $E$  et de  $Q$  très différentes; mais il est bien difficile de connaître la nature de l'action chimique produite; par exemple, le cuivre ou l'argent dans l'eau chlorée forment à la fois des protochlorures et des bichlorures, et dans une proportion inconnue.

MM. Marié-Davy et L. Troost ont étudié la même loi en comparant les valeurs de  $Q$  déduites de la force électromotrice, à celles qui ont été trouvées par MM. Favre et Silbermann. Quand cela se pouvait, ils formaient un couple avec les substances devant agir chimiquement, et mesuraient la force électromotrice. Le plus souvent, ils faisaient passer à travers les substances à étudier le courant d'une pile de force  $E$ , courant qui provoquait des actions chimiques, qui n'auraient pas eu lieu spontanément. Ils mesuraient la force électromotrice  $E'$  du système, et prenaient la différence  $E - E'$ , qui représentait le résultat cherché.

Les expériences faites sur les actions d'une douzaine d'acides agissant sur la potasse, la soude, l'ammoniaque et l'oxyde de zinc, ont toujours donné des

valeurs de  $Q$  à peu près égales. Les différences étaient de  $\frac{1}{50}$  en moyenne; ce qui s'explique par les incertitudes des expériences, et particulièrement du calcul de la chaleur produite dans les nombreuses actions chimiques qui se succèdent. MM. Marié-Davy et Troost ont conclu de leur travail qu'on peut légitimement employer les forces électromotrices pour mesurer les quantités de travail moléculaire et les quantités de chaleur qui en résultent<sup>1</sup>.

**2116. Conséquences.** — M. Favre, en partant de la loi qui précède, a rendu compte de ce fait, qu'un seul couple de Grove suffit pour décomposer l'eau, tandis qu'un couple de Wollaston ou un couple de Daniell ne peuvent le faire. Pour décomposer un équivalent d'eau, il faut que l'action chimique du couple fournisse la quantité de chaleur qui se dégage dans la formation de cet équivalent, soit 34462 calories. Or, dans le couple de Grove, il y a d'abord formation de sulfate de zinc, qui donne 53258 calories pour un équivalent de zinc dissous, et il faut en retrancher la chaleur enlevée par le dégagement de l'oxygène de l'acide azotique réduit. Si cet acide devient  $\text{AzO}^1$  ou  $\text{AzO}^3$ , cette quantité est 6885 ou 13634; de sorte que le nombre des calories fourni par le couple est au moins de 39624, supérieur à 34462. — Dans le couple de Wollaston, de la chaleur de sulfatation du zinc, 53258, il faut retrancher celle qu'absorbe le dégagement de l'hydrogène, ou 34462; et dans le couple de Daniell, celle qu'absorbe la réduction du cuivre, ou 29605, et il ne reste, pour le premier, que 18796 calories, et, pour le second, que 23653.

**Métaux amalgamés.** — Nous avons vu qu'une lame de zinc amalgamé donne, dans un couple, plus d'électricité qu'une lame de zinc distillé (1851); ce qui revient à dire que, dans un couple formé de ces deux lames, celle qui est amalgamée prendrait le fluide négatif. M. J. Regnaud explique ce résultat au moyen des principes précédents. Il remarque que le zinc, liquide dans l'amalgame, contient toute la *chaleur latente de liquidité*, et n'a plus à la perdre quand il se dissout dans l'eau acidulée. Cette chaleur se retrouve donc dans le circuit, et représente un certain travail, qui peut être utilisé soit à décomposer l'eau, soit à faire rougir un fil. La combinaison du zinc avec le mercure a bien dû dégager une certaine quantité de chaleur, mais elle est moindre que celle qu'absorbe la liquéfaction; car M. J. Regnaud a constaté que l'amalgamation du zinc produit du froid, et M. Favre a trouvé directement que le zinc amalgamé dégage 18796 calories en se dissolvant dans l'acide sulfurique, tandis que le zinc pur n'en dégage que 18444. — M. Gaugain a reconnu que le cadmium amalgamé est, contrairement au zinc, moins attaqué que le cadmium pur; c'est qu'il dégage de la chaleur en s'amalgamant; sa chaleur latente de fusion étant moindre que la moitié de celle du zinc. M. J. Regnaud, qui a examiné au même point de vue une dizaine de métaux, a toujours vu ceux qui, en s'amalgamant, dégagent de la chaleur, se comporter comme le cadmium, et ceux qui produisent du froid, se comporter comme le zinc. M. Gaugain a, du reste, reconnu que

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIII, p. 423.

l'amalgame d'un même métal peut augmenter, diminuer ou ne pas modifier sa force électromotrice, suivant la proportion de mercure; et que la proportion de zinc unie au mercure dans un amalgame a une influence marquée sur la force électromotrice; de sorte que la loi énoncée plus haut (2102) n'est exacte que lorsque la proportion de mercure n'est pas trop grande<sup>1</sup>.

## II. Comparaison des quantités d'électricité. — Unités diverses.

**2117. Des quantités d'électricité.** — La quantité d'électricité fournie par une pile ne dépend pas du nombre de ses couples quand il n'y a pas de résistance extérieure (1846); mais elle change d'une combinaison voltaïque à une autre, et, pour des couples qui ne diffèrent que par la grandeur des lames métalliques, elle est sensiblement proportionnelle à l'étendue de ces lames (1996).

Les quantités d'électricité nécessaires pour produire les effets chimiques, magnétiques et physiques, étant liées entre elles par des relations simples que nous avons fait connaître, il sera toujours facile de connaître le nombre d'*équivalents* d'électricité passant en 1<sup>s</sup>, qui produisent une certaine intensité magnétique donnée par un rhéomètre déterminé, ou qui transportent une certaine quantité de liquide à travers une cloison poreuse; car nous avons vu (1962 et 1991) que ces effets sont proportionnels entre eux et au nombre d'équivalents d'électricité. La quantité de chaleur dégagée dans un fil métallique est proportionnelle au carré de l'intensité magnétique (1935), et par conséquent au carré du nombre d'équivalents d'électricité, auquel on pourra la rapporter. Les effets physiologiques ne sont pas aussi faciles à comparer aux autres. Matteucci avait cru reconnaître que l'étendue de la contraction dans des membres de grenouille, ou l'effet physiologique, était proportionnel à l'intensité du courant; mais l'effet dépend non-seulement de la quantité d'électricité lancée à travers les organes, mais surtout de la manière dont varie l'intensité du courant en traversant les nerfs, suivant que l'électricité est introduite plus ou moins brusquement.

Nous allons nous occuper d'évaluer les *quantités* d'électricité dynamique engendrées par un travail chimique donné. Nous avons vu (2105) comment Pouillet a reconnu que la quantité d'électricité qui décompose un équivalent d'eau, ou de tout autre électrolyte, d'après la loi de Faraday, est égale à 13787 fois la quantité produite en 1 minute par son couple thermo-électrique normal, nombre qui représente aussi la quantité dégagée par l'oxydation d'un équivalent de zinc (1995). Mais on ne se fait qu'une idée confuse de la quantité prise pour unité, à cause de l'immense rapidité de propagation de l'électricité dynamique. On a donc cherché à comparer l'électricité produite par un travail chimique, à une charge d'*électricité statique*, dont on peut se faire une idée d'après l'intensité de la décharge qu'elle produit.

**2118. Comparaison à une quantité d'électricité statique.** — Les

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XLII, p. 430, et t. LII, p. 533.



premières expériences à ce sujet ont été faites par Faraday, et par Peltier, qui prenait pour unité d'électricité statique, la quantité capable de dévier de  $1^{\circ}$ , l'aiguille de son électromètre (1673) <sup>1</sup>. Faraday prit une batterie de 15 jarres, ayant 233 centimètres carrés de surface armée sur chaque face, la chargea par 30 tours d'une forte machine de Ramsden, et trouva qu'il fallait 800,000 décharges de cette batterie pour décomposer 0,0647 grammes; il en conclut que, pour décomposer un équivalent ou 9<sup>ms</sup> d'eau, il faudrait la quantité d'électricité accumulée dans une batterie de 197680 mètres carrés de surface armée, chargée au même degré que les 15 jarres ci-dessus. Or, cette quantité d'électricité est fournie par la dissolution de 1 équivalent de zinc. Remarquons que ce résultat n'a rien d'absolu, la force condensante d'une batterie dépendant de l'épaisseur de la lame isolante et de la forme des armatures.

Plusieurs physiciens ont pris pour terme de comparaison la charge de la *bouteille de Lane* (1670), qui représente une quantité d'électricité dont sa décharge donne une idée. M. Buff, en 1853, prit une bouteille ayant 25 décimètres carrés de surface, se déchargeant entre deux boules de 25<sup>mm</sup> de diamètre, distantes de 1<sup>cm</sup>. Elle était chargée par l'intérieur, et l'armature extérieure communiquait avec une des extrémités du fil d'une boussole des tangentes, dont l'autre extrémité était unie au sol. Pendant le mouvement de la machine, les décharges étaient assez rapprochées pour que l'aiguille de la boussole prit une position à peu près constante, et l'on comptait combien il y avait de décharges dans un temps donné. On faisait ensuite passer à travers de l'eau, un courant voltaïque capable de produire la même déviation, et l'on mesurait la quantité de gaz dégagée pendant le même temps. M. Buff a reconnu ainsi que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un équivalent d'eau ou 9<sup>ms</sup>, était égale à 45 480 charges de sa bouteille électrométrique, ou à la charge d'un condensateur ayant 11 370 mètres carrés de surface armée.

MM. Weber et Kohlrausch <sup>2</sup> ont aussi cherché à évaluer les quantités d'électricité, par une méthode dont nous allons essayer de donner une idée. Ils ont d'abord essayé de décharger une bouteille de Leyde à travers le fil bien isolé d'un rhéomètre, et une longue colonne d'eau donnant à la décharge une durée sensible, mais très petite par rapport au temps d'une oscillation de l'aiguille; de sorte que celle-ci recevait une impulsion indépendante de la durée de l'écoulement de l'électricité, et proportionnelle à sa quantité. Ils ont ensuite calculé, au moyen de formules particulières, le temps très court pendant lequel un courant d'intensité connue devait parcourir le rhéomètre pour donner la même impulsion à l'aiguille aimantée. Ils ont trouvé ainsi, qu'il passe, pendant l'unité de temps, par chaque section d'un fil conducteur parcouru par le courant pris pour unité d'intensité électromagnétique, 3504 fois la quantité d'électricité capable de charger la bouteille. L'unité d'intensité électromagnétique est l'intensité

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 422.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, t. LXIX, p. 115.

d'un courant qui, traversant un conducteur circulaire ayant une surface égale à l'unité, agit sur une molécule de fluide magnétique très éloignée, de la même manière qu'un aimant très court ayant un moment magnétique égal à l'unité.

Les mêmes observateurs ont ensuite rapporté la quantité d'électricité, 3504, à une unité d'électricité statique, qui est la quantité qui, concentrée en un point et agissant sur une quantité égale du même fluide concentrée en un autre point placé à l'unité de distance, exerce une répulsion égale à l'unité de force. Pour faire cette transformation, ils ont évalué la charge de la bouteille de Leyde, au moyen de cette nouvelle unité. Pour cela ils ont enlevé à la bouteille une partie de son électricité, au moyen d'une sphère isolée, de 159<sup>mm</sup>, 46 de diamètre, qu'ils ont chargée quatre fois de suite en lui faisant toucher l'armature intérieure, et la déchargeant à chaque fois. La tension de l'armature donnée par un électroscope très sensible, allait en diminuant, et on concluait de la diminution, le rapport suivant lequel la charge se partageait entre l'armature et la sphère. La charge de celle-ci se déterminait ensuite avec la balance de torsion, par la méthode du plan d'épreuve, et on la rapportait à l'unité de fluide électrique, en connaissant, par des expériences préalables, le moment du couple de torsion correspondant à un angle donné. Au lieu du plan d'épreuve, on employait une petite boule égale à celle de l'aiguille de la balance. Les formules qui donnent le partage de l'électricité entre deux sphères en contact, ont donné le rapport de 1 à 0,0079377 entre la quantité d'électricité que conservait la sphère, et celle que prenait la petite boule ; et comme le rapport de la charge de la sphère à celle de l'armature de la bouteille était de 1 à 0,03276, on en concluait le rapport entre la charge de cette dernière et celle de la petite boule. Enfin on déterminait le nombre d'unités qui correspondait à la charge de cette dernière. La moyenne des expériences a donné 22171000 unités, pour la charge de la bouteille, et, par suite, 155370 millions pour la quantité d'électricité positive ou négative qui passait par chaque section d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité électromagnétique.

M. Weber prend pour *unité d'intensité électrochimique*, l'intensité du courant qui décompose pendant l'unité de temps 1<sup>ms</sup> d'eau, ou une quantité équivalente d'un électrolyte quelconque ; il trouve que cette unité correspond à 106,66 unités électromagnétiques. Il faut donc, pour décomposer 1<sup>ms</sup> d'eau, 16 572 billions d'unités, et 9 fois plus, ou 149 148 billions, pour un équivalent d'eau. Cette dernière quantité, accumulée sur un nuage placé à 1000<sup>m</sup> de hauteur, et agissant sur une quantité égale de fluide contraire placée à la surface de la terre, exercerait une attraction équivalente à 2268 000 kilogrammes !

On doit conclure de ce qui précède, que les piles galvaniques dégagent des quantités prodigieuses d'électricité, mais ne donnent que de faibles tensions, à moins qu'on n'emploie un très grand nombre de couples ; tandis que les machines à frottement, qui donnent de fortes tensions, ne produisent que de très faibles quantités d'électricité. Cependant, certaines machines hydro-électriques approchent, sous ce rapport, des piles proprement dites.

## CHAPITRE VII

## ÉLECTROMAGNÉTISME ET ÉLECTRODYNAMIQUE

« Qu'eussent dit Newton, Halley, Dufay, Épinus, Franklin, Coulomb, si quelqu'un leur avait annoncé qu'un jour viendrait où, à défaut d'aiguille aimantée, des navigateurs pourraient se diriger en observant des courants électriques ?..... »

(ARAGO, *Biographie d'Ampère.*)

## 1. — ACTION DES COURANTS SUR LES AIMANTS

## I. Lois des actions électromagnétiques.

**2119. — Découverte de l'électromagnétisme.** — Les physiciens n'ont possédé pendant longtemps que des notions vagues sur la corrélation entre le magnétisme et l'électricité. On avait bien remarqué quelques effets de la foudre et des décharges des batteries, sur des fils d'acier et sur des aiguilles aimantées ; on avait vu le feu Saint-Elme agiter l'aiguille de la boussole ; mais ces faits étaient isolés et sans lien théorique. W. Gilbert, en 1660, dans sa *Physiologia nova*, dit que le magnétisme et l'électricité sont deux manifestations d'une force unique inhérente à toute matière. Après la découverte de la pile, on essaya de faire agir ses pôles sur les aimants ; mais comme on avait soin de ne pas fermer le circuit, pour ne pas décharger la pile, l'électricité dynamique n'ayant pas encore été reconnue, on ne put obtenir que des effets d'attraction électrostatique. Ersted, professeur à Copenhague, guidé par certaines théories de Ritter, qui régnaient alors en Allemagne, dans lesquelles on admettait que la terre avait des pôles électriques, annonça, en 1807, que l'électricité dans son état le plus latent devait agir sur l'aiguille aimantée, mais il n'avait fait à ce sujet que des essais infructueux, lorsque en 1819, dans une leçon publique, il vit une aiguille aimantée s'agiter pendant qu'on faisait rougir à une petite distance un fil de platine, au moyen de la pile ; expérience dans laquelle le circuit était nécessairement fermé. Il reproduisit ce phénomène après la séance, et se trouva dès lors en possession du fait capital de la déviation de l'aiguille aimantée par le courant.

Ersted expliqua ce phénomène par l'action d'un tourbillon de fluide circulant

autour du fil ; explication inadmissible. Aussi trouva-t-il d'abord beaucoup d'in-crédules, d'autant plus que les premiers qui voulurent répéter l'expérience ne purent réussir, parce qu'ils ne fermaient pas le circuit. Enfin, A. de La Rive ayant réuni les pôles, reproduisit le phénomène en présence de Pictet, Prévost, de Saussure, Arago..... Ce dernier répéta, en 1820, devant l'Académie des sciences de Paris, l'expérience d'Ærsted, et dès lors la déviation de l'aiguille par l'électricité circulant dans le fil conjonctif, prit rang dans la science. Ampère réunit dans un seul énoncé les différentes circonstances du phénomène, en disant que l'aiguille tend à se mettre en croix avec le courant, de manière que son pôle nord soit à la gauche du dernier ; cette gauche étant, comme nous l'avons dit (1829), celle d'un observateur traversé par le courant des pieds à la tête et regardant l'aiguille aimantée. Schweigger imagina le multiplicateur ; Colladon fit voir, avec cet instrument, que l'aiguille aimantée peut être déviée par le courant des machines à frottement. Ampère définit l'électricité dynamique et la distingua de l'électricité statique, et il se fit dès lors un immense mouve-

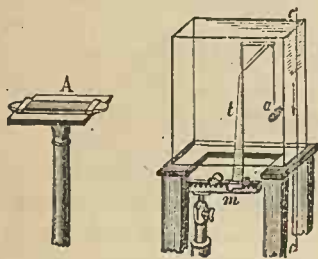


Fig. 1429.

ment scientifique, pendant lequel les découvertes se succédèrent avec une rapidité admirable. Plusieurs sciences nouvelles, fécondes en applications, prirent naissance : l'électromagnétisme, qui est l'objet de ce chapitre ; l'électrochimie et l'électrophysiologie, dont nous avons déjà parlé, et dont les progrès furent singulièrement favorisés par l'invention du rhéomètre que nous avons eu si souvent à citer.

#### 2120. LOIS DES ACTIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES. —

L'action d'un courant sur une aiguille aimantée dépend de la quantité d'électricité, et par conséquent de la grandeur des couples de la pile. Cette action diminue avec la distance, suivant des lois qui ont été trouvées de la manière suivante, par Biot et Savart :

Un petit barreau d'acier court et fortement aimanté *a* (fig. 1429), rendu astatique par un aimant *A* convenablement placé (1507), est suspendu par un fil de cocon à un support *t*. Un fil métallique vertical *cc*, assez long pour qu'on puisse le regarder comme indéfini dans les deux sens, est parcouru par un courant. L'aimant *a* se place de lui-même perpendiculairement à la plus courte distance de son centre au fil *cc*, dont on peut plus ou moins l'éloigner au moyen d'un pignon denté et d'une crémaillère *m* portant une division. Si l'on dérange l'aimant *a* de sa position d'équilibre, il oscille, et le carré du nombre des oscillations accomplies pendant un temps donné est proportionnel à la force électromagnétique (1508). Les piles à courant constant n'étant pas alors connues, pour se mettre à l'abri des effets des variations du courant, on employait la méthode des observations alternées. Biot et Savart ont trouvé ainsi que l'action du courant varie en raison inverse de la simple distance, en supposant cette

distance assez grande pour que l'action soit la même sur les deux pôles de l'aimant  $a$  dans toutes ses positions.

Si l'aiguille aimantée n'était pas astatique, on orienterait l'appareil de manière que l'aiguille en équilibre fût dans le méridien magnétique, et l'on tiendrait compte de l'action terrestre par la méthode connue (1508).

**Courant angulaire.** — Si le courant se compose de deux parties indéfinies  $ab$ ,  $ac$  (fig. 1430) également inclinées par rapport au plan horizontal qui contient l'aimant, l'intensité de l'action exercée sur ce dernier varie toujours en raison inverse de la distance du point  $a$  au centre de l'aimant, et de plus cette intensité est proportionnelle à la tangente trigonométrique de la moitié de l'angle que fait le courant avec le plan horizontal, c'est-à-dire à  $\tan \frac{1}{2} \alpha$ . Si l'on a  $\alpha = 90^\circ$ , l'intensité est égale à 1. Si  $\alpha = 0$ , l'intensité est nulle; ce que l'on conçoit facilement, les deux parties  $ab$ ,  $ac$  du courant étant alors appliquées l'une sur l'autre et s'entre-détruisant.

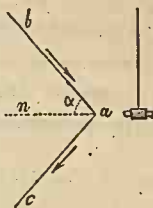


Fig. 1430.

**2121. Action d'un élément de courant sur un élément magnétique.** — Nous ne retrouvons pas ici la loi générale des actions variant en raison inverse des carrés des distances; mais l'effet observé est complexe, car il représente la somme des actions inégales exercées sur l'aiguille par tous les éléments du fil. Laplace, en partant des lois expérimentales de Biot et Savart, a trouvé, par le calcul, que l'action  $f$  d'un élément  $mn$  de courant (fig. 1431) sur une particule magnétique  $M$ , à une distance  $Mo = r$ , est donnée par la formule :

$$f = \frac{Mc\delta \sin \varphi}{r^2},$$

dans laquelle  $M$  est l'intensité magnétique du point  $M$ ,  $c$  l'intensité du courant, et  $\delta$  la longueur de l'élément  $mn$ . Cette formule montre que l'action d'un élément de courant varie : 1° en raison inverse du carré de la distance; 2° proportionnellement au sinus de l'angle  $\varphi$  de sa direction avec la ligne qui joint son milieu au point  $M$ . Laplace a trouvé, de plus, que cette action est dirigée suivant la perpendiculaire au plan  $Mmn$  passant par le point  $M$  et par l'élément. Comme vérification, on peut montrer que cette formule conduit aux lois de Biot et Savart.

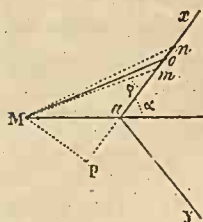


Fig. 1431.

En effet, soit  $ds$  un élément du courant  $xy$  (fig. 1431), et  $k$  une constante qui dépend de son intensité et de celle du point magnétique  $M$ ; on a, d'après la formule,  $f = \frac{k \sin \varphi \cdot ds}{r^2}$ . Pour exprimer  $ds$  et  $r$  en fonction de la variable  $\varphi$ , abaissons  $MP$  perpendiculaire sur  $ax$ ; les triangles rectangles  $MPa$  et  $MPo$  donnent, en représentant par  $D$  la distance  $Ma$ ,  $MP = D \sin \alpha = r \sin \varphi$ ; d'où

$r = \frac{D \sin \alpha}{\sin \varphi}$ . Le triangle  $MPo$  donne encore  $Po = r \cos \varphi = D \sin \alpha \cdot \cot \varphi$ , en remplaçant  $r$  par sa valeur. Prenant la différentielle du second membre, il vient  $ds = -\frac{D \sin \alpha \cdot d\varphi}{\sin^2 \varphi}$ . Portant les valeurs de  $ds$  et de  $r$  dans l'expression de  $f$ , elle devient  $f = -\frac{k \sin \varphi \cdot d\varphi}{D \sin \alpha}$ . Intégrant le second membre par rapport à  $\varphi$ , depuis  $\varphi = 0$ , qui correspond à l'élément situé à l'infini sur  $ax$ , jusqu'à  $\varphi = \alpha$ , qui correspond au premier élément en  $a$ , et, doublant pour avoir l'action des deux parties  $ax, ay$  du courant, nous aurons enfin  $\frac{2k}{D \sin \alpha} (1 - \cos \alpha) = \frac{2k}{D} \operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha$ ; formule qui exprime les lois de Biot et Savart.

**2122. Action d'un courant sur une aiguille mobile dans un plan perpendiculaire à ce courant.** — Cherchons l'action d'un courant rectiligne

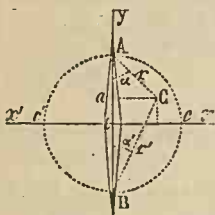


Fig. 1432.

indéfini sur une aiguille aimantée  $AB$  (fig. 1432) mobile autour de son centre  $o$  dans un plan perpendiculaire à ce courant, dont elle est peu éloignée. Soit  $C$  l'intersection du courant avec le plan de la figure,  $r, r'$  les distances  $CA$  et  $CB$ , et  $2l$  la distance  $AB$  des pôles magnétiques de l'aiguille. Si le courant marche d'avant en arrière de la figure, il agira par attraction sur le pôle  $A$ , qui est à sa gauche, dans une direction *perpendiculaire* à  $CA$  (2121) et avec une intensité égale à  $k : r$  (2120),  $k$  étant une constante qui dépend de la force magnétique du pôle  $A$  et de l'intensité du courant. Cette force donne deux composantes : l'une, suivant  $Ay$ , qui ne peut faire tourner l'aiguille; l'autre, perpendiculaire à la première, égale à  $\frac{k}{r} \cos \alpha$ , et ayant pour moment, par rapport au point  $o$ ,  $l \frac{k}{r} \cos \alpha$ . De même, le moment de la composante parallèle à  $ox$  appliquée en  $B$ , est  $l' \frac{k}{r'} \cos \alpha'$ . Ces moments sont de signe contraire, et leur différence, en vertu de laquelle l'aiguille est sollicitée à tourner dans le sens  $Ae$ , est  $D = lk \left( \frac{\cos \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha'}{r'} \right)$ . Si le courant est assez éloigné de l'aiguille pour qu'on puisse supposer  $r = r'$ , il faudra, pour que  $D$  soit nul, c'est-à-dire pour qu'il y ait équilibre, que  $\alpha = \alpha'$ , et l'aiguille sera perpendiculaire à la droite  $Co$ .

Remplaçons les quantités  $\cos \alpha, \cos \alpha', r, r'$  par leur valeur en fonction des coordonnées  $x$  et  $y$  du point  $C$  par rapport aux axes  $ox$  et  $oy$ . Les triangles  $\Delta Ca, \Delta Cb$  donnent  $r \cos \alpha = l - y, r' \cos \alpha' = l + y$ ; on a de plus,  $r^2 = x^2 + (l - y)^2, r'^2 = x^2 + (l + y)^2$ . Substituant dans la valeur de  $D$ , et réduisant au même dénominateur, il vient

$$D = lk \left( \frac{l - y}{x^2 + (l - y)^2} - \frac{l + y}{x^2 + (l + y)^2} \right) = \frac{2kly}{r^2 r'^2} (l^2 - y^2 - x^2).$$

La valeur de  $D$  est nulle, et l'aiguille n'est sollicitée d'aucune manière, quand

on a  $y = 0$ , ou bien  $x^2 + y^2 = l^2$ . L'équation  $y = 0$  représente la droite  $xx'$  perpendiculaire à l'aiguille; la seconde représente une circonférence ayant son centre au point  $o$  et passant par les points A et B. Il n'y aura donc pas d'action exercée sur l'aiguille quand le courant C rencontrera la droite  $xx'$  ou la circonférence  $AeBe'$ , qu'on peut appeler des *lignes neutres*. Quand ce courant passera dans l'intérieur de la circonférence et dans l'angle  $Aoc$ , on aura  $y^2 + x^2 < l^2$ , et,  $y$  étant positif, il en sera de même de la valeur de D; l'aiguille tournera donc dans le sens  $Ae$ .

Si le point C est dans l'angle  $coB$ ,  $y$  est négatif, et le pôle B se rapproche du courant. L'équilibre est donc instable quand le point C est sur  $ox$ . Si ce point, toujours dans la circonférence de rayon  $l$ , est dans l'angle  $Aoc'$ , le pôle austral se trouve à droite du courant, qui va d'avant en arrière, et la valeur positive de D correspond à la répulsion du pôle A par le courant. Le mouvement change de sens quand  $y$  est négatif, c'est-à-dire quand C est dans l'angle  $c'oB$ , et l'équilibre est stable quand ce point est sur  $ox'$ .

Si le courant passe en dehors de la circonférence  $AeBe'$ , on a  $y^2 + x^2 > l^2$ , et les mouvements dans les mêmes angles sont inverses de ce qu'ils sont quand le courant passe dans l'intérieur de la circonférence; par conséquent, l'équilibre est stable sur  $cx$  et instable sur  $c'x'$ . Pouillet a étudié en détail et vérifié par l'expérience tous ces résultats.

On voit que les points A et B, où la circonférence  $AeBe'$  coupe l'aimant, sont des *points neutres* et en même temps les pôles magnétiques de l'aimant. Or, M. Bertin a reconnu que les points neutres donnés par l'expérience ne se confondent pas avec les pôles magnétiques déterminés par la méthode de Coulomb (1514), et qu'ils sont moins éloignés des extrémités. Cela tient à ce que les actions du courant sur les divers éléments magnétiques de l'aimant ne sont pas parallèles, comme on le suppose dans la définition des pôles. Le point d'application de la résultante de ces actions ne peut donc se confondre avec les pôles magnétiques<sup>1</sup>.

**2123. Attraction et répulsion d'un aimant par un courant.** — Si l'aiguille aimantée, au lieu d'être mobile autour de son centre, peut se déplacer tout d'une pièce, elle éprouve de la part du courant perpendiculaire, des attractions ou des répulsions, qui ont été découvertes par M. Boisgiraud, et qui s'expliquent au moyen des mêmes lois<sup>2</sup>. Considérons d'abord une aiguille aimantée AB (fig. 1433) suspendue verticalement à un fil, et soit C la trace d'un courant horizontal marchant d'avant en arrière, de manière que le pôle nord A de l'aiguille soit à sa gauche. Si ce courant est compris entre deux plans horizontaux passant par les pôles, il y a attraction, et l'aiguille vient s'appuyer contre le fil

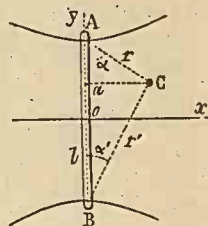


Fig. 1433.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 4<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 79.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XV, p. 279.

rhéophore C. Il y a, au contraire, *répulsion* quand le *pôle nord* se trouve à *droite* du courant; par exemple, quand ce courant passe de l'autre côté de l'aiguille. Si le courant est placé en dehors des plans horizontaux, et à une distance suffisante de ces plans, l'attraction se change en répulsion, et *vice versa*.

Pour expliquer ces résultats, adoptons les mêmes axes et les mêmes notations que dans la question précédente. L'aiguille est sollicitée par la somme  $S = \frac{k}{r} \cos \alpha + \frac{k}{r'} \cos \alpha'$  des composantes perpendiculaires à AB, agissant à chacun des pôles. Remplaçons  $\cos \alpha$ ,  $\cos \alpha'$ ,  $r$ ,  $r'$ , par leurs valeurs trouvées plus haut (2122), et réduisons au même dénominateur : la valeur de S devient  $S = \frac{k(t-y)}{x^2 + (t-y)^2} + \frac{k(t+y)}{x^2 + (t+y)^2} = \frac{2tk}{r^2 r'^2} (x^2 - y^2 + t^2)$ . Cette force est nulle, et l'on a une *ligne neutre* quand on a  $x^2 - y^2 + t^2 = 0$ ; équation qui représente une hyperbole équilatère dont les sommets sont en A et B. Entre les branches de cette courbe, on a  $x^2 - y^2 + t^2 > 0$ , et la valeur de S est positive, c'est-à-dire qu'il y a attraction. En dehors des branches, on a  $x^2 - y^2 + t^2 < 0$ , et l'action est négative, c'est-à-dire qu'elle se change en répulsion.

Si le pôle austral A était à droite du courant, au lieu d'être à gauche,  $k$  serait négatif, et les attractions se changeraient en répulsions, et *vice-versa*.

Supposons maintenant que l'aiguille ne soit mobile que suivant son axe; elle ne pourra obéir qu'aux composantes  $\frac{k}{r} \sin \alpha$ ,  $\frac{k}{r'} \sin \alpha'$  dirigées suivant cet axe. Ces composantes agissant en sens contraire, et la première étant la plus grande, leur résultante sera  $R = \frac{k}{r} \sin \alpha - \frac{k}{r'} \sin \alpha'$ . Remplaçant  $r$ ,  $r'$  par leur valeur ci-dessus, et  $\sin \alpha$ ,  $\sin \alpha'$  par  $\frac{x}{r}$ ,  $\frac{x}{r'}$ , il vient  $R = \frac{4ktxy}{r^2 r'^2}$ . Cette valeur est positive, l'aiguille marche donc de B en A; mais alors la valeur  $y$  diminuant, puisque l'axe  $ox$  se rapproche de C, la force va aussi en diminuant; elle est nulle quand le point C se trouve sur  $ox$ , et change de sens quand ce point passe du côté B; car alors  $y$ , et par conséquent R, deviennent négatifs. Il y a donc équilibre stable quand le courant est à égale distance des deux pôles. Si le pôle nord se trouvait à droite du courant,  $k$  serait négatif, l'aiguille serait repoussée de A en B, et l'équilibre quand le courant est sur  $ox$ , serait instable. — Tous ces résultats se vérifient par l'expérience; pour les observer, M. Boisgiraud fait flotter l'aiguille sur l'eau, dans le méridien magnétique, et tend perpendiculairement au-dessus, un fil rhéophore horizontal.

Au lieu d'un fil rectiligné, on peut employer un fil recourbé dans un plan perpendiculaire à l'aiguille; par exemple, un anneau qui enveloppe une auge étroite remplie d'eau sur laquelle elle flotte; il est évident que les mouvements et les positions d'équilibre stable ou instables seront les mêmes; mais les intensités des composantes seront différentes. On pourra, dans ce cas, faire faire plusieurs tours au fil, comme dans le multiplicateur.



Quant à la position des points neutres en A et B, M. Bertin fait voir qu'ils sont plus rapprochés des extrémités que les pôles magnétiques, et par là même raison que dans le cas précédent (2122).

II. Aimantation par les courants.

**2124. Action d'un courant sur le magnétisme neutre.** — Un courant ayant pour effet de pousser à sa gauche le pôle nord d'un aimant, c'est-à-dire le fluide magnétique austral qu'il est censé contenir, et à sa droite le fluide boréal, il était naturel d'essayer s'il pourrait décomposer le magnétisme neutre, en séparant les deux fluides. C'est ce que fit Arago, dès septembre 1820<sup>1</sup>. Ayant plongé dans la limaille de fer le fil conjonctif d'une pile, il le retira couvert d'une couche épaisse de limaille, qui se détachait dès qu'on ouvrait le circuit.

Dans cette expérience, la limaille ne se dispose pas en houpes hérissées comme lorsqu'elle s'attache à un aimant, mais elle s'étend en couche unie, dans laquelle les parcelles de fer sont arrangées en séries circulaires, qui entourent le fil rhéophore comme des anneaux. L'action du courant est nulle sur les limailles non magnétiques; ce qui exclut toute idée d'une attraction produite par de l'électricité statique. Cette action peut s'exercer à une distance sensible. Arago a pu aimanter de petites aiguilles d'acier trempé, en les plaçant en croix sur le fil rhéophore, et le pôle nord s'est toujours formé à gauche du courant. II. Davy, à peu près à la même époque, arrivait à des résultats semblables.



Fig. 1434.



Fig. 1435.

**2125. Aimantation dans des hélices.** —

Ampère, guidé par des idées théoriques que nous exposerons bientôt, obtint une aimantation plus

énergique en faisant passer le courant dans un fil enroulé en hélice autour de l'aiguille à aimanter (fig. 1434). La tige d'acier, *ab* est placée dans un tube de verre, autour duquel est enroulé le fil rhéophore.

On distingue deux sortes d'hélices : l'hélice *dextrorsum*, D, qui, ayant son axe vertical, s'enroule de droite à gauche en descendant et en avant, et l'hélice *sinistrorsum*, S, qui s'enroule au contraire de gauche à droite en descendant. Ces noms ont été donnés par les botanistes aux hélices que forment les plantes volubiles. Les vis ordinaires sont des hélices *dextrorsum*.

Il est facile de voir qu'avec l'hélice *dextrorsum*, le pôle nord de l'aimant formé, *a'b'*, est à l'extrémité *a'*, par laquelle sort le courant; car c'est là que serait la gauche d'un observateur couché sur une spire, comme la flèche *o'*, et

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XV, pp. 82, 93 et 323.

regardant l'aiguille. On voit de même qu'avec l'hélice *sinistrorsum*, S, le pôle nord, *a*, se trouve à l'extrémité par laquelle entre le courant.

Quand on veut produire une forte aimantation, on prend un fil de cuivre revêtu de soie, et on l'enroule en hélice autour du tube de verre, de manière que les spires se touchent; arrivé à l'extrémité, on enroule de nouveau le fil, en revenant, de manière à former une seconde couche de spires, et ainsi de suite. Il est vrai que les hélices ainsi disposées sont alternativement *dextrorsum* et *sinistrorsum*; mais comme le courant y entre aussi alternativement par une extrémité et par l'autre, le fluide austral est poussé du même côté par chacune des couches. Remarquons aussi qu'il faut, comme pour les rhéomètres (2054), que la résistance de la pile soit grande, pour qu'il y ait avantage à augmenter beaucoup le nombre de tours du fil. Malgré tout, on ne peut aimanter que faiblement les tiges d'acier trempé; il manque ici l'ébranlement moléculaire qui fait céder la force coercitive (1522). Du reste, *le maximum d'effet est obtenu instantanément*. Nous verrons plus loin (2129) des moyens plus énergiques d'aimanter par les courants, avec frictions.

**Points conséquents.** — Pour obtenir à volonté des points conséquents, il suffit de changer le sens de l'hélice là où l'on veut en produire. Ainsi, en *a* et *b'* (fig. 1435) il y aura des points conséquents, l'hélice étant *sinistrorsum* de *b* en *a*, *dextrorsum* de *a* en *b'*, et *sinistrorsum* *b'* en *a'*. Les points *b*, *b'* sont des pôles sud, et les points *a*, *a'* des pôles nord.

**2126. Aimantation par l'électricité des machines.** — Arago a reconnu qu'on peut aimanter des aiguilles d'acier au moyen de l'électricité de frottement. M. Ridolfi a réussi au moyen de l'écoulement continu de l'électricité d'une très forte machine. Quand celle-ci n'est pas très forte, on fait arriver l'électricité, par étincelles, sur l'extrémité de l'hélice, dont l'autre extrémité communique avec le sol. La quantité d'électricité fournie par les plus puissantes machines étant très-faibles (2118), les résultats sont bien moins prononcés qu'avec les piles voltaïques. Le meilleur moyen pour aimanter avec l'électricité ordinaire, consiste à décharger à travers l'hélice une batterie à grande surface, en donnant à la décharge une durée appréciable. Pour cela on arme l'une des extrémités de l'hélice d'une pointe qu'on approche très près de l'armature intérieure de la batterie, dont l'armature extérieure communique avec l'autre extrémité de l'hélice.

**Circunstances qui influent sur les résultats.** — Savary qui a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet<sup>1</sup>, a reconnu que l'intensité de l'aimantation dépend de la charge de la batterie et de la durée de la décharge. Cette durée ne doit être ni trop courte, ni trop longue. Ainsi, quand on produit la décharge à travers un fil de platine dont la résistance la ralentit, l'aimantation communiquée à des aiguilles égales suspendues successivement au-dessus du fil, augmente d'abord avec la longueur de ce fil, atteint un *maximum*, puis

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 5.

s'affaiblit. La longueur du maximum, est du reste d'autant plus grande que le fil est plus gros et meilleur conducteur. Des fils différents faisant partie d'un même circuit aimantent au même degré des aiguilles égales ; chaque partie étant traversée par le même courant. — Dans toutes ces expériences, la force des aiguilles était mesurée en les faisant osciller sous l'influence de la terre.

**Influence de la distance du circuit rectiligne.** — Des aiguilles égales d'acier, également trempées, placées perpendiculairement au fil rectiligné, à des hauteurs différentes, et à des distances assez grandes les unes des autres pour ne pas s'influencer mutuellement, sont soumises à la même décharge d'une batterie. Quand les aiguilles sont trempées et assez grosses, ou quand elles ne sont pas trempées, l'aimantation est moindre pour les hauteurs les plus grandes. Mais quand elles sont fines et trempées, les résultats sont plus compliqués. Supposons un fil de platine de 2<sup>mm</sup> de diamètre et de 2<sup>m</sup> de longueur et des aiguilles d'acier de 15<sup>mm</sup> de longueur : à partir du contact, l'aimantation *positive*, c'est-à-dire dans laquelle le pôle austral se forme à gauche du courant, va en diminuant, change de signe à la distance de 2<sup>mm</sup>,5, augmente jusqu'à 5 à 6<sup>mm</sup>, puis diminue jusqu'à 11<sup>mm</sup>. Elle redevient alors positive, augmente jusqu'à 28<sup>mm</sup> environ, puis diminue jusqu'à 130<sup>mm</sup>, distance à laquelle on s'est arrêté. La distribution des maximum et des changements de signe dépend du fil rhéophore : plus sa résistance est grande, plus les maximum sont rapprochés, et moins il y a de changements de signe ; la décharge se rapprochant alors d'un courant continu et régulier. — Les faits qui précèdent expliquent pourquoi le magnétisme des aiguilles de plusieurs boussoles, après un coup de foudre, peut être différemment modifié suivant leur distance au point foudroyé.

**Expériences dans les hélices.** — En faisant varier l'intensité de la décharge dans une hélice, Savary a obtenu des résultats semblables à ceux qui précèdent, ce qui semble prouver qu'ils étaient dus à la diminution d'action résultant de l'éloignement. Ainsi, ayant placé dans un tube de bois enveloppé d'une hélice, plusieurs aiguilles bien trempées, il obtint jusqu'à six changements de signe en employant des charges croissantes. Si l'on augmente la résistance du circuit sans modifier l'hélice, le sens finit par rester invariable.

Arago avait trouvé que : 1<sup>o</sup> la position de l'aiguille dans l'hélice ne fait rien, pourvu qu'elle ne soit pas trop près des extrémités ; 2<sup>o</sup> l'aimantation est la même dans deux hélices de diamètre différent quand elles sont assez longues, et de pas égaux et assez petits ; résultats confirmés par Savary.

**Conducteurs interposés.** — Arago avait remarqué que l'interposition des lames peu conductrices ne modifie pas l'aimantation par la décharge ; la découverte du *magnétisme de rotation*, dont nous parlerons plus loin, lui fit penser que des lames conductrices devaient se comporter autrement. En effet, Savary ayant placé dans la même hélice, deux aiguilles dont une était enveloppée d'un cylindre épais de cuivre, et ayant fait passer la décharge, n'obtint pas d'aimantation dans la dernière. Ayant diminué peu à peu l'épaisseur du cuivre, l'aiman-

tation se manifesta, et de plus en plus, atteignit le même degré que dans l'aiguille nue, le dépassa ensuite, atteignit un maximum, puis se rapprocha de nouveau de l'aimantation de l'aiguille nue. L'épaisseur qui correspond à l'aimantation égale des deux aiguilles croît avec l'intensité de la décharge. Enfin, l'enveloppe change quelquefois le sens de l'aimantation. — Pour faire varier facilement l'épaisseur, Savary employait des lames d'étain roulées autour des aiguilles, après s'être assuré que l'effet est le même, à égalité d'épaisseur, qu'avec un cylindre d'étain massif. Les lames peuvent être séparées ou non par des substances isolantes, mais il faut qu'elles soient continues. Le mercure agit aussi, mais moins que les autres métaux. De deux tubes, celui qui a le plus grand diamètre exerce le plus d'influence à épaisseur égale. Quand le diamètre est le même, le tube le plus court a le plus d'action.

Savary a encore employé des courants rectilignes, séparés des aiguilles par de larges plaques métalliques : une même plaque affaiblit beaucoup l'aimantation avec de faibles décharges, et l'augmente avec de plus fortes. Il en résulte que des plaques, minces ou épaisses, produisent des effets inverses avec la même décharge, et qu'il y a une épaisseur pour laquelle l'effet est nul. — Quand la plaque est derrière l'aiguille par rapport au courant, son influence est tout opposée ; elle augmente l'effet des très faibles décharges, d'autant plus qu'elle est plus épaisse, et il y a telle décharge dont une plaque épaisse augmente l'effet et dont une plaque mince le diminue. Pour des décharges plus fortes, l'une et l'autre l'affaiblissent, la dernière surtout, et elle finit par donner aux aiguilles une aimantation négative. Les divers métaux agissent à des degrés différents sous la même épaisseur, et les rapports entre leurs actions, non-seulement varient, mais encore peuvent être renversés, quand la décharge change. Quelques-uns de ces résultats se rattachent à la théorie du *magnétisme en mouvement* ; mais il en est d'autres, comme le changement de signe de l'aimantation avec la distance ou l'intensité de la décharge, qui n'ont pas encore été expliqués.

**2127. Circonstances qui influent sur l'aimantation par les courants continus.** — Savary a répété la plupart de ses expériences avec des courants continus ; mais l'inconstance des piles alors connues rendait les résultats incertains. Néanmoins, il a pu obtenir, quoique d'une manière beaucoup moins nette, les principaux résultats que les décharges lui avaient donnés, même les changements de signe de l'aimantation. Du reste, les effets des courants se rapprochent d'autant plus de ceux que donne la décharge, que la pile est à plus forte tension.

M. Abria a fait un grand travail sur le même sujet, au moyen de piles constantes<sup>1</sup>. La force des aiguilles, aimantées dans des hélices, était mesurée par les oscillations faites sous l'influence de la terre, et l'intensité du courant, au moyen de la boussole des sinus. Voici les résultats trouvés :

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. I, p. 385.

1° Comme l'avait vu Savary, l'effet se produit instantanément ; mais si l'on retire et si l'on introduit plusieurs fois l'aiguille dans l'hélice, l'aimantation s'accroît ; ce qui semble indiquer qu'elle se produit au moment où l'action commence ou cesse. Le résultat est le même, quand il est produit d'une seule fois, au moyen de courants successifs croissants.

2° Si l'aiguille n'est enfoncée qu'en partie dans l'hélice, l'aimantation ne dépasse que de très peu la partie plongée, le pôle qui se trouve à la limite recule à mesure que l'aiguille pénètre davantage dans l'hélice.

3° La force magnétique croît avec l'intensité du courant, et d'autant plus rapidement que le rapport entre la longueur et le diamètre de l'aiguille est plus grand. L'accroissement, d'abord proportionnel à l'intensité du courant, finit par être proportionnel au carré de cette intensité.

4° La longueur de l'hélice n'a pas d'influence sur l'aimantation, quand le pas reste le même et que l'aiguille ne la dépasse pas ou ne la dépasse que très peu. Les deux hélices comparées étaient placées l'une à la suite de l'autre dans le même circuit. — Deux hélices de diamètre différent produisent aussi le même effet, quand elles ne sont pas trop courtes. Dans le cas contraire, la plus étroite produit la plus forte aimantation. — Quand deux hélices de mêmes dimensions ont un pas différent, et que le courant est assez intense, les nombres d'oscillations des aiguilles aimantées par leur influence, sont en raison inverse des pas ; mais si le courant est faible, l'aimantation par l'hélice dont les spires sont le moins serrées est plus faible que la loi ne l'indique. — Enfin, les enveloppes métalliques n'ont pas d'influence avec les courants continus.

D'après M. Wiedemann, l'intensité du courant nécessaire pour désaimanter un aimant est toujours beaucoup plus faible que celle du courant qui l'a aimanté.

**Expériences de M. Jamain.** — Quand l'hélice est très-courte la position des pôles dépend de la manière d'opérer. M. Jamain prend une bande d'acier de 75<sup>cm</sup> de longueur, courbée en fer à cheval, et dont les branches sont entourées par deux hélices de même espèce. On exerce une dizaine de frictions, du talon vers les extrémités au moyen du système des hélices dans lesquelles on fait passer un courant, et en les arrêtant à une certaine distance de ces extrémités, et c'est à cette limite que se forment les deux pôles contraires. En étudiant la distribution du magnétisme par la *méthode du clou*<sup>1</sup> (1513), on obtient deux courbes d'intensité, symétriques de chaque côté du pôle, et ces courbes restent les mêmes quelle que soit la position des pôles, c'est-à-dire la limite d'excursion où se sont arrêtées les hélices, du moins quand la courbe n'atteint pas l'extrémité de l'aimant. Dans ce cas, en repliant la partie de la courbe qui dépasserait la branche, sur la partie qui la précède, et ajoutant les ordonnées superposées, on obtient la courbe entre le pôle et l'extrémité, avec sa forme réelle. Les ordonnées sont beaucoup plus grandes quand on pose une bande de fer doux sur les branches, à la limite d'excursion des hélices. Ces ordonnées

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXV, p. 1672.

sont au contraire beaucoup plus petites, si les hélices n'ont pas été déplacées. Enfin, l'on obtient toujours les pôles aux extrémités, si l'on exerce les frictions en allant vers le talon.

### III. Electro-aimants.

2128. — Un barreau de *fer doux*, introduit dans une hélice, s'aimante pendant le passage du courant, avec d'autant plus de facilité qu'il n'y a pas ici de force coercitive à vaincre. Mais l'aimantation disparaît aussitôt que le courant est interrompu ; c'est pourquoi l'appareil se nomme *électro-aimant*, quelquefois *électro-magnet*. L'hélice est formée d'un fil de cuivre revêtu de soie, enroulé un grand nombre de fois autour du barreau de fer doux ; on l'appelle l'*hélice magnétisante*.

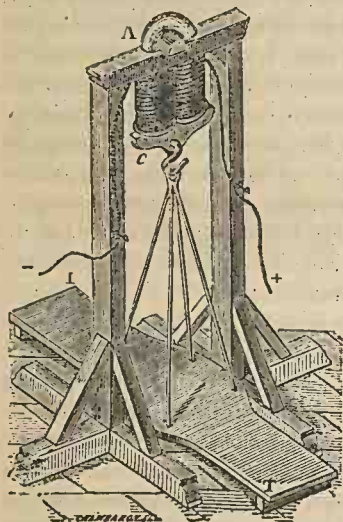


Fig. 1436.

Quand le barreau est plus long que l'hélice, les pôles sont situés dans les tranches de fer qui se trouvent immédiatement au-delà des extrémités de celle-ci. L'aimantation s'étend ensuite au-dehors, assez loin de ces pôles ; elle est le plus prononcée du côté où le barreau dépasse le plus l'extrémité de l'hélice. Souvent, le barreau de fer est recourbé en fer à cheval, et le fil est enroulé autour des deux branches, en passant de l'une à l'autre, de manière que les deux hélices soient la continuation l'une de l'autre quand le fer est supposé redressé.

Le premier électro-aimant puissant a été construit par Pouillet. La figure 1436 représente un de ces appareils. A est le barreau de fer doux, dont les branches verticales sont entourées par les deux parties de l'hélice magnétisante. c est un portant en fer doux, auquel sont suspen-

des par un crochet, des tringles soutenant, à une petite distance du sol, une longue planche IT, sur laquelle on peut placer des poids ou faire monter plusieurs personnes pendant le passage du courant. Si, le portant étant enlevé, on approche une assiette remplie de clous, ils se précipitent sur les pôles, et restent suspendus les uns aux autres en formant une longue trainée représentant les houppes de limaille que les aimants retiennent à leur surface. Au lieu de portant, on peut opposer aux pôles de l'électro-aimant, les pôles de *nom contraire* d'un second électro-aimant ; alors la puissance de l'appareil est considérablement augmentée, et c'est par milliers de kilogrammes que l'on compte les poids qu'il peut porter. Dans les deux cas, dès qu'on ouvre le circuit, la charge se sépare et tombe.

L'énorme puissance magnétique que l'on peut obtenir avec les électro-aimants, a permis de reculer les limites de la science du magnétisme, et a conduit à la découverte de phénomènes nouveaux ; comme ceux du *diamagnétisme*, dont nous parlerons vers la fin de ce chapitre, et de la *polarisation rotatoire magnétique* de la lumière, que nous étudierons à la fin de l'optique.

**2129. Application à l'aimantation.** — Le moyen le plus puissant que l'on connaisse pour aimanter un barreau d'acier, consiste à le placer entre les pôles opposés de deux forts électro-aimants droits AB, A'B' (fig. 1437), et à faire glisser sur le barreau, un anneau c recouvert de plusieurs tours de fil, en ayant soin de passer le même nombre de fois sur chaque moitié, et en exerçant des frictions. Un même courant parcourt les hélices de même espèce des deux électro-aimants et de la bobine c. — Un barreau d'acier soumis simplement à l'influence des électro-aimants fixes, s'aimante fortement quand on le frappe avec un corps dur pour ébranler ses molécules.

Aimé a imaginé de soumettre le barreau d'acier, incandescent, à l'action d'un électro-aimant en fer à cheval, et de le tremper dans cette situation, pour y développer la force coercitive. Les hélices sont alors préservées du contact de l'eau par une enveloppe en toile goudronnée.

**2130. Cessation des effets avec le courant.** — Quand on supprime le courant, l'électro-aimant rentre

immédiatement à l'état neutre, si le noyau est bien dépourvu de force coercitive, formé de fer aussi pur que possible, recuit à plusieurs reprises, après avoir été façonné et achevé à la lime, pour ne pas l'écrourir. Malgré toutes les précautions, il est bien rare qu'il ne reste pas un peu de force coercitive ; alors les électro-aimants en fer à cheval dont les branches sont les plus longues, rentrent moins complètement que les autres à l'état neutre, et n'arrivent pas immédiatement à leur maximum de force quand on introduit le courant.

**Magnétisme rémanent.** — Quand on supprime le courant, le portant se détache sous la charge qu'il supporte, et l'état neutre se rétablit aussitôt ; mais, si la charge n'est que le tiers au plus du maximum que l'appareil peut soutenir, le portant ne se détache pas et peut rester indéfiniment adhérent après la suppression du courant. Si on le sépare, l'électro-aimant redevient neutre ; cependant, il peut conserver encore un peu de magnétisme, et en quantité d'autant plus grande que le contact a été plus prolongé. On a expliqué ces résultats, découverts par M. Walkins, par l'influence du magnétisme développé dans le fer du portant, sur celui du fer de l'électro-aimant ; ils dépendent de la masse et de la forme du portant, dont nous avons vu la grande influence sur la force des aimants (1529).

Le magnétisme qui persiste sous l'influence de l'armature, après la suppres-



Fig. 1437.

sion du courant, se nomme *magnétisme rémanent*. Il présente de graves inconvénients dans une foule d'applications ; on l'évite en interposant entre l'électro-aimant et son armature une lame de bois, ivoire, carton..., ou en séparant les surfaces par de petites chevilles de cuivre montées à vis, dont on peut faire varier la longueur. M. Alexandre a reconnu qu'on enlève, ou du moins qu'on diminue beaucoup la faculté de garder du magnétisme rémanent, en faisant chauffer le fer fortement dans la flamme de l'alcool pendant le passage d'un courant dans l'hélice, dont les tours sont isolés par de la gomme laque, qui isole encore suffisamment, malgré son état de fusion.

On forme souvent les électro-aimants, de deux noyaux cylindriques réunis par une plaque de fer retenue par des vis et formant le *talon* ou *culasse*, comme dans la figure 1438. Il se produit alors une induction dans le fer de cette plaque, qui se comporte comme une armature, et retient, par conséquent, du magnétisme *rémanent* quand le courant est supprimé. M. Héquet évite cet inconvénient en séparant par des rondelles de cuivre, la culasse, des cylindres auxquels elle est fixée par des vis de cuivre<sup>1</sup>.

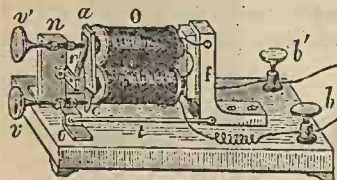


Fig. 1438. — 1/5

Un faisceau de fils de fer doux perd plus rapidement son aimantation qu'un barreau massif. Une enveloppe d'un métal non magnétique, sur laquelle est enroulée l'hélice magnétisante, retarde, au contraire, le retour à l'état neutre ; c'est pourquoi l'on emploie des enveloppes de carton, bois, étoffes... L'influence des enveloppes conductrices est analogue à celle que nous avons citée plus haut (2126) ; elle se rattache à la même cause et n'affecte pas la force de l'électro-aimant.

**2431. Mouvements produits par intermittences du courant autour du fer.** — On a imaginé divers appareils qui mettent en évidence la rapidité prodigieuse avec laquelle le magnétisme se développe, disparaît ou change de sens dans le fer doux. Nous allons en décrire quelques-uns.

**Appareil électro-musical.** — Ce petit appareil (fig. 1438), imaginé par Froment, se nomme aussi *sirène électromagnétique*. O est un électro-aimant fixé à un support métallique f ; une armature de fer doux, ac, est appuyée sur la branche inférieure, dans laquelle elle enfonce deux pointes formant charnière. Le ressort e, dont la force est réglée par la vis v, écarte l'armature de l'électro-aimant, et l'appuie contre un second ressort, r, réglé par la vis v'. Le courant, arrivant par le fil b, parcourt le fil de l'électro-aimant, suit le support f, la tige t, la pièce métallique o, et le ressort e, puis passe dans l'armature ca, le ressort r, et retourne à la pile par le support n, qui est séparé de la pièce o, et communique avec le fil b'. Mais, aussitôt que le courant est établi, l'arma-

<sup>1</sup> Exposé des applications de l'électricité, par le V<sup>te</sup> du Moncel, t. V (1878), p. 356.



ture, attirée par l'électro-aimant, s'écarte du ressort *r*, et le courant est interrompu. Alors l'armature, obéissant à l'action du ressort *c*, vient s'appuyer sur le ressort *r*, et, le courant étant rétabli, elle est de nouveau attirée, le circuit est rompu..., et ainsi de suite. Ces mouvements sont tellement rapides, qu'il en résulte un son musical dont on fait varier le ton en agissant sur les ressorts, au moyen des vis *v* et *v'*. On peut reconnaître, par ce moyen, si un courant passe dans un circuit, et reconnaître au son, si l'intensité varie. Il faut, pour que l'appareil fonctionne bien, que le fer soit très-pur, obtenu, par exemple, par électrolyse du sulfate de fer neutre.

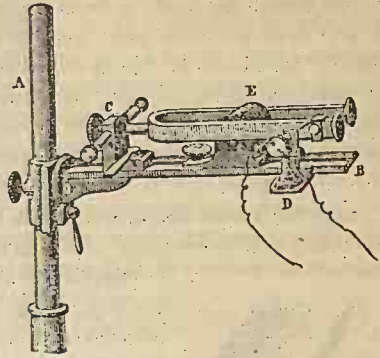


Fig. 1439. — 1/5.

**Électro-diapasons.** — Nous avons vu comment on peut entretenir les vibrations d'un diapason au moyen d'un électro-aimant (I, 594 et 635), et par quel moyen on peut régler les intermittences du courant dans l'hélice, de manière à les mettre en harmonie avec les vibrations naturelles du diapason. M. Mercadier produit ces intermittences, à chaque vibration, en armant une des deux branches, d'une aiguille perpendiculaire à leur plan. Cette aiguille touche, en arrivant à l'une des limites de chaque excursion, un petit plateau de cuivre compris dans le circuit, et formant la tête d'une vis qui sert à en régler la position. A chaque contact, le circuit est fermé, et l'électro-aimant agit sur l'acier du diapason<sup>1</sup>. — La figure 1439 représente un électro-diapason disposé par M. A. Duboscq, et dans lequel l'électro-aimant est placé entre les deux branches. Le courant passe par le support D qui porte la vis que la pointe, fixée à la branche d'avant, vient toucher à chaque vibration.

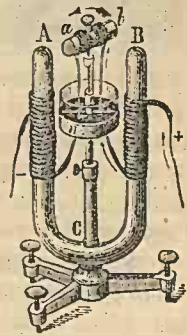


Fig. 1440. — 1/5

**Tourniquet de Clarke.** — Cet appareil met en évidence la rapidité avec laquelle l'aimantation peut changer de sens. Entre les branches d'un électro-aimant ou d'un aimant ACB (fig. 1440) est fixée une colonne C, à l'extrémité de laquelle peut tourner, sur un axe vertical, un petit électro-aimant horizontal *ab*. Les extrémités pendantes du fil de ce dernier affleurent la surface du mercure contenu dans un vase cylindrique *n*, divisé par une cloison transversale en bois. Le niveau du mercure, par un effet capillaire (I, 315), est plus élevé

<sup>1</sup> *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. II, p. 350.

que la cloison, de manière que les extrémités des fils peuvent toucher le mercure et passer par-dessus la cloison, pendant le mouvement de rotation. Chaque compartiment communique avec un des pôles de la pile. Si le courant passe dans le sens indiqué, le pôle austral de l'électro-aimant *ab* est en *a*, et est repoussé par le pôle homonyme A. Il y a, de même, répulsion entre *b* et B, et *ab* tourne dans le sens de la flèche *ba*; mais, quand *a* sera en présence de B qui l'attire, les fils passant par-dessus la cloison changeront de compartiment, le sens du courant et, par conséquent, les pôles, seront renversés dans *ab*, et il y aura de nouveau des pôles contraires en présence. Le mouvement continuera ainsi indéfiniment, avec une grande vitesse, qui montre la rapidité avec laquelle se fait le renversement des pôles dans le fer doux.

**Aiguille électro-magnétique de M. Breton.** — Ce petit appareil prend un mouvement de rotation sous l'influence de la terre; *ab* (fig. 1441) est un électro-aimant assez léger pouvant tourner autour d'un axe passant par son centre de gravité, et que l'on dirige perpendiculairement au méridien magnétique. Les extrémités de l'hélice magnétisante sont soudées à deux demi-anneaux métalliques, vus à part en *o*, *o'*, séparés par de l'ivoire et touchés par deux ressorts très-faibles *r*, *r'*, communiquant avec les pôles de la pile. L'électro-aimant se place d'abord parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, le pôle nord en bas; mais, dès qu'il arrive dans cette position, les demi-anneaux passent d'un ressort à l'autre, le courant est renversé dans l'hélice, et le pôle nord se trouve en haut. L'électro-aimant se retourne donc, et la vitesse acquise fait que le mouvement continue dans le sens où il avait commencé.

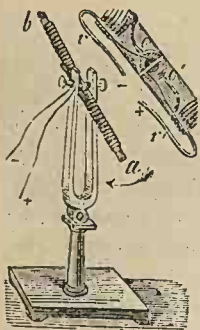


Fig. 1441.

**2132. DE LA FORCE DES ÉLECTRO-AIMANTS.** — La force des électro-aimants dépend : 1° de l'intensité du courant; 2° du nombre de spires et de la disposition de l'hélice magnétisante; 3° de la nature, des dimensions et de la forme du fer; 4° des dimensions et de la forme de l'armature.

**I. Influence de l'intensité du courant.** — MM. Lenz et Jacobi avaient trouvé la force d'un même électro-aimant proportionnelle à l'intensité du courant, quand le fer doux n'était pas trop long par rapport à son diamètre. Mais Müller a prouvé que cette loi ne s'applique qu'aux courants faibles. Pour cela, il disposa perpendiculairement au méridien magnétique une hélice dans laquelle il pouvait introduire successivement divers barreaux de fer, dans la direction de l'axe desquels était placé le centre d'une aiguille de déclinaison ou du barreau d'un magnétomètre (2058), assez éloignés pour que la tangente de la déviation fût proportionnelle à la force qui la produisait. Il observait d'abord la déviation produite par l'hélice seule parcourue par le courant, puis quand le barreau était introduit. La différence des tangentes des déviations mesurait la force

magnétique du barreau. L'intensité du courant étant donnée par une boussole des tangentes, Müller a reconnu ainsi que la loi n'est approchée que pour les faibles courants, et d'autant mieux que le barreau est plus gros par rapport à sa longueur. Il a représenté l'ensemble des résultats par la formule empirique

$$I = 220 d^{\frac{3}{2}} \operatorname{tang} \frac{m}{0,00005 d^2},$$

dans laquelle  $I$  est l'intensité du courant,

ou plus exactement le produit de cette intensité par le nombre des spires de l'hélice,  $d$  le diamètre du barreau, et  $m$  le moment magnétique produit. Quand  $d$  est grand, et  $m$ , et par conséquent  $I$ , assez faible, on peut prendre l'angle pour la tangente, et la formule exprime la loi de Lenz et Jacobi.

**État de saturation.** — La formule qui précède montre que, si  $I$  croit indéfiniment,  $m$  tend vers une limite finie, une tangente même infinie correspondant à un arc fini. Il doit donc y avoir, pour chaque barreau, un *état de saturation*, c'est-à-dire un maximum d'aimantation, dans le voisinage duquel les variations deviennent insensibles quand on augmente  $I$ , c'est-à-dire l'intensité du courant et le nombre de tours de l'hélice.

Pour démontrer l'existence de ce maximum, Müller a fait plusieurs séries d'expériences avec des hélices différentes, dans chacune desquelles il introduisait successivement des cylindres de fer doux, de même longueur, mais de diamètres différents, et il a représenté les résultats par des courbes, en prenant pour *abscisses* et *ordonnées* les valeurs de  $I$  et de  $m$ . Dans la figure 1442, les courbes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , correspondent à trois barreaux de 588<sup>mm</sup> de longueur, et ayant pour diamètre 12<sup>mm</sup>, 9<sup>mm</sup> et 7<sup>mm</sup>, 1. La valeur de  $I$  variait dans le rapport de 1 à 6 environ. La forme des courbes montre l'existence d'un maximum, surtout pour le barreau le moins gros, qui correspond à la courbe  $oc$ . On voit aussi que la loi de Lenz et Jacobi est sensiblement vraie pour les faibles intensités  $I$ ; les courbes se confondant d'abord avec des lignes droites.

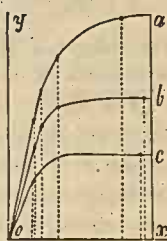


Fig. 1442.

L'existence d'un maximum magnétique avait été déduite de la théorie par M. Thompson, puis oubliée, établie de nouveau par M. Joule, puis par de Haldat, et enfin par M. Feilitzsch et par Müller, qui ignoraient avoir été précédés dans la découverte de ce fait important.

**II. Conditions de l'hélice.** — La quantité de magnétisme développée est indépendante du diamètre de l'hélice, quand le noyau la dépasse notablement par les deux bouts. Quand il n'en est pas ainsi, les bobines étroites sont plus efficaces que les autres.

La quantité de magnétisme paraît proportionnelle au nombre des spires de l'hélice, du moins tant que le fil n'en forme qu'une seule; car s'il en formait

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XLVIII, p. 119 et 123.

plusieurs superposées, les dernières, plus éloignées du barreau, agiraient moins efficacement. Sous ce rapport, un fil fin est donc préférable à un fil plus gros ; mais le fil fin résistant davantage et affaiblissant le courant, il peut se faire qu'on perde d'un côté ce qu'on gagne de l'autre.

Quand le courant est assez faible pour qu'on puisse admettre la loi de Lenz et Jacobi, la force magnétique développée dans un même barreau avec une même pile, atteint son maximum quand la résistance de l'hélice est égale à celle de la pile. En effet, l'intensité du courant est donnée par la formule  $I = \frac{nE}{R + nr}$

(2069),  $R$  étant la résistance de l'hélice. Si nous supposons l'armature assez grosse pour qu'il s'y développe par influence un magnétisme égal à celui de l'électro-aimant, l'action attractive exercée entre les deux surfaces en contact sera proportionnelle au carré de  $I$  ; elle est, de plus, proportionnelle au nombre de tours de l'hélice ou à la longueur du fil, ou enfin à  $R$ . Cette action sera donc représentée par l'expression  $\frac{n^2 E^2 R}{(R + nr)^2}$ , qui a un maximum cor-

respondant à  $R = nr$  ; car, en prenant  $R$  pour variable, la dérivée est  $\frac{n^2 E^2 (nr - R)}{(R + nr)^2}$ , qui est nulle pour  $R = nr$ . Il faut donc, pour obtenir le maximum de magnétisme avec une pile donnée, employer de préférence un fil fin faisant un grand nombre de tours. Plus la pile aura de couples, plus ce fil devra être long. Cette règle pratique peut encore s'appliquer au cas d'un courant intense, qui ne serait plus proportionnel à la force magnétique développée ; car, dans ce cas, l'affaiblissement du courant par l'allongement du fil n'apporte qu'une faible diminution dans la force magnétique, comme le montrent les courbes (fig. 1442.).

**2133. III. Dimensions et forme du fer doux.** — La force d'un électro-aimant dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la longueur et du diamètre du fer doux. MM. Lenz et Jacobi, puis Müller, avaient trouvé que la longueur des branches d'un électro-aimant n'avait pas d'influence sur sa force. M. Dub a vu, au contraire, que cette force augmente avec la longueur ; ce qui se conçoit, les deux pôles contraires étant d'autant plus éloignés l'un de l'autre que la longueur est plus grande. Nicklès<sup>1</sup> a expliqué cette contradiction, en montrant que la force magnétique augmente avec la longueur, quand le barreau est droit, ou quand, étant en fer à cheval, l'hélice n'enveloppe qu'une seule branche. Pour le prouver il approche très près d'un des pôles de l'électro-aimant, une armature trop lourde pour être soulevée ; il allonge ensuite le barreau de fer, en appliquant sur le pôle opposé un cylindre de fer de même grosseur, et aussitôt l'armature est attirée, adhère avec force, et se détache dès qu'on enlève le cylindre de fer. Il y a, du reste, une limite à partir de laquelle l'attraction diminue quand la longueur augmente. Nicklès montre aussi que la

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVII, p. 399.

proposition de M. Dub est vraie pour les électro-aimants en fer à cheval, quand on fait agir l'attraction d'un seul pôle, pour se placer dans les conditions d'un barreau droit. Mais quand on fait agir les deux pôles, la longueur des branches est sans influence. D'après Carini, quand le noyau de fer dépasse suffisamment l'hélice par les deux bouts, la quantité de magnétisme est indépendante du noyau, et la position des pôles est indépendante de l'intensité du courant.

**Distance des pôles.** — Nicklès a aussi étudié l'influence de la distance des pôles des électro-aimants en fer à cheval <sup>1</sup>. M. Dub avait trouvé que la force ne dépend pas de cette distance quand elle varie peu et que le courant est faible. Mais quand il est intense, Nicklès a vu la force augmenter avec la distance des pôles, comme dans les électro-aimants droits, et atteindre un maximum qui correspond à une distance d'autant plus grande que l'intensité du courant est elle-même plus grande. Pour écarter à volonté les pôles, Nicklès se servait d'un électro-aimant formé de deux cylindres de fer perpendiculaires à une barre de même métal sur laquelle un d'eux pouvait se déplacer parallèlement à lui-même.

**Diamètre du fer doux.** — Toutes choses égales d'ailleurs, un électro-aimant est d'autant plus puissant que le diamètre du fer est plus grand. C'est ce qui résulte de l'inspection de la *fig.* 1442. De plus, la formule de Müller exprime que le maximum d'aimantation est proportionnel au carré du diamètre; car si l'on pose  $\frac{m}{0,00005 d^2} = 90^\circ$ , on en tire  $m = 90^\circ \times 0,00005 d^2$ . Il paraît, au reste, que le résultat dépend plutôt du volume extérieur, que de la masse du fer; car de Haldat a reconnu qu'un tube de fer attire tout aussi fortement, pendant le passage du courant, quand il est vide et quand il est rempli par un cylindre de fer prenant bien juste <sup>2</sup>. Nous avons déjà vu comment de Haldat a conclu de là la tendance du magnétisme à s'accumuler vers la surface des aimants (1517). Cependant il semble que le fait n'est pas incontestable; car M. Pfaff a trouvé qu'un électro-aimant creux ne pouvait porter que la moitié de la charge que soutenait un autre appareil identique, mais dont le fer était massif et pesait à peu près deux fois plus. Ayant fait entrer de force un cylindre de fer dans l'électro-aimant creux, le résultat ne pas fut modifié <sup>3</sup>. Ces résultats, qui semblent infirmer les conclusions de de Haldat, dépendent de l'épaisseur des parois du tube. M. du Moncel trouve qu'il faut, pour que l'aimantation reste la même qu'avec un cylindre massif, que cette épaisseur soit au moins égale au quart du rayon du cylindre. — L'intensité du courant joue ici un grand rôle, et si, quand elle est faible, l'aimantation reste superficielle, on la voit pénétrer peu à peu jusqu'à l'axe du barreau quand cette intensité va en augmentant; et, en étudiant la distribution du magnétisme sur la tranche du barreau, on voit qu'il va en diminuant de la circonférence au centre.

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXIX, p. 635.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XI, p. 457.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXXV, p. 335.

**IV. Influence de l'armature.** — Cette influence a été étudiée par MM. Pfaff, Barral, Dub, Nicklès, Du Moncel. La force avec laquelle un électro-aimant retient son armature augmente avec la masse de celle-ci ; mais, jusqu'à une certaine limite, pour laquelle la masse de l'armature est inférieure à celle du fer de l'électro-aimant, d'après M. Du Moncel. M. Liais a trouvé, par le calcul, que l'adhérence d'une armature rectangulaire de longueur constante croît comme la racine cubique de la largeur de la face appliquée contre les pôles, et comme la racine carrée de l'épaisseur suivant les faces perpendiculaires à celle-ci. De sorte que, si la même armature est appliquée par une de ses plus larges faces, elle adhère plus fortement que si elle est appliquée par l'une des deux plus étroites. De plus, à égalité de masse, on obtient le maximum d'effet quand l'épaisseur est environ le tiers de la largeur. — Nous avons vu (1530) comment les aimants réagissent sur leurs armatures et *vice-versà*.

**2134. Actions à distance.** — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé l'armature en contact avec l'électro-aimant. Lorsqu'il n'y a pas contact, l'action diminue très-rapidement quand la distance augmente. Chaque élément magnétique agit bien en raison inverse du carré de la distance ; mais, comme tous les points de l'extrémité de l'électro-aimant ne sont pas à la même distance du point attiré, et n'ont pas ordinairement la même puissance magnétique, la loi est toute différente quand on considère l'ensemble de leurs actions. On ne sait que peu de chose à cet égard. Voici cependant quelques résultats recueillis par divers observateurs :

1° Si l'extrémité du fer doux présente la forme d'un cône à sommet arrondi, la force magnétique est concentrée dans un espace restreint, et la variation d'action avec la distance s'éloigne moins de la loi élémentaire du magnétisme. Il en est de même quand le fer doux est très-long par rapport à son diamètre. On exprime quelquefois ce résultat en disant que l'électro-aimant a beaucoup de force aspirante.

2° Quand le fer doux se termine par une section droite, la variation est beaucoup plus rapide. M. Barral a déduit d'expériences nombreuses, qu'on peut représenter le poids maximum  $P$  que peut porter un électro-aimant agissant sur une armature placée à une distance  $x$  de son extrémité, par la formule empirique  $P = a : (b + cx)$  ;  $a, b, c$  étant des constantes qui dépendent des dimensions et de la forme de l'électro-aimant et de l'armature<sup>1</sup>. Si l'on termine le fer doux par un disque, la surface de ce dernier forme ce que Faraday nomme un *champ magnétique*. Généralement, la force magnétique est au maximum sur le contour du champ ; on peut le reconnaître par l'expérience, en suspendant une balle de fer au-dessus du centre ; on la voit se porter vers les bords.

**2135. Différentes formes d'électro-aimants.** — Les électro-aimants figurent comme organe principal dans une foule d'appareils, et on leur donne des formes variées appropriées aux usages auxquels on les destine. Nous aurons à

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXV, p. 758.

en citer plusieurs quand nous parlerons des applications de l'électromagnétisme, et nous allons dès à présent en décrire quelques-uns.

On distingue les électro-aimants droits, et en fer à cheval. Ces derniers sont tantôt formés d'une seule pièce, tantôt de deux cylindres réunis par une bande de fer. Dans ce dernier cas, on ne peut pas développer autant de puissance magnétique, à cause des solutions de continuité aux angles. Ordinairement, on donne aux branches une longueur égale à 3 ou 4 fois leur diamètre, et la distance qui les sépare en dedans est de 1,5 à 2 fois ce diamètre. Il est bon que le fer dépasse un peu l'hélice magnétisante.

**Électro-aimant trifurqué.** — Cet appareil, dû à Nicklès, est vu par ses pôles en *asc* (fig. 1443); *a'na'* en est une coupe suivant *oo*. En *f, f* est un prisme de fer doux, enveloppé par l'hélice, et en *ac, ac, a'n, a'n*, des plaques de fer doux réunies par une plaque de même métal *nn*, et dans lesquelles la même hélice développe une aimantation contraire à celle du prisme *f, f*.

**Frein magnétique.** — MM. Nicklès et Auberger ont appliqué les électro-aimants trifurqués à la construction de freins destinés aux chemins de fer; placés très-près des rails, ils s'y appliquent et y exercent un frottement considérable par leur adhérence magnétique, dès qu'on y fait passer un courant. Ayant enveloppé la partie inférieure des roues motrices d'une locomotive, avec une hélice enroulée sur un cadre horizontal, dans lequel la roue pouvait se mouvoir sans frottement, ils ont pu augmenter l'adhérence aux rails, par attraction magnétique, de  $\frac{1}{3}$  environ pendant le repos; mais l'adhérence était beaucoup moins prononcée pendant le mouvement, à cause du déplacement continu du pôle inférieur dans le contour de la roue, dont le fer était loin d'être dépourvu de force coercitive. La pile employée était composée de 64 couples à charbon intérieur.

**Électro-aimants à noyaux multiples.** — Les couches d'un cylindre de fer s'aimantant de moins en moins à mesure qu'elles se rapprochent de l'axe (2133), M. A. Camacho a cherché à développer l'aimantation dans toutes les couches, en disposant des tubes de fer concentriques fortement appuyés par une extrémité sur un disque de fer servant de culasse. Un fil rhéophore est enroulé, toujours dans le même sens, sur les divers tubes, qu'il sépare, et en passant de l'un à l'autre par des trous percés dans la culasse. Un pareil système présente une grande force portative<sup>1</sup>.

M. Cance enroule le fil sur un premier noyau massif, applique sur la bobine ainsi formée une couronne de petits tubes de fer qui se touchent, et sur lesquels il enroule la suite du même fil, pose une nouvelle couronne de tubes sur

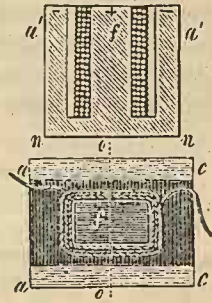


Fig. 1443.

<sup>1</sup> Journal de physique de M. d'Almeida, t. IV, p. 238.

la nouvelle bobine, et ainsi de suite, la dernière bobine étant la plus épaisse. Le tout est fixé par un bout sur un disque qui sert de culasse<sup>1</sup>.

**Électro-aimants circulaires.** — Ce genre d'électro-aimant, imaginé par Nicklès, consiste en un gros cylindre de fer doux, aux bases duquel sont appli-

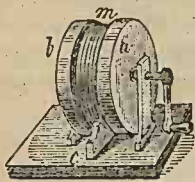


Fig. 1444.

qués des disques en fer *a*, *b* (fig. 1444). Le cylindre est entouré d'une hélice magnétisante *m*, dont l'action développe dans les deux disques des magnétismes contraires. L'aimantation se porte principalement vers le bord des disques, car on peut décomposer, par la pensée, l'appareil en tranches passant par l'axe et formant deux fers à cheval soudés dos à dos. — L'hélice étant supposée fixe, si le fer tournait sur son axe, la distribution du magnétisme ne changerait pas pendant le mouvement, tout étant symétrique autour de cet axe. Un disque de fer appliqué par son contour sur le contour du disque *a*, y adhérerait donc et serait entraîné dans son mouvement, en formant comme un *engrenage magnétique*. Si les disques *a* et *b* étaient appuyés sur des rails, ils y adhèreraient fortement.

#### IV. Mouvements, actions moléculaires, vibrations des corps magnétiques par les courants.

**2136. Mouvements du fer dans les hélices.** — Si l'on introduit dans une hélice AB (fig. 1445) parcourue par un courant, un barreau de fer doux FF

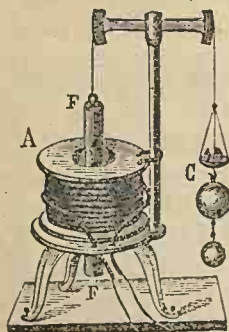


Fig. 1445.

plus long ou plus court que l'hélice, et pouvant s'y mouvoir librement, il se met en mouvement jusqu'à ce que les milieux du barreau et de l'hélice coïncident. On peut, au moyen de poids *C*, reconnaître quel est l'effort nécessaire pour éloigner le barreau de cette position d'équilibre. Il est facile de saisir le rapport qu'il y a entre ce fait et les expériences de M. Boisgiraud sur une aiguille flottante (2123); seulement, ici, l'équilibre est toujours stable, le pôle austral étant nécessairement à la gauche du courant. — Des balles de fer placées dans l'intérieur d'une longue hélice à axe horizontal roulent jusqu'au milieu, et finissent par s'y arrêter, après avoir fait quelques oscillations.

M. Saint-Loup a mesuré les intensités de la force qui sollicite le barreau de fer plus ou moins enfoncé dans des hélices, successivement de dimensions différentes, ainsi que le barreau, qui était suspendu à un fléau et équilibré par des poids. L'hélice était fixée à un plateau horizontal, que l'on pouvait élever ou

<sup>1</sup> Applications de l'électricité, par le V<sup>e</sup> Du Moncel, t. V (1878), p. 349.



abaisser, au moyen de deux rubans de soie s'enroulant sur un treuil. Des tubes glissant le long de deux barres verticales guidaient le plateau dans ses mouvements, dont l'étendue était mesurée sur une échelle verticale. — Quand un courant parcourait l'hélice, l'équilibre du barreau était rompu (si ce n'est quand les centres de figure de l'hélice et du barreau coïncidaient), et les poids nécessaires pour ramener le fléau dans la position horizontale mesuraient la force exercée sur le barreau. Les attractions étaient représentées par les ordonnées d'une courbe, en prenant pour abscisses les distances entre les centres du barreau et de l'hélice. L'aire de la courbe représentait le travail de l'attraction pendant le passage de l'hélice par ses positions successives, travail qui était l'objet principal de ces recherches, en vue des applications aux moteurs électromagnétiques<sup>1</sup>.

M. Jamin a obtenu des effets intenses sur une bobine, de la manière suivante : Les deux branches d'un faisceau fixe de 10 lames d'acier en fer à cheval étaient enveloppées de deux hélices de même espèce, qu'un système de cordons et de poulies pouvait faire mouvoir le long des deux branches. Quand le courant passait, l'acier était aimanté et la double hélice venait se placer vers le tiers inférieur de l'aimant, où elle était soutenue, malgré son poids de 18 kilos, auquel on pouvait encore ajouter 3 kilos.

Une tige de fer mobile se dirige, en présence d'un aimant, de manière que l'axe magnétique qui s'y forme soit parallèle à la droite qui joint les pôles de l'aimant. Les hélices agissent de la même manière, et un morceau de fil de fer s'y tourne parallèlement à leur axe. Pour observer ce résultat, on pose des brins de fil de fer sur un disque de carton horizontal qu'on introduit dans l'hélice verticale (*fig. 1445*); on les voit se dresser verticalement. De la limaille jetée sur le disque de carton placé près de l'ouverture de l'hélice forme de petites houppes séparées les unes des autres, de 2 à 3<sup>cm</sup> de hauteur, et qui s'inclinent vers l'axe. Quand le disque arrive au milieu de l'hélice, les amas de limaille s'écartent les uns des autres; et se penchent vers l'extérieur. Il en est de même avec des brins de fil de fer, qui forment autant de petits aimants parallèles et orientés de la même manière, dont les pôles homonymes se repoussent. — Ces résultats, observés par de La Rive, montrent que les diverses molécules d'un barreau soumis à l'action d'une hélice, sont sollicitées avec des forces inégales et dans des directions différentes; d'où l'on peut conclure que les corps magnétiques tendent à changer de forme pendant l'aimantation. C'est, en effet, ce que montre l'expérience.

### 2137. Effets mécaniques produits sur le fer par les courants.

— M. Guillemin<sup>2</sup>, ayant enroulé un fil autour d'un barreau de fer doux de 1<sup>cm</sup> de diamètre et de 20 à 30<sup>cm</sup> de longueur, fixé horizontalement par un bout et légèrement infléchi par un poids attaché à l'autre, le vit se redresser

<sup>1</sup> *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, t. VII (1870).

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXII, p. 264.

sensiblement pendant le passage d'un courant. Wertheim a reconnu de plus que cet effet n'étant pas proportionnel à la flexion primitive, n'est pas dû à un changement dans l'élasticité; et, en effet, un *fil de fer* tendu sur un sonomètre et enveloppé d'une hélice, s'allonge de quantités égales sous une même charge, quand le courant passe et quand il ne passe pas.

M. Joule a vu une barre de fer changer de dimensions dans une hélice magnétisante<sup>1</sup>; mais les changements sont tels, que le volume ne varie pas; car, ayant renfermé la barre dans un tube de verre surmonté d'un tube capillaire et rempli de liquide, le niveau ne se déplaça pas pendant le passage d'un courant dans une hélice enveloppant le tube. Wertheim a confirmé ce résultat, que nous pouvons rapprocher de l'expérience de Gay-Lussac sur un tube d'acier, dont la capacité n'est pas changée par l'aimantation.

M. Joule a ensuite reconnu qu'une barre de fer s'allonge pendant le passage du courant dans l'hélice enveloppante, de  $\frac{1}{720000}$  environ de la longueur. L'allongement, amplifié 3000 fois au moyen d'un levier, était d'autant plus prononcé que le fer était plus doux, paraissait indépendant de la grosseur de la barre, et,

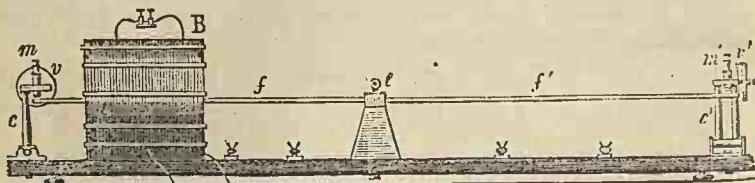


Fig. 4446.

pour une même barre, semblait proportionnel au carré du magnétisme développé. Quand le courant cessait, la barre de fer se raccourcissait moins qu'elle ne s'était allongée, à cause du magnétisme persistant. Les barreaux d'acier pas trop fortement trempés s'allongent aussi, mais bien moins que ceux de fer; et, au lieu de se raccourcir quand on supprime le courant, ils éprouvent un nouvel allongement, moindre que le premier; ce qu'on peut attribuer à l'état de tension des molécules de l'acier trempé, car le fer écroui donne le même résultat.

L'influence de l'état de tension est évident quand on opère sur des fils fortement tendus; alors le passage du courant produit un raccourcissement sensible à partir d'une certaine tension, qui est de 350 kil. au moins pour un fil de 5<sup>mm</sup> de diamètre. A partir de cette limite, il paraît être sensiblement proportionnel à la racine carrée de la tension. — L'acier fortement trempé se raccourcit aussi pendant le passage du courant, quand ce dernier est capable de lui faire dépasser l'état de saturation magnétique; si non, il n'y a pas de changement de longueur. La compression ne semble produire aucun des effets de la tension.

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sciences), t. IV, p. 98, et t. V, p. 51.

**Cas où le fil sert de rhéophore.** — M. W. Beatson a observé un allongement dans un fil de fer parcouru directement par le courant. Cet allongement a lieu dès que le circuit est fermé, et ne peut se confondre avec celui que produit l'échauffement; car une contraction égale a lieu dès que le courant est interrompu. Ces changements étaient amplifiés au moyen d'un levier <sup>1</sup>.

**2138. Effet transversal.** — Les expériences qui précèdent prouvent que l'action de l'hélice donne une composante parallèle à son axe. Comme les volumes ne varient pas pendant les changements de longueur, il faut qu'il existe aussi des composantes perpendiculaires à l'axe. C'est ce qui résulte directement des expériences de Wertheim <sup>2</sup>: Une barre de fer doux  $f, f'$ , fixée par le milieu dans un étai  $e$  (fig. 1446), est entourée par une bobine B composée de 1336 tours d'un fil de cuivre de 2<sup>mm</sup>,5 de diamètre. Les extrémités de la barre sont placées sous des microscopes  $m, m'$ , qu'on peut déplacer parallèlement à eux-mêmes, au moyen de vis micrométriques  $v, v'$ . Chaque microscope est soutenu par deux colonnes  $c, c'$ , dont l'ensemble peut tourner autour d'un axe vertical. Quand on place les colonnes comme en  $c'$ , le microscope sert à observer les variations de longueur; quand on les place comme en  $c$ , il sert à observer les déplacements latéraux.

Au moyen de cet appareil, Wertheim a constaté que : 1° quand l'axe de la barre coïncide avec celui de la bobine, il se produit un allongement, d'autant plus prononcé que la bobine est plus éloignée de l'étai  $e$ ; 2° quand cette coïncidence n'a pas lieu, l'allongement est accompagné d'un déplacement latéral vers le côté de l'hélice le plus rapproché. La flèche de ce déplacement est d'autant plus grande que la bobine est plus éloignée de l'étai, et son axe plus écarté de celui de la barre; et elle est sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant. L'unité d'intensité était celle qui faisait dévier de 10° l'aiguille d'un rhéomètre. En désignant par P le poids capable de produire la même flèche,  $f_0$  rapportée à l'unité d'intensité, quand la distance D était de 80<sup>mm</sup> et 50<sup>mm</sup>, Wertheim a trouvé les résultats moyens suivants :

BARRES DE FER			POUR D = 80		POUR D = 50 <sup>mm</sup> .	
LONGUEUR	LARGEUR	ÉPAISSEUR	$f_0$	P.	$f_0$	P.
997 <sup>mm</sup>	10 <sup>mm</sup>	10 <sup>mm</sup>	0 <sup>mm</sup> ,1337	65 <sup>r</sup> ,408	0 <sup>mm</sup> ,0727	35 <sup>r</sup> ,484
916	12	3,37	0,9377	2,673	0,4747	1,493
981	5	5	0,4648	1,462	9,2853	0,813

Le poids P, ou équivalent mécanique de l'unité d'intensité du courant, se calcule au moyen des formules de l'élasticité (I, 512). En représentant par

<sup>1</sup> *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. II (1846), p. 113.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 305.

la force mécanique pour la première barre, on trouve pour les autres, 41,71 et 22,81, quand  $D = 80$ ; et 42,82 et 23,34, quand  $D = 50$ . L'équivalent mécanique, qui est proportionnel à l'intensité du courant, l'est donc aussi à la masse de fer; car les sections, et par suite les masses des trois barres, sont entre elles comme 100, 40,44 et 25. Des résultats semblables ont été obtenus avec d'autres valeurs de  $D$ , prises entre  $0^{\text{mm}}$  et  $80^{\text{mm}}$ .

**2139. Déplacements moléculaires pendant l'aimantation.** — Les mouvements de totalité dans les expériences qui précèdent, sont la conséquence de déplacements moléculaires, qui peuvent être attestés de diverses manières, entre autres par l'échauffement qui en résulte. M. Van-Bréda ayant enveloppé un tube de fer, d'une hélice dans laquelle il lançait un courant intermittent, constata un échauffement dû aux déplacements alternatifs des molécules, et prouvé par la dilatation de l'air contenu dans le tube, qui formait le réservoir d'un thermomètre à air<sup>1</sup>. Plus tard, Grove a observé, au moyen d'un couple thermo-électrique, l'échauffement d'une armature de fer doux, quand il faisait passer un courant intermittent dans le fil d'un électro-aimant sur lequel elle était appliquée, ou en faisant tourner en sa présence les pôles d'un fort aimant. Ces effets caloriques, dont nous verrons les inconvénients dans certains appareils d'induction, sont faibles sur le cobalt et le nickel, et nuls sur les métaux non magnétiques. M. Moll a trouvé qu'un barreau qui a été aimanté dans une hélice, s'aimante moins fortement en sens contraire, quand on renverse le courant, surtout quand le premier état a persisté pendant longtemps. M. Wiedemann a même vu un courant qui avait désaimanté un barreau, ne pouvoir l'aimanter en sens contraire, ce qu'il pouvait faire facilement quand la désaimantation avait été produite par la chaleur. Mais si l'on change plusieurs fois le sens de l'aimantation, le fer finit par s'aimanter aussi facilement dans un sens que dans l'autre. Il semble donc que la structure a été modifiée.

Cependant M. Jamin explique les résultats, par la pénétration de l'aimantation dans le barreau à une profondeur d'autant plus grande qu'on a employé un plus grand nombre de couples. Quand ensuite on fait passer un courant inverse, la désaimantation n'est qu'apparente, le magnétisme intérieur n'est pas détruit, mais seulement dissimulé par le magnétisme contraire développé dans les couches extérieures. Si l'on augmente le nombre des couples, cet état neutre apparent ne change pas jusqu'à 8 à 10 couples; alors l'aimantation inverse se produit, mais très faible; tandis que si l'on fait passer le courant dans le sens primitif, l'aimantation première se reproduit avec intensité. — Ces phénomènes expliquent bien les résultats, mais les déplacements moléculaires doivent y concourir dans une certaine mesure, comme le prouve la chaleur dégagée, et comme il résulte des faits qui suivent.

**Arrangement des molécules en séries.** — Les molécules du fer soumis à l'action de l'hélice ont une tendance à se placer en séries parallèles à son axe.

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXI, p. 964.

Ainsi, M. Maggi a constaté que la conduction calorifique d'une plaque de fer est plus grande pendant l'aimantation, dans la direction perpendiculaire à l'axe magnétique que dans toute autre direction<sup>1</sup>. La plaque circulaire, garnie d'une mince couche de cire (II, 969), recevait la chaleur en son centre, par un petit tube traversé par de la vapeur d'eau. La cire fondait en formant une tache circulaire, quand la plaque était à l'état naturel; mais quand elle était appuyée sur les pôles d'un fort électro-aimant, la tache s'allongeait dans la direction perpendiculaire à la ligne des pôles, direction suivant laquelle la densité augmente, puisque l'aimantation produit un allongement sans changement de volume (2137).

Grove a fait l'expérience curieuse qui suit : Il remplit d'eau tenant en suspension des parcelles de fer précipitées chimiquement, un tube de verre fermé à ses extrémités par des glaces. La lumière était très affaiblie en passant à travers le liquide; mais dès qu'on faisait passer un courant dans une hélice entourant le tube, le liquide devenait subitement beaucoup plus transparent, les parcelles de fer prenant un arrangement régulier. Les expériences de de La Rive, sur la limaille de fer, montrent bien cette tendance des parcelles à s'arranger en files parallèles à l'axe de l'hélice (2136).

**2140. Applications à la théorie de l'aimantation.** — Il résulte de ce qui précède, que les molécules sont déplacées pendant l'aimantation. Si elles restent dans leur nouvelle position, on a un aimant permanent. Tout ce qui ébranle les molécules aide à leur déplacement et facilite l'aimantation. D'un autre côté, les ébranlements détruisent l'aimantation en favorisant le retour aux positions primitives d'équilibre. C'est ainsi qu'agissent la chaleur, les vibrations et le choc, qui pendant l'action de l'hélice augmentent l'aimantation permanente, comme l'a observé M. Wiedemann. Il semble, dans la théorie de Coulomb, que les particules possèderaient d'avance la polarité magnétique, et que l'aimantation consisterait dans leur orientation suivant certaines directions. La force coercitive devra naturellement appartenir aux corps peu malléables, comme l'acier trempé, le fer écroui, dont les molécules sont difficiles à déplacer.

Il résulte de là que, si l'on pouvait par des moyens mécaniques donner aux particules des positions nouvelles, on pourrait, dans certains cas, augmenter l'aimantation sans employer ni aimants, ni électricité. C'est ainsi que M. Lagesh-jelm a vu du fer doux s'aimanter fortement par la rupture; que Matteucci a pu augmenter l'aimantation d'aiguilles d'acier par la torsion; et Wertheim, modifier l'aimantation de fils de fer d'une manière permanente ou temporaire, suivant que la torsion était elle-même permanente ou temporaire<sup>2</sup>. — Inversement, M. Wiedemann a vu un fil de fer tordu d'une manière permanente perdre une partie de sa torsion dans une hélice magnétisante. L'effet n'est pas proportionnel à l'intensité du courant, et il atteint promptement une valeur maximum; en outre, il est indépendant de la torsion primitive.

<sup>1</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences, 1849), t. XIV, p. 132.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXIII, p. 336.

**2141. Coexistence de deux états magnétiques.** — Marianini, a été conduit par divers faits à admettre, en certains cas, cette coexistence dans le fer qui a été soumis à l'action des courants <sup>1</sup>. Il a d'abord constaté qu'un fil de fer, d'acier ou de nickel qui a été aimanté dans une hélice, par la décharge d'une petite bouteille de Leyde, et qui ensuite a perdu son magnétisme par des décharges en sens inverse, s'aimante plus fortement dans le sens de la première décharge, reproduite avec la même intensité. Le fer qui a été aimanté, puis ramené à l'état neutre, possède donc une aptitude plus grande que le fer neuf à s'aimanter dans le même sens; et au contraire, l'aptitude à s'aimanter dans l'autre sens est diminuée, et au même degré. En opérant avec des courants contraires à ceux qu'on a d'abord employés, on change le sens pour lequel l'aptitude est augmentée. Enfin, en renversant fréquemment le sens de la décharge, on finit par faire disparaître toute différence d'aptitude. Ces effets se manifestent encore quand le fer n'est pas ramené à l'état neutre et conserve une partie de son aimantation primitive, ou même reste un peu aimanté en sens contraire.

On obtient des résultats semblables, quand l'aimantation et sa destruction sont produites par un courant, par un aimant ou par la terre. Quand l'aimantation est détruite par la chaleur, il n'y a plus de différence d'aptitude.

Dans ces expériences, Marianini mesurait l'état magnétique du fer au moyen du *rhé-électromètre* (2059), dans l'hélice duquel il introduisait le barreau de fer pour l'aimanter. Ce barreau faisait ensuite dévier plus ou moins l'aiguille, suivant l'aimantation qu'il avait reçue.

Pour expliquer ces résultats, Marianini admet qu'il existe dans le fer, qu'on a aimanté puis ramené à l'état neutre au moyen de courants, des particules présentant des états magnétiques contraires, et dont les actions se contrebalancent. En effet, si l'on frappe le barreau ramené à l'état neutre, il est aimanté dans le sens primitif. Par exemple, un cylindre de fer aimanté, de 9<sup>cm</sup> de long et pesant 16<sup>gr</sup> environ, faisait dévier de 60° l'aiguille du *rhé-électromètre*. Ce cylindre ayant été ramené à l'état neutre au moyen de décharges, on le laissa tomber sur le pavé, successivement de 4, 5 et 20 décimètres; il fut alors aimanté et put dévier l'aiguille de 14°, 15° et 20°. Quand le barreau, au lieu d'être ramené à l'état neutre, reste un peu aimanté en sens contraire du sens primitif, un choc fait reparaître l'aimantation dans ce sens primitif. On peut remplacer le choc par le frottement, la flexion, la chaleur, et même des décharges à travers le barreau; toutes actions incapables d'aimanter le fer neuf. Si leur effet porte plus particulièrement sur l'état magnétique établi en second lieu, qui contrebalance celui qu'on avait établi d'abord, c'est que le dernier état s'obtient par tâtonnements, au moyen de faibles décharges qui produisent de faibles modifications dans des particules de plus en plus nombreuses, et l'expérience prouve que le choc, la chaleur..., diminuent relativement l'aimantation, d'autant plus

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XVI, pp. 436 et 448.

qu'elle est plus faible. — Pour confirmer ces explications, Marianini annula les effets magnétiques de 6 fils de fer, au moyen de 5 autres réunis en faisceau avec les premiers ; il plaça le faisceau dans une hélice, et, ayant déchargé une bouteille de Leyde de manière à produire l'aimantation dans le sens des 6 premiers fils, il vit le faisceau dévier l'aiguille du rhé-électromètre, de 49° ; tandis qu'il ne la déviait que de 22° quand la décharge était faite en sens contraire. Il retrouvait donc ainsi les différences d'aptitude que présentent les barreaux de fer.

**2142. SONS PRODUITS PAR LES COURANTS.** — Les mouvements moléculaires et autres qui se manifestent subitement pendant l'aimantation sont assez prononcés pour produire des vibrations sonores. Ces vibrations, dont la découverte a provoqué celle des mouvements moléculaires, ont été observées pour la première fois, en 1837, par M. Page, sur un aimant en fer à cheval dont il approchait rapidement les pôles d'une spirale plate parcourue par un courant. L'année suivante, Delezenne obtint un son en faisant tourner une armature de fer devant les pôles d'un aimant, ou *vice versa*. MM. de La Rive, Beatston, Marrian<sup>1</sup>, Gassiot, firent rendre des sons musicaux à des barres de fer, en introduisant un courant dans une hélice enveloppante, et M. Marrian reconnut que le son est le même que celui que rend la barre quand on la frappe à son extrémité. — D'après M. Beatston, une barre d'acier fortement trempée ne produit pas de son ; mais elle en rend un d'autant plus intense qu'elle est plus complètement recuite.

De La Rive a, le premier, attribué le son produit à la secousse due au déplacement brusque des molécules, au moment où elles reçoivent l'action du courant ; et, pour augmenter l'intensité et la durée du son, il fit passer le courant par intermittences rapprochées, entre autres au moyen d'une roue dentée métallique disposée comme celle de Pouillet (1991). Il put ainsi produire un son clair et soutenu dans une barre de fer de 10<sup>cm</sup> de diamètre, pesant 10 kilos. Le son était celui des vibrations longitudinales de la barre.

Un fil de fer tendu sur une espèce de sonomètre et traversant une hélice, donne le son des vibrations transversales, avec ses harmoniques, quand les interruptions du courant ne sont pas trop rapprochées. L'intensité du son est d'autant plus grande que l'une des extrémités de l'hélice est plus près du milieu de la corde ou d'un des nœuds qui tendent à s'y former, et que le fer est plus doux. L'acier trempé ne produit qu'un son très-faible. Il y a aussi, pour chaque fil, un degré de tension pour lequel l'intensité est maximum. Si l'on dépasse cette tension, l'intensité diminue, ainsi que le nombre des harmoniques distincts, les plus aigus disparaissant les derniers, et l'on finit par ne plus entendre que le son des vibrations longitudinales.

**Courant transmis.** — M. Beatston et de La Rive ont reconnu qu'on obtient des sons en faisant passer le courant intermittent dans le fil tendu. Ces sons sont les mêmes qu'avec une hélice ; seulement, le plus grave est un peu plus

<sup>1</sup> Arch. de l'électr., t. V, p. 195 à 233, et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 93.

bas, à cause de l'échauffement du fil. De La Rive trouve que ce son est d'autant plus intense que le fil est plus court et que sa résistance électrique se rapproche davantage de celle de la pile. Avec un fil de fer doux, le son est plus fort que dans une hélice, surtout si le fil est fin et s'échauffe un peu. Quand le fil est écroui, et surtout quand il est en acier, le son du courant transmis est, au contraire, plus faible que celui que donne une hélice. Si l'on échauffe le fil, l'intensité diminue.

Wertheim a obtenu des vibrations par le passage d'un courant discontinu à travers la tige rigide *ff'* de son appareil (*fig.* 1446); de fines pointes verticales adaptées aux extrémités, et plongeant dans des capsules de mercure, donnaient passage au courant intermittent. La hauteur du son restait la même quand les crochets étaient placés de manière que le courant ne parcourût qu'une partie de la tige; seulement l'intensité était moindre.

**Battements.** — Indépendamment des sons musicaux, on entend encore, dans tous les cas, des chocs ou battements, qui coïncident avec les interruptions du courant, et que de La Rive compare au bruit que font des gouttes de pluie en tombant sur une feuille de tôle. Ce qu'il y a de très curieux, c'est que ces battements se produisent avec la limaille de fer et même avec des poudres impalpables de fer, cobalt, nickel, obtenues par précipitation des oxydes par l'hydrogène. La poudre est étendue en couche de 2 à 3<sup>mm</sup>, dans une boîte tenue par une baguette, et que l'on introduit dans une hélice verticale. Les chocs coïncident toujours avec les interruptions du courant, la poudre s'agite tant qu'il n'y en a pas plus de 80 par seconde, et on la voit former des pyramides qui tournoient avec rapidité.

**2143. Explication du son provoqué par les courants.** — 1<sup>o</sup> Dans le cas où il y a une hélice, de La Rive remarque que le courant tend à disposer les molécules du fer en files longitudinales (2139), et que ces molécules reviennent en oscillant par élasticité, à leur position d'équilibre pendant les interruptions du courant. Les battements proviennent du déplacement brusque des molécules, et peuvent être comparés au bruit qui accompagne le frottement de l'archet sur la corde. Le son est d'autant plus intense que le fer étant plus doux, les molécules y sont plus faciles à déplacer. Si le fil de fer est aimanté par l'influence d'un aimant ou d'une autre hélice, le son est plus fort quand le courant intermittent tend à produire une aimantation de sens contraire, et il est plus faible quand il tend à en produire une de même sens; les molécules étant d'avance dans des positions voisines de celles que tend à leur imposer le courant. Une trop grande tension, en donnant aux particules une position forcée, diminue leur mobilité et rend le son plus faible.

Les mouvements de totalité observés par Wertheim lui ont servi à rendre compte des différents sons produits. Quand la barre *ff'* (*fig.* 1446) est placée suivant l'axe de l'hélice dans laquelle on fait passer le courant intermittent, elle rend, en vibrant longitudinalement, un son qui dépend de sa longueur, et non de la forme et de l'aire de sa section. L'amplitude des vibrations est assez grande pour que Wertheim ait pu les enregistrer par la méthode graphique. —



Quand la barre est en dehors de l'axe de l'hélice, le son longitudinal est moins pur, et il est accompagné de vibrations transversales visibles à l'œil nu, mais produisant un son tellement faible, qu'on ne le distingue qu'en appliquant l'oreille sur la table de l'appareil.

Des fils soumis à une tension suffisante, d'autant plus forte que le fil est plus fin, ne donnent que le son longitudinal très-pur ; mais à mesure qu'on diminue la tension, on entend des sons provenant des vibrations transversales, accompagnés d'un bruit de ferraille particulier, et d'autres bruits mal définis, et distincts surtout avec les fils un peu gros. Ces bruits paraissent dus à un ballotement transversal, car ils disparaissent quand on produit une tension latérale qui empêche ce ballotement.

2° Quand le courant parcourt directement un fil de fer ou d'acier, les particules tendent à s'y disposer transversalement (2136). Le courant discontinu doit donc alternativement déplacer ces particules, et les laisser revenir à leur position d'équilibre ; d'où les chocs coïncidant avec les intermittences, et le son longitudinal<sup>1</sup> A l'appui de cette explication, de La Rive a opéré sur un fil de cuivre enveloppé d'une gaine de fer, contiguë ou séparée par une couche de soie ou de cire ; le passage du courant discontinu dans le fil de cuivre produisait les mêmes effets, seulement moins intenses ; et une fente longitudinale ayant été pratiquée dans l'enveloppe de fer, ses deux bords furent aimantés en sens opposé. Les explications de de La Rive ont été confirmées par M. Wartmann<sup>2</sup>.

Si le fil est parcouru par un courant continu, en même temps que par le courant intermittent, et si les deux courants sont de même sens, le son cesse, ou du moins est notablement affaibli ; le courant intermittent trouvant les particules disposées, par le courant continu, comme il tend à les placer lui-même. Si l'on emploie un fil de fer éroui ou un fil d'acier, le courant continu favorise au contraire les vibrations, en ajoutant son action à celle du courant intermittent, qui a de la peine à déplacer les particules.

Si, l'un des deux courants passant par une hélice, l'autre suit le fil de fer, comme ils tendent à tourner les particules dans deux directions perpendiculaires l'une à l'autre, ces particules éprouvent des oscillations très prononcées, et l'on entend un son particulier très aigu. Quand le fil est aimanté, on obtient encore ce son aigu, au moyen d'un seul courant discontinu passant dans le fil, l'aimantation ayant disposé les particules tout autrement que le courant ne tend à les tourner. — Le fer aimanté traversé par un courant continu, et soumis à l'action intermittente d'une hélice, rendant le même son particulier qu'un fil d'acier trempé non aimanté, de la Rive en conclut que l'aimantation donne vraisemblablement aux particules du fer doux, une disposition semblable à celle que la trempe donne à celles de l'acier.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 93, et t. XXVI p. 485.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sciences), t. V, p. 419.

**2144. Vibrations dans les corps non magnétiques.** — De La Rive a tiré des sons, de gros fils métalliques non magnétiques, en y faisant passer un courant intermittent ; mais il faut que ces fils soient entourés d'une hélice, ou placés très près des pôles d'un électro-aimant, dans lesquels passe un courant continu. Cependant, on obtient un son, avec le fil seul, quand il est plié en hélice ; les spires produisant les unes sur les autres des actions réciproques remplaçant l'effet de l'hélice extérieure. Un courant continu dans le fil en hélice et dans le même sens que le courant intermittent, fait cesser ou du moins affaiblit notablement le son ; tandis que ce courant le renforce, quand il passe dans une hélice extérieure. Il semble résulter de là que l'hélice extérieure, ou l'électro-aimant, donne aux molécules non magnétiques des positions analogues à celles qui existent dans les fils magnétiques, positions que le courant discontinu vient ensuite changer par intermittences. Un courant continu dans le fil en hélice, imprimant d'avance aux particules les positions que devrait leur donner le courant discontinu, il n'y a plus de son. L'hélice extérieure renforce au contraire le son quand le courant y marche dans le même sens, parce qu'elle dispose les particules autrement que le courant discontinu, auquel ses spires sont à peu près perpendiculaires.

La forme de fil n'est pas la seule qui se prête à la production des sons ; un disque de laiton de 12<sup>cm</sup> de diamètre et de 1<sup>mm</sup> d'épaisseur, en produit également, quand, soutenu horizontalement par une tige métallique dans une hélice verticale parcourue par un courant continu, on la fait traverser par un courant intermittent, du centre à la circonférence ; ou en sens inverse. Le mercure même peut rendre des sons : on l'introduit dans un tube de quelques millimètres de diamètre contourné de manière à envelopper à peu près le pôle d'un électro-aimant, et on le fait traverser par le courant intermittent. Le son ressemble à celui d'une série de petites étincelles.

Le sifflement que produit l'arc voltaïque sous l'influence de l'électro-aimant (1951) est un effet du même genre ; le courant dans l'arc voltaïque étant formé d'une suite de décharges très rapprochées. Tous ces effets indiquent que le magnétisme a une action sur tous les corps ; ce que nous étudierons plus tard.

**2145. Sons dans les fils télégraphiques.** — Les fils de fer des télégraphes électriques produisent assez souvent des sons continus qui ont été signalés par M. Janiar. On les a attribués au passage des courants intermittents qui servent à produire les signaux. Mais ils ne s'entendent pas dans tous les états de l'atmosphère ; on les observe surtout quand le temps change rapidement. De La Rive les attribue à l'écoulement de l'électricité atmosphérique ; et il cite une observation faite, en 1821, à Bâle, par M. Haas, qui remarqua qu'un long fil de fer tendu à 1 mètre environ du sol, rendait un son quand le temps devait changer <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), t. II, p. 395.

## § 2. — ELECTRODYNAMIQUE.

## I. Actions des courants les uns sur les autres.

**2146.** A peine l'expérience d'Ersted (2119) était elle connue en France, qu'Ampère découvrait un phénomène nouveau, l'action des courants électriques les uns sur les autres, et entreprenait cette série de belles recherches expérimentales et théoriques qui l'ont conduit à la création d'une science nouvelle, l'électrodynamique, et à l'explication du magnétisme par l'électricité. Les appareils au moyen desquels ce savant illustre a établi les principes de cette science et en a vérifié les conséquences, ont reçu de lui-même et de divers physiciens, des modifications nombreuses destinées à les simplifier et à en faciliter l'usage. Nous nous attacherons à décrire les plus simples, et les plus généralement adoptés.

Dans les expériences, on a souvent besoin de changer le sens du courant dans une partie du circuit. On a imaginé pour cela de petits instruments dési-

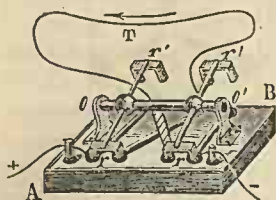


Fig. 1447.

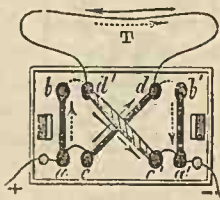


Fig. 1448.

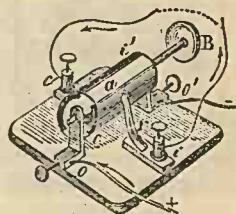


Fig. 1449.

gnés sous le nom de *commutateurs* ou *inverseurs du courant*. Nous allons en décrire cinq. Il en existe d'autres, dont nous aurons à citer quelques-uns, en décrivant les appareils dans lesquels ils sont spécialement employés.

**2147. Commutateurs.** — La fig. 1448 représente le *commutateur d'Ampère* où à bascule. *ab, a' b', cd* sont trois rigoles creusées dans une planche et remplies de mercure, et *c' et d'*, deux cavités remplies de même et réunies par une bande de cuivre *c' d'* qui croise la rigole *cd* en passant par dessus. Les électrodes de la pile s'enfoncent dans le mercure en *a, a'*, et les extrémités de la partie T du circuit dans laquelle on veut changer à volonté le sens du courant, dans les cavités *d, d'*. Si l'on joint *a, c* et *c', a'* par des arcs métalliques, le courant marche, en T, dans le sens *dTd'*. Si, au contraire, on réunit *bd'* et *b'd*, le courant marche comme les flèches ponctuées. La disposition des arcs qui servent à établir les communications se voit dans la figure 1447; ils sont fixés aux extrémités de leviers *rr', rr'* perpendiculaires à l'axe *oo'*, au moyen duquel

on peut les faire basculer de manière à établir les communications par les arcs  $r$ ,  $r'$ , ou par les arcs  $r''$ ,  $r'''$ , à volonté.

2° Le commutateur de *Ruhmkorff* (fig. 1449) consiste en un cylindre  $a$  en ivoire, recouvert en partie de deux plaques de cuivre  $c$ ,  $c'$ , dont l'une,  $c$ , communique avec le support  $o$  auquel s'attache le fil positif de la pile ; et l'autre avec le support  $o'$ , auquel aboutit le fil négatif. Deux ressorts opposés s'appuient sur le cylindre ; le premier,  $r$ , communique en  $i$  avec l'une des extrémités du fil du circuit ; l'autre communique en  $c'$  avec l'autre extrémité. Dans la position figurée du cylindre, le courant entre en  $o$ , passe par la plaque  $c$  dans le ressort  $r$ , parcourt le circuit et revient à la pile par  $c'$ , la plaque  $i'$  et le support  $o'$ . Si l'on tourne le bouton  $B$ , de  $180^\circ$ , le courant change de sens ; et si les extrémités des ressorts tombent entre les plaques métalliques, il est interrompu.

3°  $O$  (fig. 1452), est un disque de bois portant deux plaques métalliques  $c$ ,  $c'$ , et sur le contour duquel s'appuient quatre ressorts  $r$ ,  $r'$ ,  $s$ ,  $s'$ , en croix,

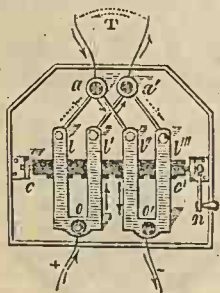


Fig. 1450.

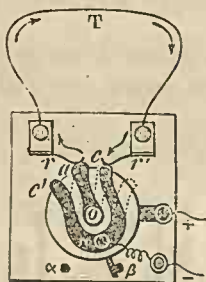


Fig. 1451.

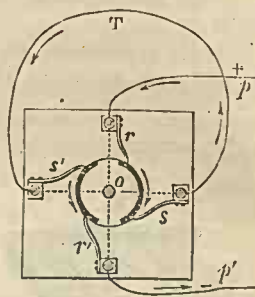


Fig. 1452.

fixés à des bornes auxquelles aboutissent les pôles  $p$ ,  $p'$  de la pile, et les extrémités du circuit  $T$ . Quand le cylindre est placé comme dans la figure, le courant marche, en  $T$ , dans le sens de la flèche ; mais si l'on fait tourner le cylindre de  $90^\circ$ , de manière que les ressorts  $r$ ,  $s'$ , s'appuient sur la même plaque métallique, et les ressorts  $r'$ ,  $s$ , sur l'autre plaque, le courant en  $T$  est renversé.

4° Dans le commutateur de la fig. 1450, deux paires de lames de laiton  $l'$ ,  $l''$  et  $l'''$ , sont portées par des colonnes isolées  $o$ ,  $o'$ , communiquant avec la pile. Ces lames s'appuient par leur extrémité libre sur quatre bornes isolées, qui communiquent par des fils obliques, dont deux se croisent sans se toucher, avec les bornes  $a$ ,  $a'$  auxquelles aboutit le circuit  $T$ . Un cylindre de bois  $c$ ,  $c'$ , mobile sur son axe, porte des renflements qui soulèvent les lames  $l'$ ,  $l''$ , ou les lames  $l$ ,  $l'''$ , suivant que la manivelle  $n$  est placée comme dans la figure, ou du côté opposé. Quand les lames  $l$  et  $l'''$  sont seules soulevées, le courant suit la direction des flèches. Quand elles sont abaissées par leur élasticité, et les lames  $l'$  et  $l''$  soulevées à leur tour, le courant suit en  $T$  la direction opposée.

Quand la manivelle est perpendiculaire à la table de l'instrument, le cylindre  $cc'$  présente un renflement aux quatre lames en même temps, et le courant est interrompu.

5° M. Bertin a imaginé le commutateur *fig. 1451*. Sur un disque de bois, sont deux bandes de cuivre  $oa$ ,  $c'nc$ . La première,  $oa$ , est fixée à un arbre métallique,  $o$ , qui communique avec la borne à laquelle on fixe le fil positif de la pile; l'autre fil se fixe en  $n$ , au talon de l'arc  $c'nc$ . Les extrémités du circuit  $T$  aboutissent aux ressorts  $r$ ,  $r'$ . Quand le disque est tourné comme dans la figure, le courant passe, en  $T$ , dans le sens des flèches. Si l'on tourne le disque de manière que les bandes  $oa$ ,  $c'nc$  s'inclinent à droite, dans les positions indiquées en lignes ponctuées, le courant change de sens en  $T$ , et le *doigt*  $aa$  indique vers quelle borne  $r$  ou  $r'$  il se dirige.  $\alpha$  et  $\beta$  sont des arrêts qui limitent les mouvements du disque.

**2148.** Pour étudier les actions mutuelles des courants, il faut employer des piles à grands éléments. Ampère se servait d'une pile de 10 à 12 couples, disposée comme celle d'Ersted (1821). Aujourd'hui, on emploie ordinairement 5 ou 6 couples de Bunsen.

Les actions qu'exercent les uns sur les autres les conducteurs parcourus par des courants, étant dues à l'électricité, on substitue, dans le langage, le mot *courant* au mot *conducteur*, et quand on parle de *courants rectangulaires, circulaires...*, on entend des fils métalliques pliés en forme de *rectangle, de cercle...* et parcourus par un courant.

Les actions des courants les uns sur les autres sont très-variées, mais on peut les rattacher à cinq principes d'expérience établis par Ampère. Pour observer ces actions, il faut rendre mobile la partie d'un circuit qui doit les subir; c'est à quoi l'on arrive par divers moyens, dont nous allons d'abord décrire les plus employés.

**2149. Manière d'obtenir une partie de circuit mobile.** — La figure 1453 représente une disposition très-ingénieuse imaginée par Ampère :  $c'dboac$  est une partie de circuit formée d'un fil de cuivre, et qui doit pouvoir tourner autour d'un axe vertical  $cc'$ . Pour cela, l'extrémité  $c$  est terminée par une pointe d'acier qui s'appuie sur le fond d'une petite coupe contenant du mercure. L'autre extrémité  $c'$ , recourbée en crochet, s'enfonce, sans en toucher les parois, dans une seconde coupe à mercure placée au-dessus de la première. Le système mobile, équilibré par le contrepoids  $P$ , peut alors pivoter avec facilité sur la pointe  $c$ . Le courant arrive ici par la tige  $r$ , et, après avoir parcouru la partie mobile du circuit, retourne à la pile par le tube métallique  $t$ , qui ne communique pas avec la tige intérieure. — Il ne faut jamais enlever la partie mobile pendant le passage du courant, car la pointe d'acier serait brûlée en quittant le mercure, par le passage de l'électricité sous forme d'étincelle.

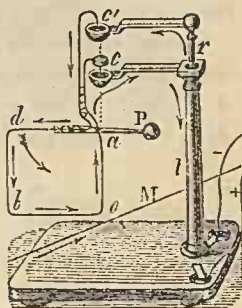


Fig. 1453.

On voit (fig. 1458) une disposition dans laquelle la coupe supérieure *c* est fixée à l'extrémité du fil, et reçoit une pointe à vis qui s'enfonce dans le mercure qu'elle contient, sans toucher les parois. — Ruhmkorff termine le fil par une aiguille d'acier *a* (fig. 1454), qui traverse librement le fond de la coupe *c*, dont le mercure ne peut s'écouler à cause de la tension capillaire à l'orifice.

G. de La Rive a imaginé un système de courants mobiles, dont l'usage a été généralisé par A. Pinaud. Le fil de cuivre *bad* (fig. 1455) est porté par un disque de liège flottant sur de l'eau acidulée, et sous lequel sont fixées une lame de zinc *z* et une lame de cuivre *c* formant un couple. Les pôles de ce couple sont mis en communication avec les extrémités du fil de cuivre, dans lequel le courant circule du cuivre au zinc. On peut aussi remplacer le couple zinc-cuivre par un petit couple à charbon, qui donne un courant beaucoup plus intense. Le vase poreux étant engagé par son ouverture dans le disque de liège, il est facile d'y introduire



Fig. 1454.

l'acide nitrique et le cylindre de charbon.

Comme les bulles de gaz qui se détachent de temps en temps du couple flottant impriment des secousses au système, et que la résistance du liquide nuit à sa mobilité, M. Carl a imaginé de placer le couple dans un vase cylindrique (fig. 1456), lesté par du mercure *m*, et flottant sur de l'eau pure. En *a* et *a'* sont des attaches auxquelles on fixe, au moyen de vis, les extrémités de circuits de différentes formes.

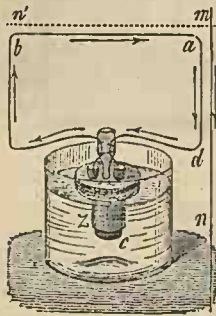


Fig. 1455.

**Table d'Ampère.** — Ampère avait imaginé de rassembler en un seul appareil, nommé *table d'Ampère*, toutes les pièces nécessaires à la reproduction de la plupart de ses expériences; mais la complication de cet appareil et la difficulté d'y suivre la marche des courants l'ont fait généralement abandonner, et l'on préfère aujourd'hui se servir d'appareils distincts pour chaque genre d'expérience.

M. Bertin a imaginé un appareil qui peut remplacer la table d'Ampère, tout en présentant une grande simplicité. Il est représenté (fig. 1457) tel que le construit M. Ducretet. Les extrémités du courant mobile *H* sont isolées dans un disque d'ébonite; l'une d'elles se termine par une pointe qui s'appuie au fond d'une coupe à mercure *C*, et l'autre aboutit à un anneau de cuivre muni de trois tiges auxquelles est fixé un cercle de cuivre *A*, qui équilibre le système et plonge dans de l'eau acidulée, qui le fait communiquer



Fig. 1456.

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de phys., 2<sup>e</sup> série, de 1820 à 1828, et *Théorie des phén. électrodyn.* (1826).

avec un des pôles de la pile. L'autre pôle communique à la colonne *t*, qui peut s'allonger plus ou moins, et est isolée du vase métallique qui contient l'eau

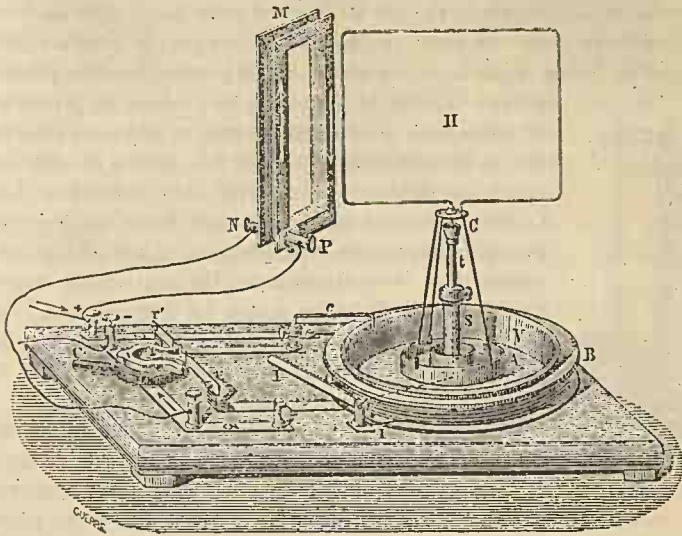
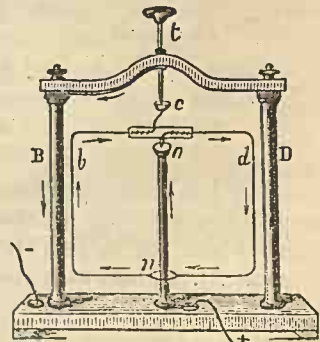


Fig. 1457.

acidulée. Un commutateur à indicateur *C* sert à renverser le courant dans la partie mobile, en indiquant dans quel sens il se dirige.

**2150. I. Actions des courants parallèles.** — Deux courants parallèles s'attirent quand ils sont de même sens, et se repoussent quand ils sont de sens contraire. Cette première loi se démontre au moyen de l'appareil (fig. 1458). Le pôle positif d'une pile est mis en communication avec le pied de la colonne *no*; le courant monte par cette colonne, suit dans le rectangle mobile *dnb* la direction des flèches, et revient à la pile par la tige *t*, et la colonne *B*, dont le pied communique avec le pôle négatif. On a ainsi deux portions de circuit parallèles *B*, *b*, dont une, *b*, est mobile. Si les courants y sont

Fig. 1458.  $\frac{1}{12}$ 

en sens inverse, comme dans la figure, la partie *b* s'écarte vivement de la colonne *B*. Si, au contraire, on retourne le rectangle de manière à amener le côté *d* près de *B*, les courants en présence sont de même sens, et l'on voit

la partie *d* marcher vers B, et finir par s'arrêter à la plus courte distance, après quelques oscillations. — On obtient des effets plus intenses en faisant sortir le courant par le haut de la colonne D, dont on fait alors communiquer le pied avec celui de la colonne B, l'action de D sur *d* s'ajoutant à celle de B sur *b*.

La même loi peut être mise en évidence au moyen de l'appareil flottant (fig. 1455). Si l'on approche en *mn* un fil vertical joignant les deux pôles d'une

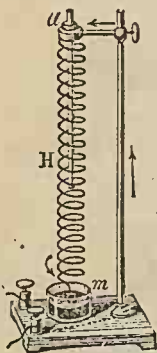


Fig. 1459.  $\frac{1}{15}$

pile, ce fil attire le côté *ad*, si les courants en présence sont de même sens. — Si l'on présente ce fil en *mn'*, horizontalement et latéralement au côté *ba*, on voit ce côté se déplacer parallèlement à lui-même en entraînant le flotteur. Comme le courant mobile est assez faible, on rend ses actions plus intenses en faisant faire au fil *bad* plusieurs tours, comme dans le *multiplieur*. On peut encore approcher d'un des côtés du cadre mobile un *multiplieur*, comme dans l'appareil (fig. 1457), dans lequel le cadre M peut être parcouru par le même courant que le cadre mobile II, ou par un courant particulier.

Les actions mutuelles des courants parallèles sont tout à fait distinctes de celles que produit l'électricité de tension : 1° elles cessent aussitôt que le courant est interrompu ; 2° l'attraction a lieu quand les extrémités de même nom sont en présence ; 3° l'attraction n'est pas suivie de répulsion après le contact.

M. le Dr Roget a imaginé l'expérience curieuse suivante, fondée sur l'attraction des courants parallèles de même sens. Une hélice métallique H (fig. 1459) suspendue verticalement, enfonce légèrement son extrémité inférieure dans du

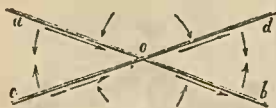


Fig. 1460.

mercure *m*. Si l'on fait passer le courant de 5 couples de Bunsen à travers l'hélice, les spires, s'attirent, se rapprochent, et l'extrémité quitte le mercure en produisant une vive étincelle. Le courant étant alors interrompu, les spires redescendent par leur poids, le courant se rétablit, et l'on obtient une nouvelle étincelle, et ainsi de

suite. Si l'on enfonce un aimant *a* dans la partie supérieure de l'hélice, les mouvements sont plus étendus, l'aimant agissant sur les spires pour les ramener vers son milieu (2136).

**2151. II. Actions des courants croisés.** — Deux courants qui se croisent s'attirent quand ils marchent dans le même sens par rapport au point de croisement, et se repoussent dans le cas contraire. Le point de croisement doit s'entendre d'un point quelconque de la perpendiculaire commune aux deux courants. Soient *ab*, *cd* (fig. 1460), deux courants qui se croisent sans se rencontrer, et qui sont dirigés dans le sens des flèches. D'après l'énoncé, les parties *ao*, *co*, et *od*, *ob* s'attirent, tandis que les parties *od*, *oa*, et *ob*, *oc*, dont une s'éloigne du point *o*, tandis que l'autre s'en approche, se repoussent. Si donc un des courants est



mobile autour du point  $o$ , il tournera jusqu'à ce qu'il soit parallèle à l'autre et de même sens.

Pour établir ce principe par l'expérience, on tend horizontalement au-dessous du côté  $bo$  (fig. 1453) du cadre mobile  $do$  parcouru par un courant, un fil rhéophore  $M$ , de manière qu'il rencontre la verticale  $c'e$ . Si les courants en présence marchent dans le sens des flèches, l'angle  $bon$  se ferme, de manière à indiquer une attraction. Si l'on change le sens de l'un des courants, l'angle s'ouvre. On peut faire passer le courant de la même pile dans le fil  $M$  et dans le cadre  $aobd$ . On peut aussi disposer ce cadre sur un couple flottant (fig. 1455) ou sur le support  $C$  (fig. 1457).

La fig. 1461 représente en coupe et en perspective, un autre système de courant mobile autour d'une de ses extrémités. Au milieu d'un vase métallique



Fig. 1461.

annulaire  $VVuu$  rempli d'eau acidulée, s'élève une colonne métallique  $re$ . Un fil de cuivre  $cf$  dont l'extrémité recourbée  $f$  plonge dans l'eau acidulée, peut pivoter sur une pointe reposant au fond d'une coupe à mercure  $c$ ; il est équilibré par une petite masse  $p$ . Les pôles d'une pile arrivent en  $a$  et  $b$  d'où partent des bandes de cuivre, communiquant l'une,  $a$ , avec la colonne  $re$ , l'autre,  $b$ , avec un vase annulaire  $VV$  par l'eau acidulée qu'il contient. Si le pôle positif aboutit en  $a$ , le courant marche de  $c$  en  $f$  dans le fil  $cf$ ; et pour faire l'expérience on place un courant rectiligne  $mn$  horizontal au-dessus du point  $c$ .

Si l'on dispose au-dessus du milieu du côté horizontal du circuit mobile (fig. 1455 et 1457) un courant horizontal  $mn'$ ; on voit le système mobile tourner sur lui-même jusqu'à ce que les courants horizontaux soient parallèles et de même sens.

On emploie encore, pour la dernière expérience, la disposition (fig. 1462) : deux rigoles demi-circulaires  $A$  et  $B$ , séparées en  $o$  et  $o'$ , sont creusées dans une table de bois et contiennent du mercure communiquant avec les pôles de la pile.  $ac$  et  $r$  sont deux aiguilles dont les extrémités se replient et plongent dans le mercure des rigoles, la seconde, très légère, est mobile sur une pointe isolée, placée au centre de l'appareil. Le courant se partage entre les



Fig. 1462.

<sup>1</sup> Dans la figure 1453 et dans celles qui suivront, les flèches empennées indiquent les déplacements; et les flèches simples, le sens des courants.

deux aiguilles, et  $r$  tourne jusqu'à ce qu'elle soit parallèle à l'autre, les courants qui les parcourent étant de même sens.

La figure 1463 représente un appareil imaginé par M. Vignes et construit par M. Ducretet, dans lequel on met en jeu les actions des courants croisés et des courants parallèles. Un circuit rectangulaire CD mobile sur une pointe placée en D, et maintenu par une aiguille supérieure isolée, communique par ses extré-

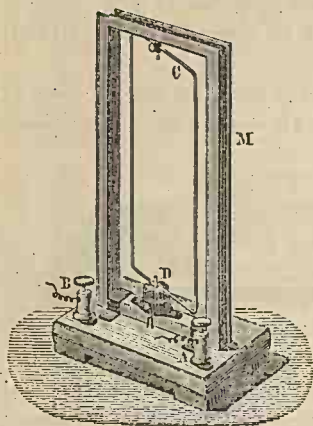


Fig. 1463.

mités, en D, avec deux parties de mercure séparées dans un vase annulaire, par une cloison isolante. Le courant d'une pile passe par le mercure dans le rectangle CD, après avoir parcouru le multiplicateur M. Si la cloison en D est à peu près parallèle au plan du multiplicateur, et si les bouts du fil CD peuvent passer par dessus la cloison, comme dans le tourniquet de Clarke (2131), le courant change de sens dans CD toutes les fois que son plan vient se confondre avec celui de M, et le circuit CD prend un mouvement de rotation continu.

**2152. Remarque.** — M. Bertrand, en appliquant le calcul aux actions mutuelles de deux éléments de courant, a reconnu que l'action est nulle quand un de ces éléments est tangent à une certaine surface

de révolution dont il donne l'équation, et dont l'axe passe par l'autre élément. Suivant que le premier élément partant de cette surface est dans l'intérieur ou à l'extérieur, l'action est attractive ou est répulsive, les deux courants étant cependant toujours dirigés de la même manière par rapport au point de croisement. La loi des courants croisés n'est donc pas générale, comme on l'avait cru depuis Ampère; elle ne s'applique qu'à quelques cas spéciaux, qui sont précisément ceux qu'il avait étudiés dans ses expériences, et qui sont heureusement les seuls dont on ait besoin pour expliquer les conséquences des 5 principes qui nous occupent. Du reste, M. Abria a prouvé que ces cas spéciaux rentrent dans les formules de M. Bertrand, et peuvent s'en déduire facilement comme cas particuliers <sup>1</sup>.



Fig. 1464.

**2153. III. Les parties consécutives d'un même courant se repoussent.** — Pour le

prouver, Ampère emploie une cuve en bois verni (fig. 1464), partagée par une cloison isolante, en deux compartiments contenant du mercure. Sur ce liquide flotte un gros fil de cuivre recourbé en  $ac$  de manière à passer par dessus la

<sup>1</sup> Journal de physique de M. d'Almeida, t. III, p. 343, et t. VI, p. 342.

cloison. Les branches parallèles de ce fil touchent les électrodes d'une pile, enfoncées dans le mercure; de sorte que le courant passe d'un compartiment à l'autre par l'arc *ac*. Dès que le courant est établi, le fil de cuivre s'éloigne vivement des électrodes. Pour que l'expérience réussisse, il faut que la surface du mercure soit bien propre et les extrémités du flotteur bien découpées. En mouillant, la surface du mercure d'eau légèrement acidulée, on réussit facilement.

MM. Van-Bréda et Logeman prouvent la répulsion dans le courant, par différents moyens ingénieux<sup>2</sup>. 1° On suspend au plateau d'une balance en équilibre, un fil de cuivre recourbé en U renversé, et dont les deux branches s'enfoncent dans le mercure de deux capsules qui reçoivent les rhéophores d'une pile.

Le courant passe d'une capsule à l'autre à travers le fil recourbé, ce fil est soulevé, puis redescend par son poids, le courant étant interrompu, et fait ainsi osciller la balance, en formant un *interrupteur* automatique, qui peut être utilisé dans certains cas. — 2° On suspend des

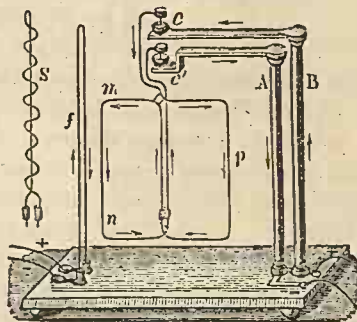


Fig. 1465.

boules de fer de 8 à 10<sup>mm</sup> de diamètre, en série horizontale, par des fils verticaux, les boules extrêmes communiquant avec des capsules pleines de mercure dans lesquelles plongent les rhéophores d'une pile. Avec 10 couples de Grove, on voit les boules extrêmes s'écarter de 1<sup>mm</sup>, et l'on distingue entre les autres, des étincelles qui indiquent qu'elles ne se touchent plus. — 3° Un courant qui passe par le point de contact de deux masses métalliques superposées, les fait vibrer comme dans l'harmonica

thermique (I, 569). Un bloc de cuivre de 3 kil. en forme de V très ouvert, peut vibrer ainsi sur une masse de plomb, sous l'influence du courant d'un seul couple de Grove.

M. Gore a fait une expérience curieuse qui semble se rattacher au même principe de répulsion : il pose sur deux rails circulaires communiquant avec les pôles de la pile, une balle de métal creuse très-légère ; cette balle est mise en mouvement par des répulsions inégales exercées aux points d'appui, la balle n'étant pas régulière, comme dans l'expérience du planisphère électrique (1597).

Le principe qui nous occupe peut être regardé comme une conséquence du précédent ; car chaque point d'un fil rhéophore peut être considéré comme le point de croisement de deux courants faisant entre eux un angle de 180°, et qui dirigés en sens opposé par rapport à ce point, doivent se repousser.

**2154. IV. Actions des courants contraires.** — Deux parties contraires de courant, de même longueur, appartenant au même circuit, attirent et repous-

<sup>1</sup> Cosmos, Revue des sciences, de M. l'abbé Moigno, t. XIII, p. 144.

sent avec la même intensité. Pour le prouver on présente parallèlement au côté  $mn$  d'un courant rectangulaire  $pnm$  (fig. 1465), un fil de cuivre replié sur lui-même,  $f$ , dans lequel passe un courant. On trouve que ce double fil n'exerce aucune action sur le côté  $mn$ . L'attraction exercée par une des parties de  $f$  est donc égale à la répulsion exercée par l'autre.

Pour démontrer le même principe dans le cas des courants croisés, on suspend dans les coupes  $c, c'$ , le circuit mobile (fig. 1466), et l'on approche un courant horizontal coupant l'axe  $oo'$ ; il n'y a pas d'action.

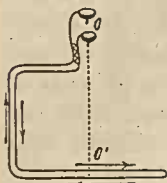


Fig. 1466.

**Conséquence.** — L'action d'un courant fini  $ac$  (fig. 1467), perpendiculaire à un plan qui le coupe par son milieu, est nulle sur une portion de courant  $m$  située dans ce plan. En effet, les intensités des actions exercées par les deux moitiés  $a$  et  $c$  sont



Fig. 1467.

égales, d'après ce que nous venons de voir, et elles sont contraires, le courant s'approchant du point de croisement dans la partie  $a$ , et s'en éloignant dans la partie  $c$ .

**2155. V. Courants sinueux.** — Un courant quelconque produit le même effet qu'un courant sinueux de même intensité, qui s'écarte très-peu du premier par rapport aux distances auxquelles ces courants agissent. Ce principe se démontre en remplaçant le double fil  $f$  (fig. 1465), par le système  $S$ , dont les parties sinueuses et rectilignes sont parcourues en sens contraire par le même courant : on constate qu'il n'y a aucun effet produit sur le courant mobile  $mn$ . On fait la même vérification pour les courants croisés, au moyen d'un système semblable à celui de la figure 1466, mais dont une moitié de la partie horizontale est sinieuse.

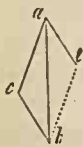


Fig. 1468.

**Composition et décomposition des courants.** — Il résulte du principe précédent qu'une petite portion rectiligne de courant  $ab$  (fig. 1468) agissant sur un point éloigné, peut être remplacée par deux autres  $ac, cb$  de même intensité terminées aux points  $a$  et  $b$ ; ou par les parties égales  $ac, ab$ . On peut donc appliquer aux courants, la règle du parallélogramme des forces, pour les composer et les décomposer. On peut de même appliquer la règle du parallépipède des forces. Il faut seulement remarquer que ce ne sont pas les forces des courants, qui sont composées ou décomposées; mais que les courants eux-mêmes sont remplacés par d'autres, de longueur convenable pour produire le même effet.

Au moyen des cinq principes qui précèdent, on peut se rendre facilement compte de ce qui se passe quand on met deux courants en présence, dans une foule de conditions données. Nous allons examiner quelques-unes de ces conséquences, et montrer comment on les vérifie par l'expérience.

**2156. Courant indéfini sur un courant fini perpendiculaire.** —

Soit le courant fini  $ab$  (fig. 1469) pouvant se déplacer parallèlement à lui-même, et dirigé vers le courant indéfini  $mn$ , et  $oo'$  la perpendiculaire commune à leurs deux directions. Le courant  $ab$  et la partie  $om$  du courant indéfini s'attirent, comme marchant en même temps vers le point de croisement.  $ab$  est, au contraire, repoussé par la partie  $on$  qui s'éloigne du point de croisement. Les deux actions appliquées en  $c$  sont égales et également inclinées sur  $ab$ ; leur résultante  $cr$  est donc perpendiculaire à  $ab$  qu'elle entraîne en sens contraire du courant  $mn$ . — Si le courant  $ab$  marchait de  $b$  en  $a$ , il se déplacerait dans le sens du courant  $mn$ .

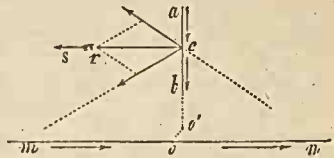


Fig. 1469.

Si le point  $o'$  tombe au milieu de  $ab$ , les actions sur les deux moitiés sont égales et contraires, et  $ab$  reste en repos. Si le point  $o$  ne tombe pas au milieu de  $ab$ , l'effet est dû à la différence des actions sur les deux parties de  $ab$ , et le sens du mouvement est déterminé par la plus grande.

En vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, si  $ab$  est fixe et  $mn$ , mobile suivant sa longueur, ce dernier s'avancera dans le sens  $mn$  si  $ab$  est dirigé vers  $o'$ , et dans le sens  $nm$ , dans le cas contraire.

Pour vérifier ces conséquences, déduites par Ampère, on se sert du vase annulaire  $V$  (fig. 1470), au milieu duquel est une colonne isolée  $Cc$ . Dans la coupe  $c$  pivote sur une pointe, un balancier de bois supportant un fil vertical de cuivre,  $r$ , dont l'une des extrémités plonge dans de l'eau acidulée, tandis que l'autre communique avec la colonne  $cC$ . On fait passer un courant par la colonne  $cC$  et le vase  $V$  au moyen des fils  $b, a$ , et l'on approche un courant horizontal  $mn$ , de la partie inférieure du fil  $r$ . On voit ce dernier se mouvoir de manière à se porter du côté  $m$  s'il est descendant, et du côté  $n$ , s'il est ascendant.

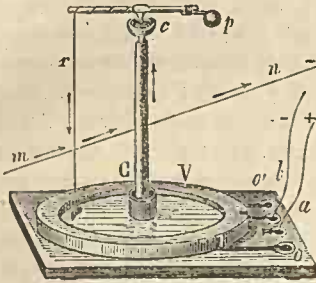


Fig. 1470.

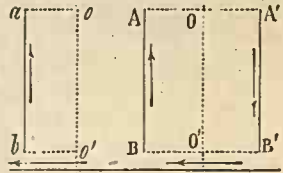


Fig. 1471.

Il résulte de là que : 1° dans un système de deux courants contraires  $AB, A'B'$  (fig. 1471), liés entre eux, mobiles autour de l'axe  $OO'$ , et soumis à l'influence d'un courant indéfini perpendiculaire à cet axe, les actions sur  $AB$  et sur  $A'B'$  s'ajoutent, et le système prend une position d'équilibre stable dans laquelle le plan  $A'B'$  est parallèle au courant indéfini. 2° Si les deux courants sont de même sens, il y a équilibre instable quand leur plan est parallèle au

courant indéfini; et dans une position quelconque de leur plau, si ce dernier courant est à une distance infinie du système mobile.

**2157. Rotation d'un courant rectiligne fini par un courant rectiligne indéfini.** — Soit  $oa$  (fig. 1472) un courant fini pouvant tourner dans un plan autour du point  $o$ , vers lequel nous supposons qu'il marche, et  $mn$  le courant indéfini. Le courant  $oa$  est attiré par la partie  $Am$ , qui s'éloigne comme lui, du point de croisement  $A$ , et est repoussé par la partie  $nA$ ; il tournera donc dans le sens de la flèche  $s$ . Arrivé à la position  $oc$ , il est repoussé par le courant  $mn$ , auquel il est alors parallèle, passe au-dessus de  $cc'$ , par exemple en  $oe$ , où il est attiré par  $nE$  et repoussé par  $Em$ ; devient parallèle à  $mn$ , en  $oc'$ , où il est attiré; puis descend au-dessous de  $cc'$ , et est de nouveau sollicité de droite à gauche.  $oa$  tournera donc d'une manière continue, et en marchant dans le sens du courant  $mn$  dans ses positions les plus rapprochées de ce courant. —

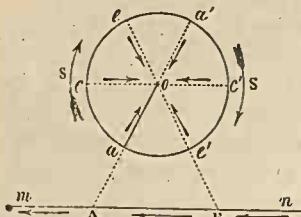


Fig. 1472.

Si l'on renversait le courant dans  $ao$ , la rotation changerait de sens. Le mouvement s'accélère dans la demi-circonférence  $c'ac$ , où  $ao$  est plus près de  $mn$ ; et si  $mn$  était très-éloigné de  $oa$ , le mouvement serait sensiblement uniforme.

Quand le courant  $mn$  est assez rapproché du centre  $o$  pour que le point de croisement vienne tomber sur  $oa$  (fig. 1473), à partir de l'instant où cela a lieu, l'effet est dû à la différence des moments, par rapport à  $o$ , des forces qui agissent sur les deux parties du courant mobile. Si la distance de  $mn$  au point  $o$  est assez petite pour qu'il y ait deux positions  $ao$ ,  $a'o$ , pour lesquelles les deux moments soient égaux, il y a équilibre dans ces positions. Entre elles, le moment de la partie extérieure du courant mobile l'emporte sur celui de la partie voisine du centre; l'équilibre est donc stable dans la position  $ao$ , que le courant mobile prend la première, et instable pour la position  $a'o$ . Si le courant indéfini est en  $m'n'$ , à une distance telle que les deux positions d'équilibre se confondent en une seule  $oc$ , dans laquelle le courant mobile est perpendiculaire à  $m'n'$ , l'équilibre est stable pour les mouvements en arrière et instable pour les mouvements en avant.

Pour vérifier ces résultats, on se sert de l'appareil (fig. 1461); on tend le courant indéfini horizontalement dans le plan que parcourt le courant mobile  $cf$ , qui tourne dans le sens prévu.

**2158. Courant horizontal indéfini, sur un système de courants horizontaux et verticaux.** — 1° Soit le système ADCB (fig. 1474) de deux courants verticaux de même sens, et de deux courants horizontaux de sens contraire soumis à l'action d'un courant indéfini  $mn$  placé latéralement. Les

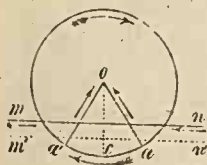


Fig. 1473.

deux courants verticaux tendent à diriger le plan du système parallèlement à  $mn$  (2156), et les parties horizontales  $DO$ ,  $OC$  tendent à le faire tourner dans le même sens d'une manière continue. Il pourra donc y avoir équilibre dans une position plus ou moins oblique du plan  $AC$ , ou mouvement de rotation, suivant les longueurs relatives des parties horizontales et verticales. Si  $mn$  est à une très-grande distance du système mobile, il y aura toujours rotation, les actions sur les parties verticales s'entre-détruisant. — Tous ces résultats se vérifient en suspendant en  $c$  (fig. 1470) le fil de cuivre  $sof'$  (fig. 1477).

2° Si, les courants verticaux étant de sens contraire, et les courants horizontaux, de même sens, comme en  $bade$  (fig. 1474), le courant  $mn$  rencontre

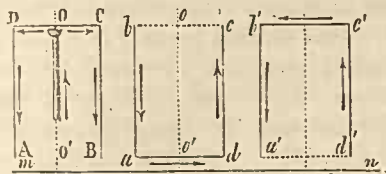


Fig. 1474.

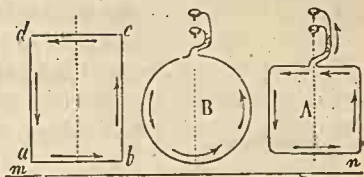


Fig. 1475.

l'axe  $oo'$ , ou en est à une distance plus grande que  $o'a$ , le système prend une position d'équilibre stable, le plan  $ac$  étant parallèle à  $mn$ ; les actions exercées sur les deux parties verticale et horizontale agissant dans le même sens. — Dans le cas du système  $a'b'c'd'$ , les actions sur les parties horizontale et verticales sont opposées, et le résultat dépend de la longueur relative de ces parties.

3° Un courant rectangulaire fermé  $abcd$  (fig. 1475) soumis à l'action de  $mn$  prend une position d'équilibre dans laquelle son plan est parallèle à  $mn$ , de manière que les courants soient de même sens dans la partie parallèle la plus rapprochée,  $ab$ . Si le courant  $mn$  était transporté près de  $dc$ , le plan  $ac$  tournerait de  $180^\circ$ . Quand le courant  $mn$  est très-éloigné, les actions sur les parties horizontales s'entre-détruisent, et la position d'équilibre ne dépend que des parties verticales.

Tout cela s'applique à un circuit fermé de forme quelconque, chaque élément oblique pouvant être remplacé par deux autres, l'un vertical, l'autre horizontal (2155).

Pour vérifier ces résultats, on suspend au support (fig. 1465) les circuits fermés A ou B (fig. 1475); on les voit se placer parallèlement à un courant horizontal très-long qu'on en approche, et de manière que les courants soient de même sens dans la partie la plus rapprochée.

**2159. Courant circulaire sur un courant fini perpendiculaire à son plan.** — Soit  $ac$  (fig. 1476) un courant vertical fini, mobile autour d'un axe parallèle  $oo'$  passant par le centre du courant circulaire horizontal  $nam$ . Si nous considérons les parties  $m$  et  $n$  les plus voisines de  $ac$ , et le point de croisement  $aa$ ,

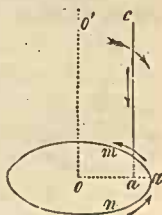


Fig. 1476.

il est facile de voir que la partie  $n$  attire  $ca$ , comme s'approchant en même temps du point de croisement, tandis que la partie  $m$  le repousse. La partie mobile  $ca$  tournera donc en sens contraire du courant circulaire; elle tournerait dans le même sens, si le courant allait de  $a$  en  $c$ . Les effets seraient les mêmes si  $oa$  était plus grand que le rayon du cercle.

Ces résultats se vérifient au moyen de l'appareil (fig. 1470). Après avoir enlevé le courant  $mn$ , on entoure le vase  $V$  d'un ruban de cuivre revêtu de soie, faisant plusieurs tours,  $mn$  (fig. 1477), qu'on loge dans l'épaisseur des

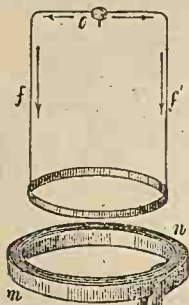


Fig. 1477.

parois du vase  $V$  (fig. 1470), et dont les extrémités communiquent en  $o$  et  $o'$  avec les pôles d'une pile. On peut aussi substituer au courant unique  $r$  le double courant  $sof'$  (fig. 1477), dont les deux parties  $f$  et  $f'$  reçoivent l'impulsion dans le même sens. Le système mobile tourne d'un mouvement uniforme dans le sens prévu. On peut enfin employer une seule pile, en réunissant les coupes  $o$ ,  $a$  et  $b$ ,  $o'$  (fig. 1470), auquel cas le courant de la pile se partage entre le multiplicateur circulaire et le courant mobile; ou bien en joignant  $bo'$  et plongeant le fil négatif de la pile en  $o$ , de manière que le courant passe du système mobile dans le multiplicateur circulaire. — Si l'axe de rotation ne passait pas par le centre du courant circulaire, le mouvement ne serait plus uniforme.

**2160. Courant circulaire sur un courant fini tournant dans un plan parallèle.** — Soit  $oa$  (fig. 1478) le courant fini pouvant tourner autour de son extrémité placée au centre du courant circulaire  $mn$ , et marchant du centre à la circonférence;  $oa$  est attiré par la partie  $n$  du courant circulaire, et repoussé par la partie  $m$ , et, comme il en est de même dans toutes les positions,  $oa$  tournera d'un mouvement uniforme en sens contraire du courant circulaire. Il tournerait dans le même sens s'il marchait vers le centre.

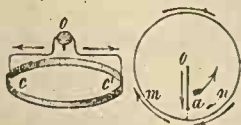


Fig. 1478.

Ces résultats se vérifient au moyen de l'appareil (fig. 1461); le courant  $mn$  étant supprimé, on entoure le vase annulaire d'un multiplicateur circulaire, et le courant  $of$  tourne dans le sens prévu; ce sens change donc quand on renverse le courant dans  $of$ .

Au lieu de  $of$ , on emploie de préférence le système mobile  $oc'$  (fig. 1478), dont les deux parties  $oc$  et  $oc'$  sont poussées dans le même sens. Les parties verticales étant très-courtes, leur influence est négligeable, et l'on peut se servir d'une seule pile, comme dans l'expérience précédente (2159). La partie mobile, dans ces deux expériences, peut être placée sur la colonne centrale de l'appareil de M. Bertin (2149), dont on règle convenablement la hauteur, et dont le vase est entouré d'un multiplicateur circulaire.

Si l'axe de rotation n'était pas au centre du cercle, le mouvement ne serait



plus uniforme; et, si l'extrémité  $a$  dépassait ce cercle dans certaines positions, il pourrait y avoir équilibre, comme dans le cas d'un courant indéfini (2157), la partie qui dépasse le cercle tendant à marcher en sens contraire de celle qui est dans l'intérieur.

**Rotation du courant circulaire.** — Si le conducteur  $oa'$  est fixe (fig. 1478), et le conducteur circulaire, mobile sur son centre, ce dernier tourne sur lui-même dans le sens même du courant qui le parcourt, quand le courant  $oa$  va du centre à la circonférence; et en sens opposé, dans le cas contraire. Si  $oa$  était extérieur au courant circulaire, les mouvements de ce dernier seraient contraires à ceux qui ont lieu quand  $ao$  est intérieur. Pour vérifier ce dernier résultat, Savary suspend sur la colonne centrale du vase annulaire de la figure 1480, la spirale plane  $ab$  (fig. 1779). Le courant arrivant par la colonne centrale, suit les spires, d'où il s'échappe en rayonnant vers les parois du vase. En chaque point,  $n$ , de la spirale, se croisent deux courants: l'un  $r$ , relativement fixe et dirigé dans le liquide suivant le prolon-

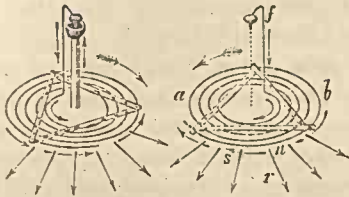


Fig. 1479.

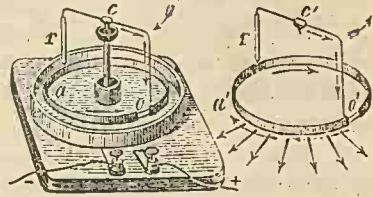


Fig. 1480.

gement du rayon; l'autre,  $s$ , qui parcourt la spirale. Ces deux courants agissent l'un sur l'autre de manière à faire tourner celle-ci en sens contraire du courant qui la parcourt. Si l'on renverse le courant, le mouvement ne change pas de sens, seulement, les courants dans le liquide vont des parois du vase à la spirale, et le mouvement est dans le même sens que le courant dans celle-ci. Si la spirale *dextrorsum*  $ab$  était remplacée par la spirale *sinistrorsum* figurée à sa gauche, le sens des mouvements serait inverse.

Ampère obtient la rotation d'un courant circulaire, au moyen de l'un des systèmes  $aco, a'c'o'$ , (fig. 1480).  $r, r$  est une lame de bois, et  $o, o'$  une bande d'ivoire. On voit que  $a'c'e'$  se comportera comme la spirale *dextrorsum*, et  $aco$ , comme la spirale *sinistrorsum*; car le courant, quand il arrive par la colonne, parcourt le cercle  $a'o'$ , de  $o'$  en  $a'$ , et le cercle  $ao$  de  $a$  en  $o$ , pour s'en échapper par tous les points, en rayonnant à travers le liquide. Le sens de la rotation est indépendant de celui du courant, comme pour les spirales.

**2161. Courant circulaire, sur un courant mobile autour d'un axe perpendiculaire à son plan.** — Considérons d'abord le système  $abcd$  (fig. 1481) mobile autour d'un axe  $oo'$  qui passe par le centre du courant circulaire; il est facile de voir que les actions sur les quatre parties  $ab, cd, oc, ob$

s'ajoutent pour produire le mouvement de rotation. Si les deux parties *abo*, *ocd* étaient la continuation du même courant, ce courant serait évidemment astatique.

**Cas d'équilibre.** — Dans le conducteur *c'ABc* terminé à l'axe *cc'* passant par le centre du courant circulaire, les actions sur *cB* et sur *BA* tendent à faire tourner le système dans un sens, et l'action sur *c'A*, dans le sens opposé; et comme cette dernière action s'exerce à une moindre distance, on ne peut prévoir le résultat. L'expérience montre que l'effet est nul, quel que soit le point où le plan du courant circulaire coupe *AB*. Le résultat

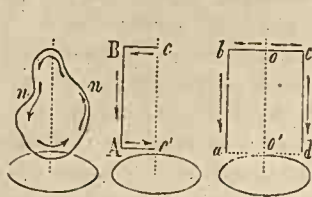


Fig. 1481.

est le même quand le conducteur présente la forme d'une courbe quelconque ayant ses extrémités sur l'axe *cc'*; chaque élément oblique pouvant être remplacé par deux autres, l'un parallèle, l'autre perpendiculaire à l'axe (2155).

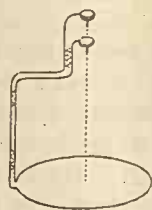


Fig. 1482.

Si le courant mobile se continue de l'autre côté de l'axe, comme en *mn*, l'action sur chaque partie étant nulle, l'ensemble restera en équilibre. On peut donc dire que : *un courant fermé de forme quelconque, mobile autour d'un axe qui le coupe en deux points, ne reçoit aucune action d'un courant circulaire perpendiculaire à cet axe passant par son centre.* — Réciproquement, si le courant fermé est fixe, il n'a aucune action sur un courant circulaire ou sur une partie de courant circulaire mobile autour de son axe.

Pour vérifier ces résultats, on place au-dessus du système mobile *A* et *B* (fig. 1455) le multiplicateur circulaire (fig. 1477), en ayant soin que son centre coïncide avec l'axe de rotation du circuit mobile. — Pour vérifier la réciproque, on suspend sur deux coupes, le circuit circulaire (fig. 1482) mobile autour d'un axe qui passe par son centre, et l'on fixe au-dessous ou au-dessus, un circuit fermé tel que *A* (fig. 1475), qui soit coupé en deux points par l'axe du circuit (fig. 1482) dont les parties rectilignes se neutralisent.

## II. Des lois mathématiques des phénomènes électrodynamiques.

**2162.** Les actions de deux parties finies de courant sont les résultantes de toutes les actions mutuelles des éléments infiniment petits qui les composent. Après avoir étudié, dans les divers cas, les phénomènes produits par les courants finis, Ampère a cherché les lois des actions de deux éléments infiniment petits, quand varient leur distance et l'angle qu'ils font entre eux. Une fois ces lois établies, il s'en est servi pour calculer, par les méthodes de l'analyse mathématique, les effets résultants des courants finis, pour les comparer à ceux

que donne l'expérience, et même en prédire de nouveaux. Comme on ne peut expérimenter sur des courants infiniment petits, il a fallu déduire les lois relatives aux actions entre deux éléments, des effets observés sur des courants finis placés dans des conditions déterminées. On peut procéder en cherchant, par des essais successifs, quelles lois devraient présider aux actions entre deux éléments, pour que le calcul donne le même effet résultant que l'expérience, tant pour la direction que pour l'intensité de cet effet. Mais cette méthode, longue et pénible, exige que l'on mesure les intensités, ce qui présente une foule de difficultés pratiques. Ampère a suivi une autre marche, en partant de certains cas d'équilibre donnés par l'observation <sup>1</sup>.

**2163. Direction de la résultante des actions mutuelles de deux éléments de courant.** — Les courants infiniment petits, comme les courants finis, agissent les uns sur les autres par attraction ou répulsion. Montrons d'abord que ces actions sont dirigées suivant la droite qui joint les milieux de deux éléments.

Considérons deux courants infiniment petits non dans le même plan,  $mn, m'n'$  (fig. 1483), et soit  $oo'$  la ligne qui joint leurs milieux. L'élément  $on$  peut être remplacé par deux autres  $oa, ob$ , capables du même effet (2155). L'élément  $o'n'$  peut être

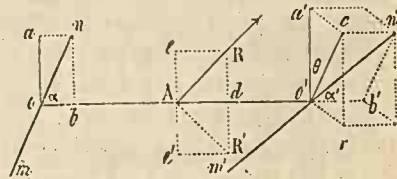


Fig. 1483.

remplacé d'abord par  $o'b'$  et par  $o'e$  perpendiculaire à  $oo'$  dans le plan  $n'o'b'$ . On peut ensuite remplacer  $o'e$  par  $o'a'$  parallèle à  $oa$ , et  $o'r$  perpendiculaire à  $o'a'$ . De sorte que l'élément  $o'n'$  est remplacé par les trois éléments  $o'a', o'b', o'r'$ , qui sont les arêtes d'un parallépipède rectangle dont  $o'n'$  est la diagonale. Au lieu des éléments  $mn, m'n'$ , nous en avons donc cinq autres, deux en  $o$  et trois en  $o'$ , dont il faut examiner les actions mutuelles.

Les actions de  $2ob$  sur  $2o'a'$  et sur  $2o'r$ , et de  $2oa$  sur  $2o'r$  et sur  $2o'b'$ , sont nulles; car l'un de ces éléments est perpendiculaire par son milieu au plan dans lequel se trouve l'autre (2154). Il n'y a donc d'action qu'entre  $oa, o'a'$  qui sont parallèles, et  $ob, o'b'$  qui sont dirigés suivant la même droite. — Les actions de deux éléments de courants pouvant ainsi être remplacées par celles de deux éléments parallèles et de deux autres placés sur la même ligne droite, il suffira de prouver que ces actions sont dirigées suivant la droite qui joint les milieux, pour le cas d'éléments parallèles et d'éléments placés sur la même droite. Dans le premier cas, supposons que la force résultant de l'action des courants parallèles, tels que  $oa, o'a'$ , ait une direction  $AR$  différente de  $oo'$ , et décomposons cette force en deux autres: l'une,  $Ae$ , perpendiculaire à  $oo'$ , l'autre,  $Ad$ , suivant  $oo'$ . La première sera nécessairement nulle; car, si nous

<sup>1</sup> *Mém. de l'Ac. des sc. de Paris*, VI, 175; et *Ann. de ch. et de ph.*, 2<sup>e</sup> sér., XX et XXIX.

faisons tourner tout le système, de  $180^\circ$  autour de  $oo'$ , AR venant en  $AR'$ , et Ae en  $Ae'$ , l'effet des deux courants  $oa$ ,  $o'a'$  serait modifié, ce qui ne peut être, puisqu'ils ont changé de sens en même temps. Il faut donc que la composante Ae soit nulle, et par conséquent que AR se confonde avec  $oo'$ . Dans le cas des courants tels que  $ob$ ,  $o'b'$ , si la force résultant de leur action était dirigée suivant AR, en faisant tourner le système autour de  $oo'$ , AR décrirait un cône dont toutes les arêtes représenteraient également la direction de l'action des deux courants; cette action aurait donc une infinité de directions, et l'on ne peut échapper à cette conséquence qu'en supposant que AR se confond avec  $oo'$ .

**2164. Intensité d'action de deux courants élémentaires.** — Soient  $ds$ ,  $ds'$  les longueurs des demi-éléments  $on$ ,  $o'n'$  (fig. 1483);  $i$ ,  $i'$  les intensités des courants dont ils font partie;  $\alpha$ ,  $\alpha'$  les angles que font les moitiés des éléments vers lesquelles marchent les courants, avec la partie de  $oo'$  qui est à droite des sommets  $o$ ,  $o'$  de ces angles. Soit enfin  $\theta$  l'angle  $a'o'c$  des deux plans passant par  $oo'$  et contenant ces éléments. Les seules composantes dont les actions mutuelles ne soient pas nulles sont (2163)  $ob$ ,  $o'b'$  et  $oa$ ,  $o'a'$ .

Les premières ont pour valeur  $\overline{ob} = i \cdot ds \cos \alpha$ ;  $\overline{o'b'} = i' \cdot ds' \cos \alpha'$ ; et les deux autres,  $\overline{oa} = i \cdot ds \sin \alpha$ ;  $\overline{o'a'} = i' \cdot ds' \sin \alpha' \cos \theta$ . Les deux dernières étant parallèles entre elles, leur action mutuelle ne dépendra que de leur distance, de leurs longueurs et de leurs intensités; et, comme nous voyons toujours les forces de la nature varier en raison inverse d'une puissance de la distance, et que l'action est ici évidemment proportionnelle au produit des intensités<sup>1</sup> et au produit des longueurs des éléments, cette action sera représentée par  $\frac{i' ds ds'}{r^n} \sin \alpha \sin \alpha' \cos \theta$ ;  $r$  étant la distance  $oo'$ . De même, l'action des éléments  $ob$ ,  $o'b'$  sera proportionnelle à  $\frac{i i' ds ds'}{r^n} \cos \alpha \cos \alpha'$ . L'action totale serait donc la somme de ces quantités, si les courants  $oa$  et  $o'a'$ ,  $ob$  et  $o'b'$  étaient dans les mêmes conditions; mais les deux premiers seulement sont parallèles. Si donc  $k$  représente le rapport entre les intensités de leurs actions, l'intensité I des actions réunies de  $mn$  et  $m'n'$  sera

$$I = \frac{i' ds ds'}{r^n} (\sin \alpha \sin \alpha' \cos \theta + k \cos \alpha \cos \alpha'), \quad [1]$$

expression dans laquelle il reste à déterminer les constantes  $n$  et  $k$ .

**Détermination des constantes.** — Pour déterminer les constantes  $n$  et  $k$ , Ampère s'est appuyé sur les deux cas d'équilibre suivants : 1° Un courant circulaire n'a pas d'action sur un courant mobile autour d'un axe perpendiculaire à son plan et passant par son centre, quand les extrémités du courant mobile aboutissent à cet axe (2161).

2° Deux courants circulaires de même intensité, de même sens et situés dans

<sup>1</sup> Nous verrons plus loin comment ce point a été vérifié par l'expérience (2166).

le même plan, n'ont pas d'action sur un troisième courant circulaire aussi de même sens et placé dans le même plan, entre les deux premiers, quand les trois centres sont en ligne droite et à des distances respectivement proportionnelles aux rayons des cercles.

Le premier cas d'équilibre a déjà été indiqué (2161). Ampère a prouvé le second au moyen de l'appareil (fig. 1484).  $o, o''$  sont deux conducteurs circulaires fixes, et  $o'$  un courant circulaire placé dans le même plan que les deux autres, mobile autour de l'axe  $cc'$  qui ne passe pas par son centre, et équilibré par le contrepoids  $p$ . Les flèches indiquent la marche que suit un même courant dans les trois cercles. On trouve qu'il y a équilibre quand les distances des centres  $o, o', o''$  sont telles que l'on ait

$$o'o : o'o'' = \frac{r}{r'} : \frac{r'}{r''};$$

$r, r', r''$  étant les rayons des cercles.

Ampère, se servant d'abord du premier cas d'équilibre, a calculé, en partant de la formule [1], la somme algébrique de toutes les actions des différents éléments du courant circulaire sur les éléments du courant terminé à l'axe du cercle, et a écrit que cette somme est nulle; ce qui lui a donné pour première équation de condition,  $n + 2k - 1 = 0$ . Un calcul semblable appliqué au second cas d'équilibre, l'a conduit à une seconde équation de condition, qui lui a donné  $n = 2$ . Portant cette valeur dans  $n + 2k - 1 = 0$ , on en conclut  $k = -\frac{1}{2}$ , et la formule qui exprime les actions mutuelles de deux éléments de courant, devient

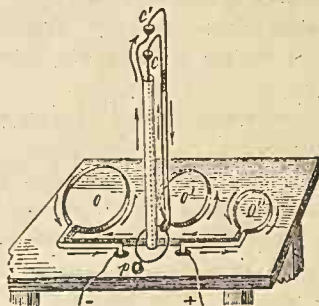


Fig. 1484.

$I = \frac{ii' ds ds'}{r^2} (\sin \alpha \sin \alpha' \cos \theta - \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \alpha')$ . Un calcul semblable appliqué au second cas d'équilibre, l'a conduit à une seconde équation de condition, qui lui a donné  $n = 2$ . Portant cette valeur dans  $n + 2k - 1 = 0$ , on en conclut  $k = -\frac{1}{2}$ , et la formule qui exprime les actions mutuelles de deux éléments de courant, devient

$$I = \frac{ii' ds ds'}{r^2} (\sin \alpha \sin \alpha' \cos \theta - \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \alpha'). \quad [2]$$

Les actions de deux éléments de courants sont donc en raison inverse des carrés des distances. Quand  $I$  est positif il y a attraction, et s'il est négatif, répulsion.

Si les deux courants sont dirigés dans le même sens suivant la même ligne droite, il faut faire  $\alpha = \alpha' = 0$ , et il vient  $I = -\frac{ii' ds ds'}{2r^2}$ . Valeur négative qui montre que les parties consécutives d'un même courant se repoussent (2153).

**2165. Remarques. — Résultats du calcul.** — Ce n'est pas du premier coup qu'Ampère a déterminé les constantes comme nous venons de l'expliquer. Dans le principe, il admettait comme évidente la loi des carrés des distances, l'action d'un élément de courant sur un élément magnétique suivant précisément cette loi (2121). Plus tard, avec Savary, il trouva une seconde relation,

en s'appuyant sur ce fait qu'un circuit formant un grand nombre de spires égales sur tout le contour d'un anneau de bois, n'a aucune action sur un courant mobile quelconque. Savary, ayant calculé la somme des actions des éléments d'un pareil système, au moyen de la formule [2], trouva que, pour que cette somme soit nulle généralement, il faut que l'on ait  $kn + 1 = 0$ .

Ampère admet *à priori* que l'action de deux éléments de courant varie en raison inverse d'une certaine puissance,  $n$ , de la distance, et qu'il y a un rapport constant  $k$  entre les intensités d'action de deux éléments parallèles, et celles de deux éléments en ligne droite. L'accord entre les résultats donnés par la formule et ceux de l'expérience, prouve *à posteriori* que ces deux suppositions sont légitimes. Du reste, Masson a, depuis, retrouvé l'expression [2] sans rien supposer sur sa forme, en partant de l'expression générale

$$I = ii' ds ds' \left\{ f(r) \cos \alpha \cos \alpha' + F(r) \sin \alpha \sin \alpha' \cos \theta \right\}, \quad [3]$$

dans laquelle il a déterminé la forme des fonctions  $f$  et  $F$  au moyen du premier cas d'équilibre, et de ce résultat de l'expérience que l'action d'un courant indéfini sur un courant fini parallèle est proportionnel à la longueur de ce dernier et en raison inverse de leur distance mutuelle<sup>1</sup>. Blanchet a aussi retrouvé la formule [2] en partant de l'expression générale [3] par une méthode qui a été publiée par Verdet<sup>2</sup>.



Fig. 1485.

Une fois trouvée, l'expression de l'action de deux éléments de courants, Ampère, Savary, de Montferrant<sup>3</sup>, Masson,..... ont déterminé par le calcul la nature, la direction et l'intensité d'action de deux courants placés dans des conditions données. La question est alors purement mathématique et ne présente d'autres difficultés que celles qui proviennent, dans certains cas, de l'insuffisance des méthodes analytiques. Les résultats obtenus ont toujours été d'accord avec ceux de l'expérience, quand celle-ci a pu être faite. Voici quelques lois importantes obtenues par cette méthode :

1° L'action d'un courant rectiligne indéfini dans les deux sens, sur un petit courant rectiligne placé d'une manière quelconque dans l'espace, est perpendiculaire à ce dernier. — 2° L'action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant rectiligne parallèle, *varie en raison inverse de la simple distance*, comme pour l'action d'un courant indéfini sur un élément magnétique (2120). Il résulte de là qu'un courant indéfini  $mn$  (fig. 1485) n'a pas d'action sur deux courants finis  $oao$ ,  $cbc$  de même intensité, qui lui sont parallèles et sont fixées à un même axe  $oo$ , quand le conducteur  $mn$  se trouve à des distances des parties parallèles à l'axe, réciproquement proportionnelles aux longueurs de ces

<sup>1</sup> *Théorie des phénomènes électrodynamiques et du magnétisme* (1838), p. 9.

<sup>2</sup> *Annales scientifiques de l'École normale sup.*, t. II (1865) p. 145.

<sup>3</sup> *Manuel d'électricité dynamique* (1823).

parties. C'est, en effet, ce que l'expérience montre. Les actions du courant indéfini sur les parties horizontales s'entre-détruisent, parce que ces parties sont de sens contraire et deux à deux de même longueur. On s'est aussi servi de ce cas d'équilibre pour déterminer les constantes. — 3<sup>o</sup> L'action  $f$  entre deux courants parallèles de longueur égale est  $f = \frac{i'i'p^2}{rd}$ ;  $d$  étant la diagonale du rectangle formé en réunissant leurs extrémités deux à deux,  $l$  leur longueur et  $r$  leur distance. — 4<sup>o</sup> Un courant fermé ne peut imprimer un mouvement de rotation continu à un autre courant fermé mobile autour d'un axe.

**2166. Expériences sur les intensités.** — Les expériences de vérification faites par Ampère et par les physiciens qui l'ont suivi, n'ont porté que sur le sens des actions. Les résultats relatifs aux intensités n'avaient pas été vérifiés, à cause des difficultés que présente leur mesure. Weber, en 1848, a comblé cette lacune, au moyen d'un instrument très délicat, nommé *dynamomètre électrodynamique*, ou *électrodynamomètre*, et qui ressemble beaucoup au magnétomètre électrique (2058). Le multiplicateur est circulaire, et composé de 300<sup>m</sup> de fil formant 900 tours. L'aimant mobile est remplacé par un autre multiplicateur circulaire, formé de 200<sup>m</sup> de fil formant 1200 tours, et suspendu dans l'intérieur du premier par deux fils d'argent parallèles très rapprochés, de 50<sup>cm</sup> de longueur. C'est par ces fils que le courant est introduit dans ce multiplicateur mobile, dont le centre coïncide avec celui du multiplicateur fixe, et qui tend toujours à se placer dans le même plan que ce dernier, les courants marchant dans le même sens. Si le multiplicateur mobile est dérangé de cette position, il tend à y revenir avec une force qui est mesurée par le *sinus* de l'angle de torsion du système bifilaire (1566). Parmi les résultats observés par Weber, nous citerons le suivant : l'action réciproque des deux multiplicateurs circulaires est proportionnelle au carré de l'intensité d'un même courant passant de l'un à l'autre, comme l'avait supposé Ampère (2164).

A. Cazin a mesuré plus simplement, au moyen de la balance ordinaire, les actions électrodynamiques<sup>1</sup>. Le fléau de sa balance est composé de deux parties parallèles isolées l'une de l'autre et communiquant avec les pôles d'une pile. A l'une des extrémités, est suspendu un cadre horizontal autour duquel est enroulé un fil rhéophore dans lequel l'électricité arrive par des fils de platine fixés aux fléaux et descendant verticalement jusqu'au centre du cadre, d'où ils vont joindre les extrémités du fil enroulé. Un second cadre, est placé parallèlement au-dessous du premier, à des distances mesurées sur une échelle. Ce cadre est de mêmes dimensions que le premier, mais son fil rhéophore, qui est parcouru par le même courant, fait un plus grand nombre de tours; les poids nécessaires pour maintenir l'équilibre, mesurent en grammes la force électrodynamique. Cette force varie proportionnellement au carré de l'intensité du courant donnée par une boussole des sinus. A Cazin a aussi vérifié la formule d'Ampère, en

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. I, p. 257.

calculant les effets exercés les uns sur les autres par les 4 côtés des deux cadres, et comparant l'effet résultant au résultat de l'expérience.

On a cherché à rattacher les actions électrodynamiques aux attractions et répulsions électriques. P. Prévost, en 1822, a fait les premières tentatives à ce sujet en considérant le courant comme formé de deux flux opposés d'électricités contraires<sup>1</sup>. Weber a développé les idées de Prévost et est parvenu à retrouver la formule d'Ampère, par des calculs trop élevés pour être exposés ici.

### III. Actions des aimants et de la terre sur les courants. — Théorie électrodynamique du magnétisme terrestre.

**2167. Actions des aimants sur les courants.** — Les courants agissant sur les aimants, réciproquement les aimants doivent agir sur les courants, en vertu du principe de la réaction égale et opposée à l'action. C'est en effet ce qui a lieu. Si l'on place un aimant *M* (fig. 1486) horizontalement au-dessus du côté *mn* du circuit mobile *mnp* ou dans l'intérieur de ce circuit, on voit ce dernier se placer de manière que son plan soit perpendiculaire à l'aimant, dont le pôle austral se trouve à la gauche de chaque partie du courant.

De même qu'un courant fermé déplace une aiguille aimantée dans le sens de sa longueur, de même un aimant introduit perpendiculairement dans l'intérieur d'un anneau rhéophore flottant, l'entraîne parallèlement à lui-même dans les positions d'équilibre que nous avons indiquées (2123). Si le pôle nord est à la droite du courant, l'équilibre est instable quand l'anneau se trouve au milieu de l'aimant; on le voit alors s'approcher d'un des pôles, le dépasser, puis tourner sur lui-même de 180°, de manière que le pôle nord de l'aimant soit à la gauche du courant; l'anneau est ensuite attiré, revient

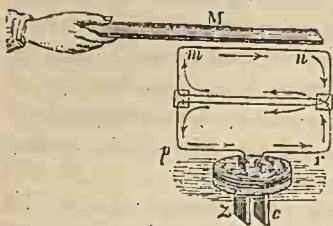


Fig. 1486.

vivement au milieu du barreau, où il finit par s'arrêter après quelques oscillations.

Nous avons vu que les courants tendent à disposer les parcelles de fer doux transversalement à leur direction; réciproquement, on peut déplacer un courant au moyen du fer, comme l'a fait M. Le Roux<sup>2</sup>. — 1° Un fil de platine très-fin *f* (fig. 1487) est suspendu entre deux tiges *ac*, *ac*, articulées en *c*, *c* et communiquant avec les pôles d'une pile de 15 couples à charbon. Le fil est engagé en *a*, *a* dans de petits trous des lames de platine *ca*, *ca*, de manière à pouvoir tourner sans se tordre. Ce fil rougit, et, si on lui présente le pôle d'un aimant,

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève, t. XXI (1822), p. 178.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. LIX, p. 409.



on le voit prendre des courbures qui dépendent de la position de l'aimant et du sens du courant. Si l'on approche une masse de fer doux, le fil se porte à sa surface et y reste appliqué. — 2° A un cylindre de fer doux, A (fig. 1487), posé sur le pôle d'un électro-aimant, est attaché un fil d'argent, dont on tient à la main l'autre extrémité, et qui est parcouru par un courant. Quand l'électro-aimant est en activité, le fil, qui tend à se placer transversalement au cylindre A, s'enroule tout autour, en formant une hélice ayant le sens qu'elle devrait avoir pour donner au fer l'aimantation qu'il possède. Le fil peut être enroulé d'avance sur une bobine B communiquant avec un des pôles de la pile.

Nous avons vu que l'arc voltaïque change de forme sous l'action d'un aimant (1954); c'est qu'il est formé d'une multitude de courants d'une flexibilité parfaite, se comportant comme le fil *f*. M. Plucker a considéré, à ce point de vue, les actions des aimants sur l'arc voltaïque; nous en reparlerons en étudiant l'arc formé par les courants d'induction.

**2168. Action de la terre sur un courant fermé.** — La terre ayant, comme nous l'avons vu, toutes les propriétés d'un aimant, il était naturel de penser qu'elle devait avoir une action sur les courants mobiles. C'est, en effet, ce qu'Ampère a découvert dès 1820<sup>1</sup>.

Un circuit fermé mobile autour d'un axe vertical, se tourne spontanément dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique, de manière que le courant marche de l'est à l'ouest dans sa partie inférieure. Ce résultat se prouve facilement au moyen du flotteur de G. de La Rive (fig. 1488), dont le fil fait plusieurs tours, afin d'augmenter l'effet, ou du système (fig. 1489) qui tourne librement autour d'un axe vertical. On voit toujours le circuit se placer perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que le courant marche de l'est à l'ouest dans sa partie inférieure. Une légère aiguille de bois perpendiculaire au plan du circuit, *sn* (fig. 1488), prendra alors la direction de l'aiguille de déclinaison.

Ampère a aussi reproduit le phénomène de l'inclinaison de l'aiguille aimantée. Un circuit plan de forme quelconque (fig. 1490) est mobile autour de l'axe *oo'* qui passe par son centre de gravité, et que l'on dirige perpendiculairement au méridien magnétique. Le courant entrant par la partie *o'* de l'axe, parcourt le circuit mobile, et retourne à la pile par *e'co* et la colonne de gauche. Le circuit mobile s'incline alors, et la flèche BA, perpendiculaire à son plan, prend la direction de l'aiguille d'inclinaison.

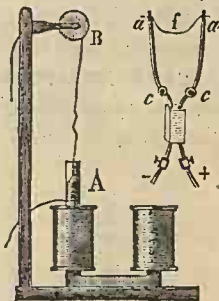


Fig. 1487.

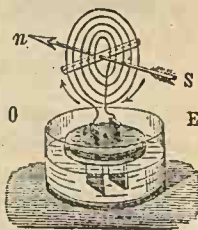


Fig. 1488.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XV, p. 188.

**2169. Courants astatiques.** — L'action de la terre intervient dans la plupart des expériences d'électrodynamique. Pour n'être pas induit en erreur par l'intervention de cette cause, on a soin de répéter une seconde fois chaque expérience, en renversant le courant fixe, de manière à changer le sens de l'action. On emploie aussi des systèmes astatiques, tels que AB (fig. 1491), l'action de la terre sur A étant contrebalancée par son action contraire sur B, où le courant circule en sens inverse. — On formerait un autre système astatique en suspendant les deux cercles A et B dans une position horizontale, par le milieu de la partie qui les réunit. Les circuits mobiles (fig. 1465 et fig. 1486) constituent aussi des systèmes astatiques.

**2170. COURANTS TERRESTRES.** — Ampère ayant rapproché l'action que produit un courant rectiligne indéfini sur un circuit fermé (2158), de l'orientation produite sur le même circuit par la terre, supposa qu'il existe dans le globe, un



Fig. 1489.

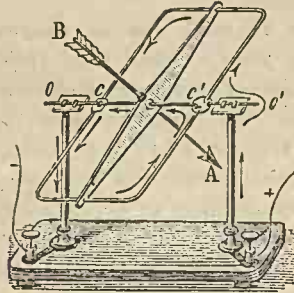


Fig. 1490.



Fig. 1491.

système de courants électriques marchant de l'Est à l'Ouest, et il expliqua par cette nouvelle hypothèse tous les phénomènes du *magnétisme terrestre*. En effet, de semblables courants auraient pour effet de placer le circuit fermé parallèlement à leur direction commune, et de manière que le courant marchât de l'Est à l'Ouest dans la partie inférieure du circuit (2158). Nous avons vu que l'effet ne provient que des parties verticales, les actions qui s'exercent sur les parties horizontales s'entre-détruisant.

Il est facile de concevoir un seul courant qui produirait les mêmes effets que le système que nous venons de supposer. Ce courant résultant doit être parallèle au plan d'un courant fermé mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique (fig. 1490), c'est-à-dire qu'il doit être perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison.

L'hypothèse du courant terrestre rend facilement compte de la direction de l'aiguille aimantée, car un semblable courant doit la tourner de manière que

le pôle austral soit à sa gauche ; ce qui a lieu, en effet, le nord étant à la gauche d'un courant marchant de l'Est à l'Ouest. Il n'est donc plus nécessaire de considérer la terre comme un aimant ; mais pour que la nouvelle hypothèse mérite d'être admise, il faut que le courant terrestre produise tous les effets d'un courant placé dans les mêmes conditions ; c'est ce que nous allons examiner.

**2171. Action de la terre sur un courant vertical.** — Si la terre agit comme un courant indéfini marchant de l'Est à l'Ouest, un courant vertical

mobile autour d'un axe vertical doit se porter à l'Est s'il est descendant, et à l'Ouest s'il est ascendant (2156). Pour vérifier cette conséquence, on se sert de l'appareil (fig. 1492). Le courant introduit en *n*, passe dans l'axe d'un tube de verre qui sert de support au vase *vv*, se rend dans l'eau acidulée que contient ce vase

et de là, par le fil *acb*, dans l'eau acidulée du vase *VV*, qui communique, avec l'autre pôle, *n'*, de la pile. Le courant descendant *b* se porte à l'Est ; si l'on renverse ce courant, il se porte à l'Ouest. A l'équateur magnétique, l'action est maximum ; au pôle magnétique, ou près de ce pôle, l'équipage mobile serait soumis à l'action d'un courant circulaire sensiblement perpendiculaire à son axe, et tournerait d'une manière continue de l'Ouest à l'Est par le Sud, s'il était descendant. — S'il y a deux courants de même sens, *cb*, *db'*, le système est astatique, si les deux fils sont identiques et symétriquement placés. — On rend le passage du courant égal entre les fils *bb'*, en réunissant leur extrémité inférieure par un cercle en cuivre mince.

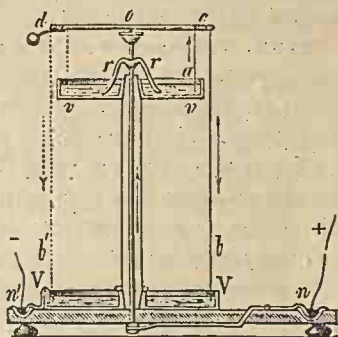


Fig. 1492.

l'équipage mobile serait soumis à l'action d'un courant circulaire sensiblement perpendiculaire à son axe, et tournerait d'une manière continue de l'Ouest à l'Est par le Sud, s'il était descendant. — S'il y a deux courants de même sens, *cb*, *db'*, le système est astatique, si les deux fils sont identiques et symétriquement placés. — On rend le passage du courant égal entre les fils *bb'*, en réunissant leur extrémité inférieure par un cercle en cuivre mince.

**2172. Rotation d'un courant horizontal par la terre.** — Pour produire ce phénomène, découvert

par Ampère et expliqué par de La Rive et par Pouillet, on se sert de l'appareil (fig. 1493) (2151) ; seulement on supprime le courant indéfini, que remplace le courant terrestre. Dans l'hémisphère nord, le système mobile tourne d'un mouvement uniforme, de l'Est à l'Ouest par le Sud, si le courant mobile va vers le centre ; et de l'Ouest à l'Est, s'il va vers la circonférence.

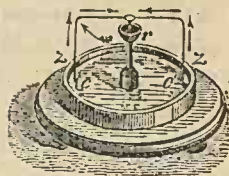


Fig. 1493

La figure 1493 représente un appareil, dû à Faraday, qui fonctionne sans pile spéciale. En *zz* est un vase de *zinc* rempli d'eau acidulée. Au centre s'élève sur le zinc, une colonne de *cuivre* *r* surmontée d'une coupe à mercure dans laquelle pivote le conducteur mobile *erc*, dont les parties verticales sont réunies dans l'eau acidulée par un léger cercle de *cuivre*. Le zinc est attaqué par l'acide ; le courant s'établit comme l'indiquent les flèches, et la rotation se fait de l'Est à

l'Ouest par le Sud. — Au lieu d'un vase de zinc, on peut employer simplement un anneau de zinc supportant la colonne centrale par l'intermédiaire d'une traverse diamétrale, et qu'on plonge dans de l'eau acidulée.

Près du pôle magnétique de la terre, la vitesse de rotation doit être maximum; là, le courant terrestre agit comme un courant circulaire sur un courant parallèle à son plan (2160); à l'équateur magnétique, il y aurait équilibre dans toutes les positions, si les deux parties du courant mobile étaient égales. Il serait intéressant de vérifier ces conséquences, ainsi que la rotation d'un courant vertical dans le voisinage du pôle magnétique.

**2173. Transport d'un courant par la terre.** — Enfin, si le globe est enveloppé par des courants marchant de l'est à l'ouest dans le voisinage de l'équateur magnétique, un courant parallèle à l'équateur et pouvant se déplacer parallèlement à lui-même, doit se porter vers le pôle quand il marche de l'Ouest à l'Est, et vers l'équateur quand il va de l'Est à l'Ouest. C'est ce qu'a vérifié Faraday au moyen d'un fil de cuivre suspendu horizontalement par deux longs fils de soie, et plongeant, par ses extrémités recourbées, dans des vases de mercure réunis aux pôles d'une pile. Si le conducteur mobile est dans le méridien, il se déplace encore parallèlement à lui-même, comme on pouvait le prévoir (2156), et dans un sens qui dépend de celui du courant. Dans les positions obliques au méridien, le courant se transporte encore, et l'on peut dire, en général, qu'il se transporte toujours parallèlement à lui-même et du côté de sa gauche.

Le mouvement du courant parallèle à l'équateur ne met en évidence que la composante horizontale de la force qui agit sur ce courant. Faraday n'avait pu montrer la composante verticale, à cause de la poussée du mercure et des effets capillaires sur les extrémités plongées. M. J. Mallet a comblé cette lacune en employant un fil plus long et une pile plus forte. Il a constaté une augmentation apparente de poids, quand le courant marche vers l'Ouest, et une diminution dans le cas contraire<sup>1</sup>.

**2174. Conclusion.** — On voit que l'hypothèse des courants terrestres explique avec facilité les diverses actions qu'exerce le globe sur les aimants et sur les courants, et simplifie de la manière la plus heureuse la théorie du magnétisme terrestre. L'hypothèse de Gilbert, qui considérait la terre comme un aimant (1503), ne peut expliquer la rotation des courants (2172). D'un autre côté, les variations et perturbations de l'aiguille aimantée, et l'état de fluctuation dans lequel se trouve perpétuellement le magnétisme du globe (1575) ne se conçoivent qu'avec beaucoup de peine dans l'hypothèse de Gilbert, tandis qu'on les conçoit facilement quand on les regarde comme produits par des courants, dont la mobilité est bien en rapport avec celle qu'on est porté à attribuer à la cause de tous ces changements.

Barlow, après avoir montré qu'on ne peut rendre compte des faits par

<sup>1</sup> *Phil. Magazine*, novembre 1877, et *Journal de physique*, t. VII, p. 402.

l'hypothèse d'un ou de plusieurs aimants dans l'intérieur du globe, a construit, pour appuyer l'hypothèse d'Ampère, une sphère en bois, sur laquelle il a enroulé un fil parallèlement à un même plan et couvrant presque toute la sphère. Une petite aiguille aimantée, rendue indifférente à l'action terrestre et placée successivement dans différentes positions près de la surface du globe de bois, éprouvait des déviations représentant celles que produit la terre, quand un courant circulait dans le fil de cuivre.

**2175. De l'origine des courants terrestres.** — Il n'est pas facile de connaître l'origine des courants terrestres; mais il faut remarquer que la même difficulté existe dans le système de Gilbert, puisque l'on doit rechercher la cause de la séparation des fluides magnétiques.

Ampère attribuait les courants terrestres à des actions chimiques exercées par l'eau et divers autres agents sur la partie intérieure non oxydée de la croûte du globe. Seebeck invoquait les actions énergiques qui se produisent dans les grandes séries volcaniques signalées par L. de Buch. Masson attribuait ces courants à l'action thermique du noyau en fusion sur les couches solides les plus profondes. Les matières qui les composent, de différentes natures et inégalement échauffées, produiraient des courants thermo-électriques circulant sous la croûte du globe, et donnant un courant résultant de l'Est à l'Ouest. Barlow admet que ces courants forment une large nappe irrégulière; d'où les inflexions des lignes *isogoniques*. Dans ces diverses hypothèses, les *variations séculaires* seraient dues aux changements lents qui s'accomplissent dans l'écorce du globe. M. Pariset<sup>1</sup> a essayé d'expliquer ces variations en supposant un déplacement du ménisque intérieur liquide correspondant au renflement équatorial, qui obéirait moins lentement que la masse entière de la terre aux actions solaires et lunaires qui produisent la précession des équinoxes. La pression variable de ce ménisque sur la surface très-inégale de l'intérieur de la croûte solide produirait les courants terrestres avec leurs variations séculaires<sup>2</sup>. M. Pariset a construit un globe de bois enveloppé d'un fil rhéophore, au moyen duquel on reproduit ces variations lentes en déplaçant ce globe par rapport à une aiguille aimantée portée par un cercle fixe.

On a supposé encore que les courants du globe sont des courants thermo-électriques produits par la chaleur du soleil. Les régions de la zone équatoriale séparées par le méridien occupé par le soleil étant inégalement échauffées, celles qui sont à l'ouest l'étant moins que celles de l'est, qui viennent de ressentir l'influence solaire, il en résulterait des courants à peu près parallèles à l'équateur, parce que c'est dans cette direction que les différences de température de part et d'autre du méridien sont le plus prononcées; et de forme irrégulière,

<sup>1</sup> *Recherches sur le magnétisme terrestre*. Paris, 1862.

<sup>2</sup> Buffon semble avoir eu le pressentiment de cette cause lorsqu'il écrit : « Le magnétisme est un effet constant de l'électricité constante produite par la chaleur intérieure et par la rotation du globe. » (*Époques de la nature*, 1778, p. 82.)

à cause de la distribution inégale des continents et des mers, et de la conductibilité variable du sol.

Les hypothèses qui précèdent ne rendent pas compte des variations diurnes, mensuelles et annuelles de l'aiguille aimantée, variations évidemment liées à la marche du soleil. Aimé a cherché à les expliquer aussi par des courants thermo-électriques<sup>1</sup>. Il commence par rappeler que les variations diurnes se font symétriquement dans les deux hémisphères (1572), et que leur amplitude diminue à mesure qu'on se rapproche de l'équateur. Il remarque ensuite que la plus forte chaleur en un point donné se manifeste vers deux heures du soir, quand le soleil est à 30° de son méridien; en ce moment, les courants rayonnant autour de ce point, ont leur intensité maximum. Ils peuvent être remplacés par un seul courant résultant dirigé à peu près suivant le méridien, et ayant pour effet d'en écarter ou d'en rapprocher l'aiguille aimantée. Quand le point échauffé, qui suit le mouvement du soleil, s'éloigne de l'aiguille, le courant résultant agit moins fortement; c'est donc bien vers deux heures qu'aura lieu le maximum de déviation. La position variable du soleil par rapport à l'équateur sert à expliquer les changements de l'amplitude des variations diurnes avec les saisons, et les variations mensuelles et annuelles.

Nous pensons, avec de La Rive, que les courants terrestres doivent être divisés en deux groupes : 1° ceux qui déterminent la direction générale de l'aiguille; 2° ceux qui produisent les variations. Les premiers peuvent être dus, soit à l'action du noyau en fusion sur la croûte solide, produisant des courants électro-chimiques, comme le supposait Ampère, ou thermo-électriques, suivant Masson, soit à l'échauffement du sol par le soleil, soit aux actions chimiques qui se manifestent à la surface de la terre, soit enfin à toutes ces causes réunies. Les variations seraient dues à d'autres causes, particulièrement à ces courants électriques de l'atmosphère, qui circulent de l'équateur au pôle où ils se perdent dans le sol. L'intensité de ces courants atmosphériques dépend, pour chaque lieu, de la position du soleil par rapport à son méridien; ils sont le plus intenses au moment de la plus forte chaleur, c'est-à-dire vers deux heures; ils agissent d'une manière opposée sur le même méridien dans les deux hémisphères, produisant un effet plus grand dans l'hémisphère où se trouve le soleil. Les fluctuations continuelles de l'aiguille aimantée sont la conséquence du mode de production de ces courants et de la nature du milieu qui leur sert de véhicule. Quand les décharges qui ont lieu près des pôles sont assez intenses pour donner lieu à des aurores polaires (1793); quand de grandes masses d'air électrisées sont déplacées, dans les cyclones (1576), l'aiguille éprouve des déviations plus prononcées et plus irrégulières, qui constituent les perturbations. De La Rive, qui a proposé cette explication ingénieuse<sup>2</sup>, regardait la régularité des variations diurnes pendant les tempêtes, comme une objection à sa théorie; mais les

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 217.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences), t. XXIV, p. 375.

tempêtes sont circonscrites dans un espace relativement très-petit par rapport à celui que parcourent les grands courants atmosphériques dans les régions calmes et élevées de l'atmosphère.

**2176. Courants telluriques.** — Les courants atmosphériques sont accompagnés de courants dans le sol, qui paraissent en dépendre, et dont les effets se combinent avec les leurs. Ces courants ont été observés dans de longs fils isolés, le plus souvent dans des fils télégraphiques mis en communication avec le sol, et on les a regardés comme des dérivations de courants terrestres. Observés d'abord pendant les *auroras boréales*, ils l'ont été ensuite en dehors de tout phénomène accidentel. Barlow a fait de nombreuses observations sur quatre lignes partant de Derby, dirigées vers le Nord, le Nord-Est, le Sud et le Sud-Ouest. L'aiguille du rhéomètre intercalé dans le fil était toujours plus ou moins déviée, et d'une manière opposée, sur les lignes de la partie Nord et sur celles de la partie Sud. Si l'on supprimait la communication avec le sol, il n'y avait plus de déviation. Les résultats étaient les plus réguliers dans le fil dirigé au Nord-Est, et la marche de l'aiguille du rhéomètre était d'accord avec celle de l'aiguille de déclinaison.

Matteucci<sup>1</sup> a opéré sur deux fils de cuivre de 6 kilomètres, dont un était dirigé dans le méridien magnétique, et l'autre perpendiculairement. Ayant remarqué combien les actions chimiques sur les plaques qui font communiquer le fil avec le sol, compliquent les résultats, il établit la communication au moyen d'une lame de zinc amalgamé, plongeant dans une solution saturée de sulfate de zinc contenue dans un vase poreux baigné dans l'eau. Un rhéomètre de 1500 tours était intercalé dans le circuit. Dans le fil perpendiculaire au méridien magnétique, le sens du courant était très-variable, et, dans le fil dirigé dans le méridien, il marchait du Sud au Nord et présentait deux maximum et deux minimum en vingt-quatre heures. Le P. Secchi, sur une ligne de 50 kil., de Rome à Anzio, a vu, au contraire, le courant marcher habituellement du Nord au Sud. Matteucci a vu aussi, sur un fil de 600<sup>m</sup>, dont une des extrémités était de 150<sup>m</sup> plus élevée que l'autre, le courant aller constamment en montant.

M. L. Dufour<sup>2</sup>, entre Berne et Lausanne, a reconnu la nécessité d'expérimenter sur un fil indépendant d'autres fils soutenus par les mêmes poteaux pouvant lui transmettre une partie des courants qui les parcourent pendant le service télégraphique. M. Lamont a insisté sur les variations des courants qui nous occupent, et M. Airy a enregistré ces variations par les procédés graphiques. Matteucci, en comparant les courbes obtenues à Greenwich avec celles qu'il a relevées à Lausanne aux mêmes époques, leur a trouvé une grande ressemblance, ce qui montre que la cause du phénomène est générale.

Malgré toutes ces expériences, on ne peut encore rien formuler de certain sur la cause de ces courants dans les fils. Matteucci ne croit pas qu'on puisse

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 177.

<sup>2</sup> *Bulletin de la Société vaudoise d'histoire naturelle*, t. IX (1866).

les regarder comme une dérivation de courants terrestres, la terre ne présentant pas, comme nous le verrons, de résistance sensible. Ce qu'il y a de plus probable, c'est que les courants des fils sont dus à une induction produite par l'électricité atmosphérique, induction incontestable dans le cas des orages et des aurores boréales, et qui doit exister, quoique à un moindre degré, sous l'influence de l'électricité habituelle de l'atmosphère.

### § 3. — THÉORIE ÉLECTRODYNAMIQUE DU MAGNÉTISME

#### I. Aimants et solénoïdes.

**2177. Théorie magnétique d'Ampère.** — Dans cette même année 1820, où il découvrit les actions des courants les uns sur les autres et l'action de la terre sur les courants, Ampère posait les bases d'une nouvelle théorie, dans laquelle, rejetant les deux fluides magnétiques de Coulomb, il ramène tous les phénomènes des aimants à des effets de courants. Cette théorie lui vint à l'esprit pendant qu'il vérifiait les premiers phénomènes de l'électromagnétisme, et c'est en cherchant à la contrôler qu'il fit ses admirables recherches sur les actions mutuelles des courants.

Dans cette nouvelle théorie, que les découvertes subséquentes ont toujours confirmée, on suppose que : 1° les particules des aimants sont entourées de petits courants circulaires perpendiculaires à l'axe de l'aimant, et tous dirigés dans le même sens ; 2° ces courants particuliers, désignés sous le nom de *courants d'Ampère*, existent aussi dans les substances simplement magnétiques, mais leurs plans n'ont pas de direction constante, de manière que les actions qu'ils tendent à produire s'entre-détruisent. L'aimantation a pour effet de leur donner une direction commune. On conçoit, du reste, que

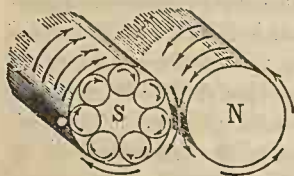


Fig. 1494.

tous les courants moléculaires placés dans une même section transversale d'un aimant, produiront le même effet qu'un courant unique de même sens et d'intensité convenable qui suivrait le contour de la section, comme en S (fig. 1494).

Cette nouvelle théorie des aimants, qui constitue l'une des plus belles créations scientifiques de notre siècle, rend compte avec la plus grande facilité, comme nous allons le voir, de tous les phénomènes du magnétisme et de l'électromagnétisme.

**2178. Explication des phénomènes.** — Chaque portion d'un aimant brisé présente les mêmes propriétés que l'ensemble ; c'est que tout est disposé de la même manière dans les fragments et dans l'aimant entier. — On voit aussi pourquoi deux aimants, joints bout à bout par les pôles contraires, n'en font



qu'un, et pourquoi un barreau de fer appuyé sur un pôle d'un aimant et sur son prolongement en devient la continuation (1497).

**Action de la terre.** — La terre ayant pour effet de diriger un courant fermé de manière que dans sa partie inférieure le courant marche de l'Est à l'Ouest (2170), il en sera ainsi de tous les courants particuliers de l'aimant, dont l'axe se placera alors dans le méridien magnétique; et l'on pourra marquer sur sa surface la direction du courant enveloppant qui peut remplacer les courants d'Ampère, courant qui marche de l'Est à l'Ouest dans la partie inférieure. Si l'on regarde le pôle *sud* de l'aimant, le courant y marchera dans le sens des aiguilles d'une montre; ce sera le contraire quand on regardera le pôle nord.

**Action des courants sur les aimants.** — Un courant rectiligne tourne un aimant transversalement à sa direction, le pôle Nord à sa gauche, les courants d'Ampère étant alors parallèles au courant rectiligne, et de même sens dans la partie la plus voisine (2158).

Si l'aimant, ayant son pôle Nord à gauche du courant, est mobile dans le sens de sa longueur, il se déplacera jusqu'à ce que sa ligne neutre soit en face du courant; les courants d'Ampère, attirés par leur partie la plus rapprochée du courant fixe, étant alors en même nombre de part et d'autre. Dans toute autre position il y aura mouvement, et il est facile de voir que l'équilibre sera stable; il serait instable, si le pôle Nord était à droite du courant, comme M. Boisgiraud l'a constaté par l'expérience (2123).

Un courant circulaire vertical étant indifférent à l'action d'un courant indéfini horizontal placé à la hauteur de son centre, il doit en être de même d'un solénoïde cylindrique ou d'un aimant prismatique, par rapport à un courant placé dans le plan que décrit leur axe magnétique. C'est ce que M. Dulaurier avait déduit de la déviation inverse que prend l'aimant quand le courant, d'abord au-dessus, passe ensuite au-dessous.

**Actions mutuelles des aimants.** — Si l'on met en présence deux pôles de signe contraire, les courants y vont dans le même sens, les aimants auxquels ils appartiennent sont disposés comme deux portions d'un même aimant coupé en deux à l'endroit des pôles qui se touchent; il y aura donc attraction. Si l'on retourne bout à bout l'un des aimants, les courants y seront de sens contraire à ceux de l'autre aimant, et les pôles en présence se repousseront. Si les aimants, au lieu d'être sur le prolongement l'un de l'autre, sont l'un à côté de l'autre (*fig.* 1494), on voit qu'ils s'attirent si les pôles contraires sont du même côté; car les parties les plus rapprochées sont alors de même sens; et se repoussent si les pôles en présence sont de même nom.

**Aimantation.** — Dans les substances magnétiques, les courants élémentaires ont des directions quelconques; pour les aimanter, il suffit d'orienter ces courants de la même manière. C'est ce que l'on pourra faire au moyen d'un courant, qui dirigera les courants élémentaires, de manière qu'ils soient de même sens dans les parties les plus rapprochées. Ces courants ainsi orientés,

réagissent ensuite sur les plus éloignés, et l'action s'étend ainsi de proche en proche jusqu'aux extrémités. On conçoit facilement pourquoi les hélices agissent plus efficacement qu'un simple courant.

Un aimant agit de la même manière que l'hélice, par les courants particuliers tous dirigés dans le même sens, qu'il contient. S'il y a de la force coërcitive, les courants élémentaires exigent, pour être dirigés, que cette force soit vaincue; mais alors la position qui leur est donnée persiste, ainsi que l'aimantation; tandis que, sans la force coërcitive, ces courants retomberaient dans leur confusion primitive.

Il résulte de là que l'aimantation doit avoir un maximum, quand tous les courants sont complètement orientés; et c'est ce que nous avons vu pour les électro-aimants (2132). Il semble résulter aussi des mouvements particuliers qui ont lieu pendant l'aimantation (2139), que les courants d'Ampère sont au moins en partie adhérents aux particules, et que ce sont celles-ci qui changent de position pendant l'orientation des premiers; et alors la force coërcitive ne serait autre chose que la résistance des molécules au déplacement, résistance d'autant plus grande que le corps est moins ductile (2140).

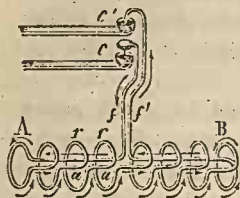


Fig. 1495.

Un courant fermé prend, par rapport à un courant indéfini parallèle à son plan, deux positions d'équilibre dont une est instable. Cela explique l'existence des points conséquents des aimants; l'équilibre instable étant maintenu par la résistance que les courants éprouvent, en vertu de la force coërcitive, à se retourner de 180°.

**2179. SOLÉNOÏDES.** — Ampère appelle *solénoïde* ou *cylindre électrodynamique* un système de courants circulaires infiniment petits, infiniment rapprochés, de même sens, et tous normaux à une même ligne, droite ou courbe. Il résulte de là qu'un aimant doit être considéré comme un faisceau de solénoïdes. Pour confirmer sa théorie du magnétisme, Ampère a construit, sous le nom de *cylindres électrodynamiques*, des systèmes de courants circulaires imitant la disposition des *solénoïdes*, et avec lesquels on peut reproduire tous les phénomènes des aimants. La



Fig. 1496.

figure 1495 représente un de ces *solénoïdes* artificiels: un fil de cuivre est courbé en cercles parallèles  $r, r'$ , communiquant les uns avec les autres par de petites portions rectilignes  $a, a, \dots$  perpendiculaires à leur plan, et dont les actions sont neutralisées par des parties rectilignes dirigées suivant l'axe du système, et qui se relèvent en  $f, f'$ , et servent à suspendre le système dans les coupes  $c, c'$ . Les flèches indiquent le sens du courant dans ses différentes parties, quand l'électricité positive arrive par la coupe  $c$ .

Un fil enroulé en hélice, et dont les extrémités reviennent suivant l'axe,

comme en AB (fig. 1496), produit les mêmes effets; car, d'après le principe de la décomposition des courants, chaque spire peut être remplacée par ses deux projections: l'une, circulaire, sur un plan perpendiculaire à l'axe; l'autre, rectiligne, sur une droite parallèle à cet axe, et cette dernière est neutralisée par les parties rectilignes qui reviennent suivant l'axe.

— Pour donner une grande énergie à un solénoïde, on le forme d'un fil fin revêtu de soie et faisant un grand nombre de tours superposés sur un tube de carton *ab* (fig. 1497).

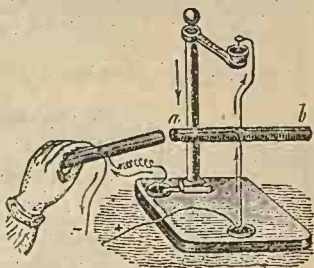


Fig. 1497.

Les propriétés des solénoïdes sont les mêmes que celles des aimants. 1° Un solénoïde se dirige dans le méridien magnétique, de manière que, dans la partie inférieure de chaque spire, le courant marche de l'Est à l'Ouest.

On doit donc y distinguer, comme dans les aimants, un pôle Nord et un pôle Sud. — 2° Si le solénoïde était mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique, son axe se dirigerait parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, d'après ce que nous avons vu (2168). — Pour en faire l'expérience, on peut appuyer les extrémités du fil du solénoïde,

dirigées suivant un diamètre passant par son centre de gravité, sur un équipage de quatre roues croisées deux à deux, comme on le voit dans l'aiguille libre (fig. 1498), qui est un perfectionnement de celle de la figure 1039 (p. 18).

— 3° Un solénoïde se tourne transversalement à un courant rectiligne, de manière que son pôle Nord soit à la gauche du courant. —

4° Deux solénoïdes se repoussent par les extrémités de même nom, et s'attirent par les extrémités de nom contraire. — 5° Un aimant et un solénoïde agissent l'un sur l'autre comme deux solénoïdes ou comme deux aimants entre eux. On voit (fig. 1497) un solénoïde mobile *ab*, avec lequel on fait ces diverses expériences. Quand on emploie deux solénoïdes, on peut y faire passer un même courant, comme dans la figure.

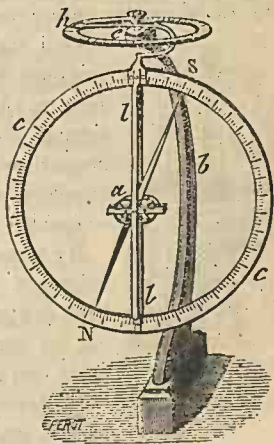


Fig. 1498.

**2180. Résultats du calcul.** — Ampère et Savary ont appliqué la formule d'Ampère (2164) aux courants infiniment petits des solénoïdes<sup>1</sup>. Ils ont reconnu que l'action d'un solénoïde d'un très-petit diamètre *aa'* (fig. 1499) sur un

<sup>1</sup> *Mém. de l'Ac. des sc.*, t. IV, 266; et *Ann. de ch. et de ph.*, 2<sup>e</sup> série, t. XXIX, 381.

élément de courant  $mn$ , se réduit à deux forces  $r, r'$  appliquées aux extrémités du solénoïde et perpendiculaires à un plan passant par l'extrémité considérée et par l'élément. Chacune de ces actions,  $f$ , varie en raison inverse du carré de la distance,  $r$ , et proportionnellement au sinus de l'angle  $\alpha$  que fait l'élément avec la droite  $oa$ , qui joint son milieu à l'extrémité  $a$ ; de sorte

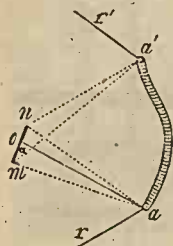


Fig. 1499.

qu'on a  $f = \frac{Mc \delta \sin \alpha}{r^2}$ , formule qui coïncide avec celle qui exprime l'action d'un aimant sur un élément de courant (2121), et dans laquelle  $M$  est une constante qui dépend du solénoïde.

Il résulte de là que la forme d'un solénoïde n'a pas d'influence sur les effets qu'il produit, et que tout dépend de la position de ses extrémités. Comme celles-ci agissent en sens opposé, il ne doit donc pas y avoir d'action quand elles se joignent, et forment un anneau fermé. C'est, en effet, ce que l'expérience vérifie. Un aimant de forme annulaire doit de même être sans action, et c'est ce que Gay-Lussac et Walter ont constaté, au moyen d'un anneau d'acier, aimanté en l'entourant d'une hélice rhéophore; cependant, cet anneau était bien aimanté, car on reconnut, après l'avoir brisé, que chaque fragment formait un aimant complet.

Le calcul montre encore que l'action exercée par l'extrémité d'un solénoïde indéfini sur un petit courant fermé est la même que celle qu'exerce le pôle d'un aimant sur un élément magnétique. Tous les résultats donnés par l'analyse, pour les actions des aimants les uns sur les autres et pour la distribution du magnétisme dans leur intérieur, restent donc les mêmes quand on considère les aimants comme des systèmes de solénoïdes.

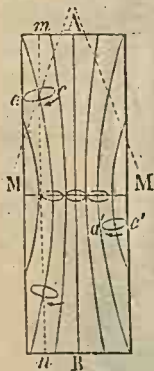


Fig. 1500.

Il y a cependant entre les aimants et les solénoïdes cette différence, que les pôles des aimants ne sont pas placés à leurs extrémités comme ceux des solénoïdes. Cela tient à ce que les aimants sont des faisceaux de solénoïdes, dont les petits courants fermés réagissent les uns sur les autres. — Considérons, par exemple, un courant circulaire  $ac$  (fig. 1500) placé à gauche de l'axe  $AB$ , et près de l'extrémité  $A$ ; les parties les plus rapprochées des courants tels que  $a'e'$ , qui sont à droite de  $mn$ , repousseront la partie  $e$  et attireront la partie  $a$ , et, comme il y a plus de courants au-dessous de  $ac$  qu'au-dessus, les actions résultantes sur  $a$  et sur  $e$  seront dirigées obliquement à  $AB$ . Les courants placés à la gauche de  $mn$  tendront à produire l'effet inverse; mais, comme ils sont moins nombreux, le courant  $ac$  s'inclinera comme il est figuré, et d'autant plus qu'il sera plus éloigné de la ligne moyenne  $MM$  et de l'axe  $AB$ . Les axes des solénoïdes formés par ces séries de petits courants formeront donc des lignes

convexes vers l'axe, dont les courbures seront d'autant plus prononcées qu'elles seront plus éloignées de cet axe et que l'aimant sera plus gros. Les pôles de ces solénoïdes étant à leurs extrémités, le point d'application de la force résultante, c'est-à-dire le pôle de l'aimant, sera à une certaine distance de son extrémité *Am*.

Il est facile de rapprocher les considérations qui précèdent de celles par lesquelles M. Jamin a expliqué la constitution des aimants et leur division en aimants *mégapolaires* et *brachypolaires* (1518).

Si l'on pouvait obtenir un aimant formé d'une file unique de molécules, ses pôles seraient exactement à ses extrémités. Nous avons vu, en effet, qu'ils s'en rapprochent d'autant plus que la section est plus petite (1514). En outre, Savary a trouvé, par le calcul, qu'il y a identité complète entre les actions d'un filet magnétique et d'un solénoïde de diamètre négligeable, et que le premier, comme le solénoïde, a ses pôles situés à ses extrémités.

## II. Rotation des courants par les aimants et des aimants par les courants.

**2181. Rotation des courants par les aimants.** — Si les aimants peuvent être considérés comme des systèmes de courants circulaires, ils doivent produire sur les courants mobiles les mouvements que produisent les courants circulaires. C'est, en effet, ce qu'a reconnu Faraday<sup>1</sup>.

Si l'on approche verticalement le pôle d'un aimant au-dessus du point de suspension du courant mobile (*fig. 1493*), ce courant tourne dans le sens prévu par la théorie, comme s'il était soumis à l'action d'un courant circulaire (2160).

La figure 1501 représente, à quelques détails près, la disposition adoptée par Ampère pour reproduire la rotation d'un courant vertical. On voit que c'est l'appareil de la figure 1470; seulement, le centre du vase est ouvert de manière qu'on peut y introduire verticalement un aimant *ns*. Si *n* est le pôle Nord, et si le courant monte dans les fils *a* et *b*, le système mobile tourne dans le sens de la flèche *f*, comme l'indique la théorie. On peut changer le sens du mouvement, soit en renversant le courant, soit en remplaçant le pôle Nord de l'aimant par le pôle Sud. Un électro-aimant, un solénoïde mis à la place de l'aimant produisent les mêmes effets. — Si le vase *vv* est en zinc, l'appareil fournit le courant comme dans la figure 1502.

M. Breton a produit la rotation des courants par les aimants, de la manière suivante : deux systèmes de fils mobiles *ff*, *f'f'* pivotent par des pointes plongeant dans du mercure sur les pôles d'un aimant en fer à cheval. Les extrémités

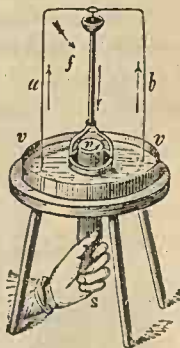


Fig. 1501.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 329.

des fils  $ff$ ,  $f'f'$  plongent dans des capsules pleines de mercure  $m m'$ , isolées des branches de l'aimant, et communiquant avec les pôles d'une pile. Le circuit étant fermé par l'aimant, on voit les fils  $ff$ ,  $f'f'$  tourner dans le même sens; car, si les courants y marchent en sens inverse, d'un autre côté les pôles de l'aimant sont de nom contraire. Si l'on renverse le courant, le sens du mouvement change en même temps dans les deux branches.

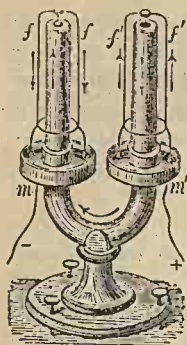


Fig. 1502.

M. Zollner, ayant terminé les fils verticaux par des chaînes flexibles trainant sur le mercure, les a toujours vus rester en arrière du mouvement; ce qui montre qu'elles sont tirées par les parties supérieures rigides, comme l'indique la théorie d'Ampère, loin de les entraîner, comme M. Helmholtz l'avait déduit de ses calculs.

On peut encore, comme l'a fait M. Cumming, employer un courant thermo-électrique:  $c$  (fig. 1503) est un fil de cuivre soudé en  $a$  et  $b$  à un fil de platine  $aorb$ . Le système s'appuie par une pointe  $o$ , sur l'extrémité d'un aimant vertical  $n$ , et l'on chauffe la soudure  $b$  au moyen d'une lampe à alcool. Le système tourne alors, par l'action de l'aimant sur la partie la plus rapprochée  $oa$ . La soudure  $b$  s'échauffant à chaque tour, le mouvement continue indéfiniment.

M. Marsch a imaginé un appareil qui porte aussi en lui-même la source du courant, et dans lequel on obtient à la fois deux mouvements de sens contraires. Un vase annulaire de cuivre  $c c'$  (fig. 1504) traversé par le pôle d'un barreau aimanté, est rempli d'eau acidulée, dans laquelle peut tourner un cylindre de

zinc  $zz$ , soutenu par l'arc  $aa$  et par une pointe  $o$  qui s'enfonce dans une petite cavité de l'extrémité de l'aimant. Le vase de cuivre  $cc$  peut aussi tourner sur la pointe  $o$  appuyée sur l'arc  $aa$ . L'eau acidulée produit avec le zinc, un courant qui suit la direction des flèches, et les deux vases tournent en sens opposé sous l'influence de l'aimant.

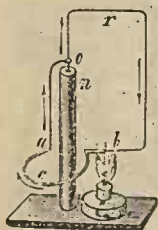


Fig. 1503.



Fig. 1504.

Rappelons ici la rotation sous l'influence d'un aimant, des filets lumineux

produits par l'électricité dans le vide imparfait; expérience par laquelle de La Rive a cherché à imiter l'aurore boréale et le déplacement de ses rayons (1794).

Tous ces effets se déduisent des actions des courants circulaires sur les parties de circuit mobiles. On peut aussi les expliquer en partant du principe d'Ampère que l'action du pôle d'un aimant sur un élément de courant est perpendiculaire au plan qui passe par ce pôle et par l'élément (2180). Il est facile

de voir que, dans les divers cas que nous venons d'examiner, l'action est perpendiculaire à chaque élément considéré, et dirigé dans le sens du mouvement.

**2182. Roue de Barlow.** — Une roue très légère en cuivre (*fig. 1505*) armée de pointes profondément découpées, est mobile autour d'un axe horizontal communiquant avec un des pôles d'une pile. Pendant la rotation, les pointes viennent plonger successivement dans du mercure remplissant une cavité creusée dans la table de l'appareil, entre les branches d'un aimant en fer à cheval. Le mercure communique avec l'autre pôle de la pile, et le circuit est fermé par la pointe qui plonge dans ce liquide. Si le pôle nord de l'aimant est en avant de la figure, les courants d'Ampère qui circulent dans les deux branches, présentent en dedans, à la roue, leurs parties montantes; la pointe verticale, dans laquelle le courant est supposé descendre, est poussée vers la ligne neutre, puis remplacée par une autre pointe, poussée à son tour; et la roue tourne rapidement dans le sens de la flèche *r*. Si l'on renverse le courant, le mouvement change de sens. On voit que ce phénomène se rattache au mouvement qu'un aimant imprime à un courant mobile qui lui est perpendiculaire (2123).

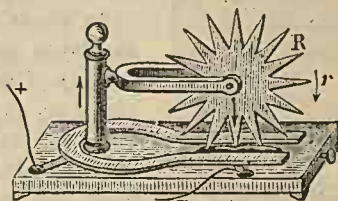


Fig. 1505.

**2183. Rotation des aimants par les courants.** — Dans une éprouvette *V*, remplie de mercure, flotte un aimant vertical *n* (*fig. 1506*), représenté à part en *n's*, et lesté par un cylindre de platine *p*.

En *n* est vissée une petite coupe contenant du mercure dans lequel s'enfonce une pointe de métal *t*. Cette pointe communique par *ob* avec l'un des pôles d'une pile, dont l'autre pôle communique avec le mercure de l'éprouvette, par *o'c* et par un anneau *a* qui plonge dans ce liquide. Le courant, entrant en *o'* passe de l'anneau *a* à l'aimant *n*, en suivant la surface du mercure, et retourne à la pile par la tige *t* et le bras *b*. On voit alors l'aimant tourner sur lui-même. Si on le renverse de manière à mettre le

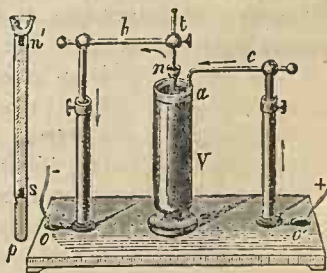


Fig. 1506.

pôle Sud en haut, il se meut en sens contraire. Si, sans modifier la position de l'aimant, on change le sens du courant, le sens de la rotation change encore.

Ampère explique ce mouvement par l'action des courants qui circulent suivant les rayons, à la surface du mercure, sur les courants circulaires qu'il suppose exister dans l'aimant. Soit *ac* (*fig. 1507*), le pôle Nord de ce dernier dans lequel les courants circulaires ont la direction des flèches, et *n* un des courants qui circulent sur le mercure, en allant, par exemple, du centre à la circonférence.

Le courant  $n$  attire la partie  $a$  du courant de l'aimant, qui s'éloigne comme lui du point de croisement, et repousse la partie  $c$  qui s'approche de ce point. Il y a donc rotation dans le sens de la flèche  $r$ . Tous les courants qui glissent sur le mercure agissant de la même manière que le courant  $n$ , le mouvement est rapide; il est en sens contraire du courant de l'aimant, quand son pôle Nord est en haut et le courant extérieur dirigé du centre à la circonférence. On voit que le phénomène est semblable à celui que produisent les spirales de Savary (2160).



Fig. 1507.

Au lieu de placer l'aimant dans l'axe de l'éprouvette, Faraday l'a placé en dehors, en enfonçant la tige  $t$  dans le mercure. Dans ce cas, l'aimant se transporte autour de cette tige, et le sens du mouvement de rotation est le même que celui de l'aimant tournant sur lui-même. — Ampère explique ainsi ce transport: soit  $ac$  (fig. 1508) le pôle Nord de l'aimant, et supposons que les courants rayonnent sur la surface du mercure, du centre à la circonférence. On voit que la partie  $c$  des courants qu'il contient est attirée par les courants glissant sur le mercure du même côté, et que la partie  $a$  est, au contraire, repoussée par ceux qui se trouvent de son côté. Comme il en est de même dans toutes les positions que peut prendre l'aimant, il tournera d'une manière continue dans le sens  $r$ . On augmente l'effet, en recouvrant l'aimant de gomme laque, pour empêcher les courants de le traverser, et les forcer de l'envelopper comme on le voit dans la figure.

L'expérience qui précède a été faite par Faraday, avant les découvertes d'Ampère, qui obtint plus tard la rotation d'un aimant sur lui-même, et montra que ces mouvements sont dus aux courants qui glissent sur le mercure.



Fig. 1508.

Il les reproduisit ensuite au moyen d'un solénoïde au lieu d'aimant, et les retrouva par le calcul.

**2184.** Ampère ayant remplacé l'aimant de l'appareil (fig. 1506) par un cylindre de cuivre, et la tige  $t$  par un aimant terminé par une pointe, a vu le cylindre de cuivre tourner sur lui-même. Dans ce cas, l'effet est dû à l'action de l'aimant fixe sur les courants verticaux parcourant le cylindre, de sa base supérieure à la surface du mercure, et le phénomène est un cas particulier de la rotation

des courants par les aimants (fig. 1501).

M. Breton a construit des appareils qui produisent des effets analogues.  $acb$  (fig. 1509) est un aimant coudé fixé à un arbre tournant  $oo'$ , qui communique par le crochet  $\alpha$  avec du mercure contenu dans un vase annulaire  $vv'$ . Si l'on fait passer le courant d'une pile par  $n$   $v$  et  $o'$ , l'aimant  $ab$  tourne dans un sens qui dépend de celui du courant. Pour expliquer ce mouvement, remarquons que, si le courant  $co'$  pouvait se transporter autour de l'aimant  $co'$  supposé fixe, ce mouvement aurait lieu comme dans l'appareil (fig. 1502);



mais, comme c'est l'aimant qui est mobile et le courant fixe, c'est le premier qui se déplace.

Si l'on remplace l'aimant *ab* par l'aimant cylindrique *AB* (fig. 1509) pouvant tourner sur lui-même, la partie *αB* parcourue par des courants verticaux, tournera sous l'influence de la partie *Az*, comme dans l'expérience d'Ampère ci-dessus ; le mouvement de la partie *Az* ne changeant rien à son mode d'action.

**2185. Rotation du mercure par les aimants.** — Si l'aimant *n* (fig. 1506) était fixe, on conçoit que le mercure, à cause de sa mobilité, tournerait en sens contraire du mouvement de l'aimant, en vertu du principe de l'action opposée à la réaction. C'est, en effet, ce que H. Davy a observé, avant qu'il fût possible de l'expliquer<sup>1</sup>. Il opérât simplement en enfonçant dans du

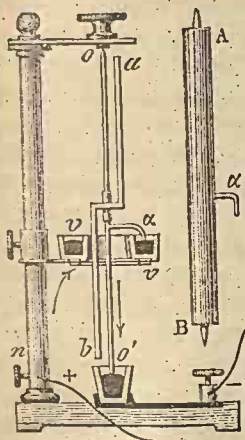


Fig. 1509.

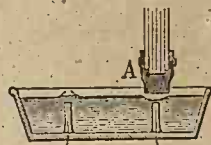


Fig. 1510.

mercure, les électrodes d'une pile<sup>2</sup> à grande surface, et plaçant au-dessus du point d'immersion de l'une d'elles, le pôle d'un fort aimant vertical ; le mercure tournait autour de l'électrode. Le mouvement

devenait beaucoup plus rapide quand on plaçait sous le vase le pôle opposé d'un autre aimant. — Davy a aussi opéré en faisant passer le courant par des fils traversant le fond du vase, et recouverts de gomme laque, excepté aux extrémités, que le mercure ne dépasse que de très-peu (fig. 1510). Dès que le courant est établi, le mercure se soulève au-dessus des fils, en formant des cônes d'où partent des ondes circulaires ; ce qui s'explique par la répulsion des parties consécutives d'un même courant.

Si l'on approche le pôle d'un fort aimant vertical, de l'un de ces cônes, on le voit s'affaisser, disparaître, puis se changer en une dépression qui atteint presque l'extrémité de l'électrode ; en même temps le mercure prend peu à peu son mouvement de rotation, dont le sens, qui dépend de l'électrode et du pôle de l'aimant, est toujours conforme à ce qu'indique la théorie. — Davy a produit les mêmes phénomènes dans l'étain en fusion. Poggendorff, en opérant sur quelques centimètres cubes de mercure, dans un verre de montre, afin de n'avoir besoin que de quelques couples de Bunsen, a vu le mouvement se ralentir peu à peu, puis cesser tout-à-fait ; ce qu'il attribue à l'oxydation du mercure, qui lui ôte de sa fluidité.

Si l'on enfonce l'aimant dans le mercure, le sens du mouvement dépend du point où le niveau le rencontre, point qui peut être plus haut ou plus bas que

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXXV, p. 335.

le pôle magnétique. Ce résultat, observé en 1824 par de La Rive, et étudié plus tard par Poggendorff, semble en contradiction avec la théorie d'Ampère. Mais il faut observer que les courants moléculaires ne sont pas parallèles entre eux, d'après ce que nous avons vu (2180). D'un même côté du pôle, les résultats restent constants. Si l'on pouvait opérer avec un seul filet magnétique, dont le pôle occupe l'extrémité, il n'y aurait plus à s'occuper du point d'affleurement; c'est ce qui a lieu quand on emploie une solénoïde au lieu d'un aimant.



Fig. 1511.

Quand on opère avec un solénoïde, on réalise la rotation du mercure par un courant. Ce dernier phénomène peut aussi être produit en enveloppant d'un multiplicateur circulaire, un vase cylindrique contenant du mercure, et faisant passer un fort courant dans le mercure, par un anneau placé dans le vase, et par une tige verticale plongée au centre de l'anneau. La rotation est alors due à l'action du multiplicateur sur les courants dirigés dans le mercure suivant les rayons, et elle change de sens quand on renverse un des courants.

**2186. Rotation de l'eau acidulée.** — Dans les expériences qui précèdent, l'aimant ou le courant agissent sur l'électricité qui circule dans le mercure, et, si ce liquide se meut, c'est qu'il résiste au déplacement de l'électricité. Un liquide moins conducteur et moins dense conviendrait donc mieux que le mercure. M. Jamin a opéré sur de l'eau acidulée contenue dans un vase cylindrique V (fig. 1511) placé entre deux pôles contraires d'électro-aimant A, B. L'électricité arrive dans le liquide, par de gros fils de platine  $m$ ,  $n$ , entre lesquels le courant s'épanouit. Les parties non verticales sont sollicitées à tourner, par les pôles magnétiques A, B, et les bulles de gaz qui se dégagent aux électrodes, montent en décrivant des hélices, l'une dextrorsum, l'autre sinistrorsum; ce qui indique que le liquide tourne en sens contraire en  $m$  et en  $n$ . Le mouvement se fait dans le sens prévu par la théorie, d'après la nature des pôles A, B, et le sens du courant en  $mn$ .



Fig. 1512.

Considérons encore un vase dans lequel les électrodes  $m$ ,  $n$  (fig. 1512) pénètrent par le fond, et dont l'ouverture circulaire est placée entre les pôles opposés A, B d'un électro-aimant. Le courant est épanoui dans le liquide, et forme au-dessus des fils  $m$ ,  $n$ , des arcs plus ou moins surélevés, dont les parties verticales sont sollicitées par les pôles A et B. Chaque élément de courant vertical partant de  $m$  est soumis à deux forces  $mp$ ,  $mq$ , perpendiculaires aux plans qui passent par cet élément et par les pôles A ou B (2180); soit  $r$  leur résultante. Les courants dirigés verticalement au-dessus de  $n$  sont, de même, soumis à des actions donnant la résultante  $r'$ . Les

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XLIII, p. 334.

bulles de gaz s'élèveront donc en formant deux petites colonnes s'écartant l'une de l'autre. Si l'on change le sens de l'aimantation en A et B, on verra les colonnes se rapprocher, au lieu de s'éloigner. — Si les électrodes sont en  $m'$ ,  $n'$ , les résultantes  $s$ ,  $s'$  feront tourner le liquide avec une vitesse d'autant plus grande que  $m'$  et  $n'$  seront plus éloignés de la droite  $mn$ , et le sens du mouvement changera avec les pôles A et B.

M. E. Wartmann a fait tourner un liquide fournissant lui-même l'électricité<sup>1</sup>. Un barreau de fer doux suspendu verticalement au pôle d'un aimant, plonge dans une dissolution de sulfate de cuivre. Le liquide attaque le fer et dégage de l'électricité. Le fluide positif se répand dans la dissolution, d'où il revient ensuite au barreau, pour neutraliser le fluide négatif qu'il a reçu, en formant ainsi des courants qui convergent vers ce barreau. Ces courants peuvent être détournés dans un rhéomètre, dont on plonge un des fils tout près du barreau, et l'autre à une certaine distance. L'aimant agit sur ces courants, et le liquide tourne dans le sens indiqué par la théorie. Grove a obtenu, en employant l'acide sulfurique étendu, un mouvement assez prononcé pour entraîner de petits flotteurs.

M. Bertin a imaginé des appareils avec lesquels on montre facilement la rotation des liquides, dans différentes conditions<sup>2</sup>. On voit (fig. 1513) une coupe d'un de ces appareils. AAA est un vase annulaire en verre contenant de l'eau acidulée sur laquelle flotte un anneau de liège L, destiné à

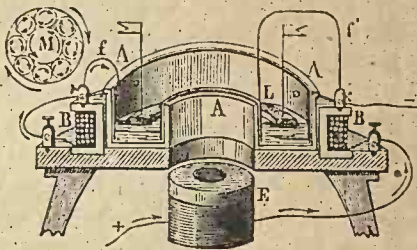


Fig. 1513.

indiquer les mouvements, et enduit de noir de fumée pour éviter l'adhérence capillaire aux parois. Le liquide communique avec les pôles d'une pile de 3 ou 4 couples à charbon, par les fils  $f$ ,  $f'$  et des lames de cuivre appliquées sur les deux parois cylindriques du vase. E est un aimant ou un électro-aimant, sous l'influence duquel le liquide tourne dans le sens prévu par la théorie, quand il est traversé par le courant. — Si l'on supprime l'aimant E, le liquide tourne encore, mais très-lentement, sous l'influence de la terre.

Si l'on soulève l'aimant peu à peu dans le trou central, on remarque que le liquide ne tourne plus quand le pôle de cet aimant est à la hauteur du niveau du liquide. Si l'on continue à soulever l'aimant, la rotation se reproduit, mais en changeant de sens; elle s'accélère jusqu'à ce que le milieu du barreau soit au niveau, puis elle s'affaiblit, devient nulle quand le pôle inférieur est au même niveau, pour changer ensuite de sens. — Si l'aimant vertical est en

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 394.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LV et LVIII, et 4<sup>e</sup> série, t. XVI.

dehors de l'appareil, le pôle de l'aimant, pour qu'il n'y ait pas d'action, doit se trouver en des points dont la hauteur dépend de sa distance à l'axe de l'appareil. Ces points forment une sorte d'hyperboloïde de révolution à deux nappes. Ces phénomènes, qui se rattachent aux expériences de M. Boisgiraud (2123), ont été expliqués en détail par M. Bertin, en partant du principe des actions perpendiculaires aux plans qui passent par l'élément du courant considéré et par les pôles de l'aimant (2180).

**Rotation dans les aimants creux.** — On peut produire la rotation du liquide de l'appareil (*fig.* 1513), en faisant passer un courant dans un multiplicateur BB qui entoure le vase annulaire. L'expérience n'est alors que la reproduction de celle du n° 2160. Si l'on met la bobine dans le trou central, le liquide tourne dans le même sens. Il semble qu'il doive en être de même à l'extérieur et à l'intérieur d'un aimant creux; mais M. Bertin a reconnu que les rotations s'y font en sens contraire, et il l'explique en faisant remarquer que, dans les courants d'Ampère qui forment les solénoïdes groupés de manière à constituer un tube, le courant marche en sens inverse en dedans et en dehors, comme on le voit en M (*fig.* 1513). Pour montrer que l'intérieur d'un tube aimanté exerce une action inverse de celle qu'exerce l'intérieur d'une bobine, M. Bertin laisse un espace entre le vase AAA et la bobine BB, et y glisse un tube de fer épais, qui s'aimante, et ralentit, ou même anéantit la rotation que produit la bobine seule.

**2187. Conclusions.** — On peut conclure des développements qui précèdent, que la théorie électromagnétique d'Ampère explique de la manière la plus satisfaisante les phénomènes du magnétisme, et les actions des aimants et des courants sur les courants. Cette théorie établit un lien naturel entre les phénomènes de l'électrodynamique, du magnétisme, de l'électromagnétisme et même du magnétisme terrestre, le globe; avec sa ceinture de courants, pouvant être considéré comme un immense solénoïde, et elle permet de les grouper autour d'un fait unique, l'action mutuelle de deux éléments de courant. — Dans la théorie de Coulomb, on est forcé d'admettre l'existence de deux fluides qui n'ont jamais été isolés; on ne peut expliquer les phénomènes électromagnétiques, ni les mouvements de rotation des courants par les aimants et des aimants par les courants, que la théorie d'Ampère explique avec tant d'élégance.

Avant la découverte fondamentale d'Ørsted, l'hypothèse des deux fluides magnétiques avait suffi à la science; elle avait été surtout mise en faveur par les recherches analytiques de Poisson, qui était parvenu à faire ressortir, pour ainsi dire, de ses savants calculs tous les phénomènes connus. Mais ces calculs s'appliquent également à la théorie d'Ampère, l'action exercée sur un élément de courant, par un des courants particuliers d'un solénoïde, étant la même que celle qu'exerce un élément magnétique (2180). Remarquons du reste que Coulomb s'était approché de la vraie théorie autant qu'il était possible avant la découverte d'Ørsted, car il avait reconnu que le magnétisme ne se transporte pas dans les aimants, et qu'il ne quitte pas les éléments magnétiques. Ampère a montré ensuite que tout se passe comme si ces éléments étaient constitués par de petits courants électriques.

Nous allons voir comment l'induction électrodynamique est venue confirmer d'une manière inattendue la théorie d'Ampère, en permettant de développer de l'électricité au moyen d'aimants, et de reproduire avec cette électricité tous les effets dont est capable cet agent soit à l'état statique soit à l'état dynamique.

#### § 4. — COURANTS D'INDUCTION

##### I. Induction par les courants et par les aimants.

**2188. Induction par les courants.** — Les phénomènes de l'*induction par les courants* ou *induction électrodynamique* ont été découverts par Faraday, en 1832<sup>1</sup>. Cependant, comme nous allons le voir, Ampère, 10 ans auparavant, avait observé le premier fait de ce genre. Quoi qu'il en soit, cette découverte a été des plus fécondes, elle a ouvert des voies nouvelles et a conduit à un grand nombre d'applications importantes. — Voici d'abord l'énoncé des principaux faits :

1<sup>o</sup> Si l'on approche rapidement un courant, d'un circuit *fermé*, il se produit aussitôt, dans ce circuit, un *courant induit* ou *courant d'induction*, inverse ou *négalif*, c'est-à-dire de sens contraire au *courant inducteur* ;

2<sup>o</sup> Le courant induit n'a qu'une durée insensible ; il disparaît aussitôt après avoir pris naissance.

3<sup>o</sup> Quand on éloigne rapidement le courant inducteur, il se manifeste dans le circuit fermé un nouveau courant instantané ; cette fois, de même sens que le courant inducteur. On le nomme *courant induit, direct* ou *positif*.

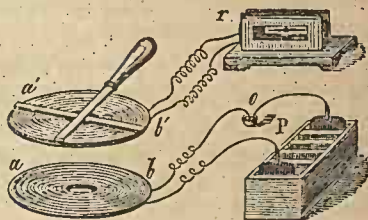


Fig. 1514.

Au lieu d'approcher et d'éloigner le circuit inducteur, on peut le laisser en repos tout près du circuit induit, et y lancer un courant ; il se produit aussitôt un courant d'induction instantané *inverse*. Quand on *supprime* le courant inducteur, il se manifeste un courant d'induction *direct*.

Pour observer ces phénomènes, il faut mettre en présence de grandes longueurs de fils, ce que l'on peut faire de différentes manières.

1<sup>o</sup> On enroule, en forme de spirale plane *a'b'* (fig. 1514), un fil de cuivre revêtu de soie, et l'on joint ses extrémités à celles du fil d'un rhéomètre *r*, de manière à former un circuit fermé. Une autre spirale *ab* est parcourue par le courant d'une pile *P*. Si l'on approche brusquement la spirale *a'b'*, de la spirale *ab*, ou réciproquement, l'aiguille du rhéomètre se dévie aussitôt, de manière à indiquer en *a'b'* un courant de sens contraire au courant qui parcourt *ab* ; et

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. XLVIII, p. 402, et L, p. 15.

immédiatement après cette aiguille revient en oscillant à sa position d'équilibre; le courant induit n'a donc qu'une durée insensible. Quand on éloigne rapidement la spirale  $a'b'$ , l'aiguille est déviée en sens contraire de sa première déviation, de manière à indiquer un courant induit de même sens que le courant inducteur.



Fig. 1515.

2<sup>o</sup>. Au lieu des spirales plates, on emploie souvent une bobine B (fig. 1515); dont le fil communique avec un rhéomètre; et un solénoïde  $b$ , dont le fil est parcouru par un courant. Si l'on enfonce rapidement le solénoïde dans la bobine B, on obtient, dans le fil de celle-ci, un courant induit inverse et instantané, et un courant induit direct, quand on retire brusquement le solénoïde  $b$ .

Ces courants induits sont d'autant plus intenses que les mouvements sont plus brusques. Il suffit, du reste, pour obtenir des effets sensibles, de faire varier seulement la distance entre les deux circuits, pourvu que le mouvement soit assez rapide. Si ce mouvement a une durée appréciable, le courant induit n'est plus instantané: il présente cette même durée, mais son intensité est faible.

Pour expérimenter avec le circuit inducteur fixe, on laisse les spirales (fig. 1514) appliquées l'une sur l'autre, et on lance un courant dans  $ab$ , ce qui se fait facilement au moyen de mercure,  $o$ , et l'on observe en  $a'b'$  un courant d'induction inverse. On obtient un courant direct au moment où l'on supprime le courant en  $ab$ .

On peut encore opérer en enroulant ensemble sur une même bobine B (fig. 1516) deux fils recouverts de soie, dont les bouts sortent en  $r, r'$  et  $c, c'$ , et dont un,  $rr'$ , communique avec le rhéomètre; l'aiguille de celui-ci indique un courant induit instantané *negatif* au moment où l'on introduit un courant dans  $cc'$ , et un courant *positif*, au moment où l'on ouvre le circuit inducteur.

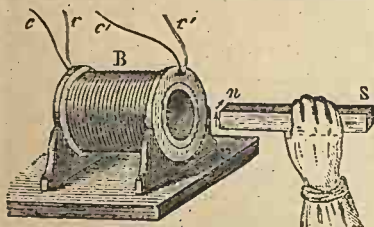


Fig. 1516.

engagé dans cet anneau. Comme ce courant était instantané, Ampère n'attachait pas à ce résultat toute l'importance qu'il méritait.

**2189. Induction magnéto-électrique.** — Les courants d'induction permettent de soumettre à une nouvelle épreuve la théorie électromagnétique

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXI, p. 47.

d'Ampère, en cherchant si les aimants sont capables de produire des courants induits; et c'est, en effet, ce qui a lieu, comme l'a reconnu Faraday<sup>1</sup>. Pour faire l'expérience, on prend une bobine creuse en bois, comme celle de la figure 1516; seulement, on a soin de réunir les bouts  $r$ ,  $c'$  des fils, de manière qu'ils n'en forment qu'un seul, dont on met les extrémités  $r'$  et  $c$  en rapport avec un rhéomètre. Au moment où l'on enfonce brusquement un aimant  $ns$  dans la bobine, on voit l'aiguille indiquer un courant induit de sens contraire aux courants d'Ampère dans l'aimant (2177), et revenir aussitôt à sa position d'équilibre. L'aiguille est de nouveau déviée, et du côté opposé, quand on retire brusquement l'aimant. Si l'on enfonce cet aimant par son autre pôle, les déviations se font en sens inverse, comme il était facile de le prévoir.

On peut encore opérer en plaçant dans la bobine un barreau de fer doux dont on approche et on éloigne rapidement le pôle d'un aimant, de manière à aimanter brusquement ce fer, pour le laisser ensuite revenir à l'état neutre. Les effets sont les mêmes, les courants d'Ampère prenant dans le fer la même direction que dans l'aimant.

M. Dujardin a produit des courants d'induction dans le fil d'un rhéomètre, fil qui était réuni à celui d'un autre rhéomètre, en faisant tourner brusquement l'aiguille du premier. En général, tant que l'aimant enfoncé dans une bobine reste en repos, il n'y a aucun effet; mais il suffit de le déplacer (par exemple, de l'enfoncer ou de le retirer un peu), pour obtenir un courant sensible.

Enfin, au lieu de rhéomètre, on peut employer une roue de Barlow (2182), qui reçoit une petite impulsion dans un sens ou dans l'autre quand se produit un courant induit.

C'est au moyen des aimants que Faraday a fait ses premières expériences sur l'induction; il y fut conduit par cette considération que, les courants développant du magnétisme dans l'acier, les aimants devaient engendrer des courants dans les fils conducteurs, en vertu du principe de la réaction égale et opposée à l'action. Puis, pour contrôler la théorie d'Ampère, il chercha si les courants pouvaient, comme les aimants, produire des courants induits. — Ayant appliqué les pôles d'un fort aimant en fer à cheval sur les extrémités d'un électro-aimant, et, les ayant écartés vivement, il obtint une étincelle à travers une légère lacune ménagée dans le circuit de l'électro-aimant. Cette expérience excita une admiration générale, en montrant l'étincelle électrique engendrée par le magnétisme.

**Expérience de Page.** — M. Page a obtenu des courants induits en modifiant simplement l'état magnétique d'un aimant, au moyen de fer doux. Un fil de cuivre revêtu de soie est enroulé autour d'un aimant; quand on approche brusquement une armature de cet aimant, elle en augmente la force en produisant une sursaturation, et il se développe dans l'hélice un courant induit *inverse*, indiqué par un rhéomètre; quand on éloigne l'armature, l'aimant revient à son état primitif, et il se produit un courant induit *direct*.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XI, p. 457.

**2190. Influence d'un barreau de fer sur l'induction électrodynamique.** — Si l'on met dans l'axe de la bobine (fig. 1516) un barreau de fer doux, et qu'on développe des courants induits dans le fil  $m'$ , au moyen de courants inducteurs lancés dans le fil  $ce'$ , les effets sont beaucoup plus intenses qu'en l'absence du barreau. Ce phénomène, découvert par Faraday, tient à ce que le fer doux s'aimante au moment où l'on introduit le courant inducteur, et agit comme un solénoïde dont les courants, de même sens que le courant inducteur, ajoutent leurs effets à celui de ce dernier, avec lequel ils naissent et disparaissent simultanément.

**2191. Induction dans les liquides.** — Faraday a produit l'induction dans une colonne d'eau acidulée contenue dans un tube de caoutchouc enroulé autour d'un cylindre de fer doux formant le prolongement du noyau d'un électro-aimant. Des fils de cuivre faisaient communiquer les extrémités de la colonne liquide avec un rhéomètre. Quand on lançait le courant de 20 couples de Grove dans l'électro-aimant, l'aiguille du rhéomètre était brusquement déviée, et, quand on déchargeait l'électro-aimant, il se produisait une déviation inverse. Avec l'eau pure, il n'y a pas eu de résultats.

Ces résultats semblent prouver la conductibilité propre des liquides (2002); mais MM. Van Bréda et Logeman ont montré qu'il y a électrolyse dans le liquide induit : Ayant enfoncé des fils de platine dans les extrémités du tube de caoutchouc, ils les réunirent par un rhéomètre, et en même temps par un fil court D. Ils lancèrent un courant dans l'électro-aimant; le courant induit du liquide passa par le fil D, et l'aiguille du rhéomètre resta en repos. Ils enlevèrent aussitôt le fil D, et ils observèrent une déviation de  $10^\circ$  produite par la polarisation des électrodes, et indiquant un courant contraire au courant induit auquel était due cette polarisation. L'aiguille étant revenue peu à peu au repos, ils rétablirent le fil D, supprimèrent le courant de l'électro-aimant, et obtinrent un courant induit direct, accompagné d'une polarisation des électrodes, qu'ils reconnurent par le même moyen.

**2192. Induction par la terre.** — La terre, constituant un aimant, ou plutôt un solénoïde dans lequel les courants vont de l'Est à l'Ouest, doit être capable de produire des courants induits. C'est ce que Faraday a encore constaté<sup>1</sup>. Il prit une hélice dont le fil communiquait avec un rhéomètre, la plaça dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, et la retourna brusquement bout à bout. A chaque renversement, il obtenait un courant faible, mais bien déterminé, marchant de l'Ouest à l'Est dans la partie inférieure de l'hélice après son renversement. En retournant l'hélice plusieurs fois de suite, en ayant soin de faire coïncider ses mouvements avec les oscillations de l'aiguille, il obtint une déviation de  $80^\circ$ . Faraday avait d'abord opéré avec une hélice contenant un barreau de fer; mais alors on pouvait attribuer l'induction à l'aimantation seule du fer par l'action de la terre.

<sup>1</sup> Bibliothèque de Genève (Archives des sciences), t. XXV, p. 267, et t. XXVIII, p. 36.



Faraday a encore procédé de la manière suivante : un fil de cuivre de 3 mètres de longueur, plié en rectangle, communiqué avec un rhéomètre par ses extrémités, situées au milieu du côté horizontal inférieur, qui est placé dans le méridien magnétique. Si l'on fait passer le côté horizontal supérieur, de l'Est à l'Ouest, par-dessus le côté inférieur servant de charnière, l'aiguille du rhéomètre est déviée, de manière à indiquer un courant induit allant du Nord au Sud dans la partie supérieure. De quelque manière que l'on oriente le côté autour duquel on fait tourner le rectangle, on obtient des courants induits, si ce n'est dans le cas où le côté mobile se meut parallèlement à l'aiguille d'inclinaison.

**Cerceau de Delezenne.** — Delezenne montre l'induction par la terre de la manière suivante : AA (fig. 1517) est un cerceau de bois, de 1 mètre de diamètre environ, autour duquel est enroulée l'hélice induite. Ce cerceau peut tourner sur un axe  $oo'$  porté par le cadre MN, mobile lui-même autour d'un axe horizontal  $cc'$ . Des aiguilles marquent sur des cercles divisés  $o$ ,  $c'$ , les déplacements angulaires du cerceau et du cadre. Les extrémités du fil induit aboutissent à des anneaux métalliques isolés l'un de l'autre  $a$ ,  $a'$ , sur lesquels s'appuient deux petits ressorts, portés par une pièce de bois  $n$ , et auxquels on fixe les extrémités  $f$ ,  $f$  du fil d'un rhéomètre.

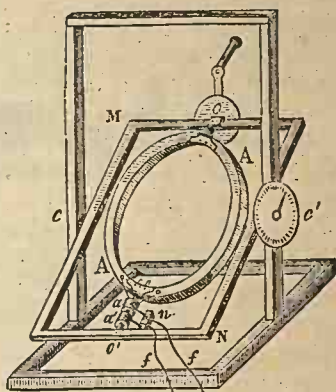


Fig. 1517.

L'axe  $oo'$  étant dans le méridien magnétique, et le cadre MN, ainsi que le cerceau, perpendiculaires à l'aiguille d'inclinaison, si l'on fait faire au cerceau un tour entier en  $30^s$ , avec une vitesse uniforme, autour de l'axe  $oo'$ , on voit l'aiguille du rhéomètre dévier peu à peu de manière à indiquer, dans le fil du cerceau, un courant induit direct, qui augmente graduellement jusqu'au moment où le cerceau, ayant tourné de  $90^\circ$ , se trouve vertical. Alors la déviation de l'aiguille est maximum; puis cette déviation diminue, pour devenir nulle quand le cerceau a tourné de  $180^\circ$ . Le mouvement continuant, l'aiguille est de nouveau déviée, mais en sens opposé, et atteint son maximum de déviation quand le cerceau passe par le plan vertical; la déviation diminue ensuite jusqu'à la fin du tour entier. Le courant induit varie d'intensité avec le sinus de l'angle de rotation du cerceau, et change de signe avec lui. — Quand l'axe  $oo'$  est exactement parallèle à l'aiguille d'inclinaison, il n'y a plus de courant induit, quelque rapide que soit le mouvement.

**2193. Induction par un circuit très-résistant.** — L'état définitif d'un courant lancé dans un long circuit est précédé d'un état variable (2042). C'est pendant cet état variable que le courant produit l'induction. M. Guillemin est parvenu à évaluer les intensités des courants induits engendrés à chaque instant de cet état variable, et dont la somme constitue le courant induit définitif, en employant l'appareil (fig. 1518) déjà décrit plus haut (2042). Dans le circuit  $mLL'T$  est introduite une bobine, sur laquelle sont enroulés le fil inducteur et le fil induit, auquel est empruntée la dérivation  $vrdd'o$ . En opérant comme il a été expliqué, on laisse passer le courant dérivé, pendant  $\frac{1}{2000}$  de seconde, par la lame  $\xi$ , et quelques dix-millièmes de seconde après la fermeture du courant inducteur et le commencement du courant induit. L'appareil faisant 15 tours par seconde, ce qui donne 15 courants dérivés, l'aiguille du rhéomètre prend

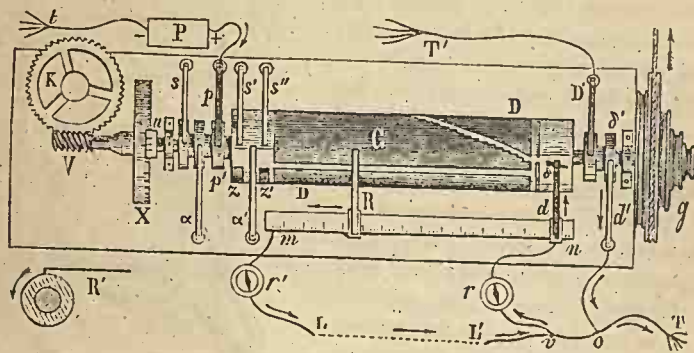


Fig. 1518.

une position fixe, qui fait connaître l'intensité du courant induit au moment considéré. — Pour le courant induit de rupture, les choses étaient disposées de manière que la lame  $\xi$  touchât le ressort  $d$  quelques dix-millièmes de seconde après la rupture du circuit inducteur.

Pendant l'état variable, le courant va en diminuant d'intensité près de la pile tandis qu'il va en augmentant près de l'extrémité unie au sol (2042); on devrait donc trouver un courant induit *direct* dans la bobine quand elle est placée près de la pile, et un courant *inverse* quand elle est placée près de l'extrémité opposée du fil inducteur. D'un autre côté, le courant commençant, pour toutes les parties du fil, on devrait trouver partout un courant induit *inverse*. Il y a donc contradiction, et l'expérience, qui seule pouvait décider, a montré que, près de la pile, le courant induit est d'abord *inverse*, puis *direct* jusqu'à la fin de l'état variable. Voici quelques résultats obtenus près de la pile, successivement avec deux bobines ayant 600 et 300 mètres de fil, et dans l'intérieur

<sup>1</sup> Recherches expérimentales sur l'induction volta-électrique, Montpellier (1861).

desquelles on introduisait 100 et 60 baguettes de fer doux. Le signe (—) indique les courants inverses.

Temps en $\frac{1}{1000}$ de seconde.	0,2	0,5	1,3	3,4	4,8	6,7	10,9	15,4
1. Bobine de 600 <sup>m</sup> .....	— 15°	— 32°	18°	3°	1°5	0°5	0°3	0°
2. Id. avec fer doux.	— 64	— 64	— 54	— 22	— 3	7	7,5	2
3. Bobine de 300 <sup>m</sup> .....	— 38	15	15	1,5	0,7	0,5	0,2	0
4. Id. avec fer doux.	— 70	— 63	— 43	?	9	10	4,5	0,5
5. Id. Id.	— 41	— 36	— 27	— 11	— 4	?	1	1

Les résultats de la 5<sup>e</sup> ligne ont été obtenus avec la bobine de la 4<sup>e</sup>; seulement, il y avait un fil de fer de  $\frac{1}{5}$ <sup>mm</sup> de diamètre et de 1000<sup>m</sup> de long entre la pile et la bobine. La courbe *bst* (fig. 1520), dont les abscisses représentent les temps, et les ordonnées, les intensités, traduit les résultats de la 5<sup>e</sup> ligne, et *bri* ceux de la 4<sup>e</sup>. *am* représente l'état variable dans le fil inducteur.

Voici comment M. Guillemin explique ces résultats : Soit AB (fig. 1519) le fil inducteur, communiquant en B avec le sol ; quand on joint l'extrémité A au

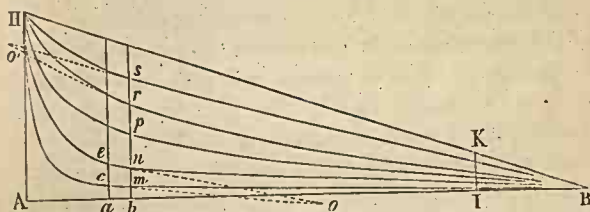


Fig. 1519.

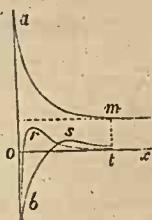


Fig. 1520.

pôle positif d'une pile, au premier instant il s'établit, dans tous les points de ce fil, des tensions, représentées par les ordonnées de la courbe *II m B*; quelques dix-millièmes de seconde après, par celles de la courbe *II n b*, puis par *II p B*, *II r B*....., et enfin par la droite *II B*, quand le courant a pris son état définitif. L'intensité du courant, dans un élément, *ab*, du fil, est proportionnelle à la chute électrique (2067) ou à la différence *ca—mb* qui varie, pour cet élément, d'un instant à l'autre, c'est-à-dire d'une courbe à l'autre. D'abord, elle va en augmentant, les tangentes *mo* et *no* se rencontrant à droite; alors le courant inducteur augmente d'intensité en *ab*, et le courant induit est inverse. Plus tard, la chute électrique diminue, comme le montrent les tangentes *ro'*, *so'*, qui se rencontrent à gauche, et le courant induit devient alors direct jusqu'à la fin de l'état variable, après lequel il n'y a plus d'induction.

**2194. Loi de Lenz.** — Peu de temps après la découverte de l'induction, M. Lenz a résumé dans l'énoncé qui suit les différents cas dans lesquels elle se manifeste par mouvement de l'inducteur. *Toutes les fois qu'on déplace un courant ou un aimant dans le voisinage d'un circuit fermé, il se forme dans ce circuit*

un courant induit inverse de celui qui devrait le parcourir pour qu'il imprime au circuit inducteur ou à l'aimant le mouvement que produit l'induction. Il résulte de là que, si le mouvement imprimé au courant inducteur ou à l'aimant est instantané, le courant induit est lui-même instantané; si ce mouvement est continu, le courant induit est lui-même continu. Quelques exemples seront comprendre la généralité de cet énoncé.

1<sup>o</sup> Un courant approché parallèlement d'une partie d'un circuit fermé, y développe un courant induit inverse; car un courant de sens opposé à celui-ci attirerait le courant inducteur. On voit de même que, si l'on éloigne ce dernier, il produira un courant induit direct. 2<sup>o</sup> Une portion rectiligne d'un circuit fermé, perpendiculaire à un courant indéfini et marchant parallèlement à elle-même dans le sens du courant, est parcourue par un courant induit continu, allant vers le courant indéfini; car un courant de sens opposé, soumis à l'influence d'un courant indéfini, marcherait en sens contraire de ce dernier (2156).

Un aimant parallèle à une portion rectiligne de circuit fermé et auquel on imprime un mouvement angulaire, développe dans ce circuit un courant induit à la droite duquel est placé son pôle nord; car un courant opposé existant dans le circuit, produirait le même effet. — Si l'on enfonce un aimant perpendiculairement jusqu'à sa ligne neutre, dans un anneau, ce dernier reçoit un courant induit tel que le pôle nord de l'aimant soit à sa droite; car un courant inverse attirerait l'aimant dans l'anneau (2123). — La roue de Barlow, mise en mouvement entre les branches de son aimant (2182), est parcourue par un courant continu qui marche suivant le rayon vertical, et de sens inverse au courant qu'il faudrait faire passer dans cette roue pour la faire tourner ainsi. — Les appareils avec lesquels on produit les mouvements de rotation d'un aimant par un courant, ou d'un courant par un aimant, sont parcourus par un courant induit dans le circuit fermé qui en fait partie, quand on fait mouvoir directement la partie mobile, et ce courant est de sens inverse au sens qu'il devrait avoir, pour imprimer à cette partie mobile le mouvement qu'on lui donne.

Si l'on éloigne brusquement un petit électro-aimant cylindrique d'un aimant sur lequel il est appliqué, l'hélice magnétisante est parcourue par un courant induit de sens contraire à celui qu'il faudrait y introduire pour que l'électro-aimant soit repoussé par l'aimant. Plusieurs physiciens, M. Jamin, M. Gariel..., ont tiré parti de cet effet pour étudier la distribution du magnétisme dans les aimants, au moyen des intensités des courants induits dans l'électro-aimant au moment de la séparation.

Un circuit fermé placé dans le méridien magnétique et qu'on tourne brusquement de 90° autour de la verticale, est parcouru par un courant induit qui va de l'Ouest à l'Est, dans la partie inférieure, si le mouvement a été fait de l'Est à l'Ouest en passant par le Sud; car un courant parcourant le circuit en sens inverse le ferait tourner de l'Est à l'Ouest. — Si le circuit est astatique, il ne produit pas de courant induit.

**2195. EXPLICATION DES COURANTS D'INDUCTION.** — M. Weber a appliqué à l'explication des courants induits, les considérations par lesquelles il a cherché à rattacher les actions mutuelles des courants aux attractions et répulsions électriques ordinaires (2166). M. Newmann a traité la même question en partant d'un point de vue différent. De La Rive, sans recourir comme eux à des calculs compliqués, a présenté d'une manière simple et élégante l'explication de l'induction électrodynamique, en la considérant comme le résultat d'une décomposition par influence dans les particules du circuit induit (2039)<sup>1</sup>.

**I. Cas du circuit inducteur fixe.** — Considérons une série de molécules, AB (fig. 1521), dans laquelle on lance un courant; il s'y fait des décharges intermoléculaires (2039), et l'électricité affluant continuellement de la pile, on peut supposer ces molécules dans un état constant de polarité, indiqué sur la figure. Supposons qu'on approche le courant AB, d'un circuit à l'état neutre A'B';

chacune des particules  $a, b, \dots$ , va être électrisée en plus à l'un de ses pôles et en moins à l'autre, par l'influence de la particule de AB la plus rapprochée; et cela aura lieu dans toutes les parties de A'B' assez rapprochées de AB, pour éprouver l'induction. Quant aux molécules  $n, m, \dots, m', n', \dots$ , qui sont en dehors de la partie induite, elles seront polarisées par les actions des molécules extrêmes  $m, m'$  de la partie induite, se déchargeront mutuellement, et formeront ainsi, dans la partie non induite A'RB' du circuit fermé, un courant instantané marchant en sens inverse du courant inducteur. — Si le circuit n'est pas fermé, on ne pourra évidemment constater ce courant induit; mais les extrémités  $m, m'$  du fil induit seront chargées d'électricités contraires, au moyen desquelles on pourra produire une étincelle, si l'interruption est très-petite.

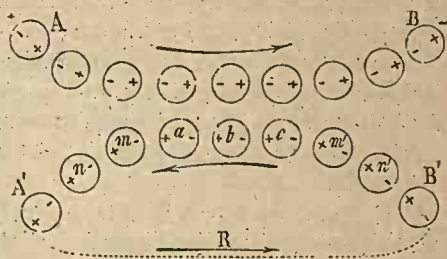


Fig. 1521.

seront polarisées par les actions des molécules extrêmes  $m, m'$  de la partie induite, se déchargeront mutuellement, et formeront ainsi, dans la partie non induite A'RB' du circuit fermé, un courant instantané marchant en sens inverse du courant inducteur. — Si le circuit n'est pas fermé, on ne pourra évidemment constater ce courant induit; mais les extrémités  $m, m'$  du fil induit seront chargées d'électricités contraires, au moyen desquelles on pourra produire une étincelle, si l'interruption est très-petite.

Remarquons que la partie non induite du circuit,  $mRm'$ , rentre immédiatement à l'état neutre; mais la partie induite  $mm'$  reste polarisée, et n'est pas parcourue par un courant, les électricités s'y trouvant retenues à l'état d'équilibre, sous l'influence des molécules de AB. C'est ce que Faraday avait admis dès le principe, et il désignait cet état sous le nom d'état électrotonique. Supposons maintenant qu'on supprime le courant inducteur, les molécules polarisées en  $mm'$  vont aussitôt revenir à l'état neutre; mais celles qui sont aux extrémités  $m, m'$  de la partie induite, n'ayant plus qu'une seule électricité, positive en  $m'$  et négative en  $m$ , ces fluides se réuniront à travers la partie  $m'A'RB'm'$ , en y

<sup>1</sup> Traité d'électricité théorique et appliquée, t. I, p. 445.

formant un courant instantané de sens contraire à celui qui s'est manifesté au moment de la naissance du courant inducteur, et, par conséquent, de même sens que ce dernier. L'expérience montre que la résistance du fil induit se fait plus sentir sur le courant inverse que sur le courant direct; c'est que le premier doit, pour s'établir, vaincre toutes les résistances du circuit, tandis que le courant direct dû à la décharge des molécules polarisées à l'avance dans tous les points de la partie induite, n'a à vaincre que la résistance de la partie non induite.

**II. Cas du courant inducteur mobile.** — Si le courant inducteur est rapproché peu à peu du circuit induit, le courant d'induction sera continu, les électricités séparées par influence dans la partie induite augmentant graduellement, et les décharges aux extrémités de cette partie induite continuant alors à fournir un écoulement d'électricité dans la partie extérieure  $mRm'$ . La tension du courant induit sera d'autant plus forte que le mouvement sera plus rapide, la même quantité d'électricité circulant en R dans un temps plus court. Si le mouvement était très-lent, le courant continu existant en R pourrait n'être pas perceptible, et il semblerait n'y avoir pas de courant induit. C'est pourquoi M. Wartmann a pu approcher jusqu'au contact, en allant très-lentement, une spirale inductrice d'une autre spirale, sans apercevoir de courant induit dans cette dernière.

Le P. Secchi, en partant de la théorie du flux électrique constituant le courant, a cherché à expliquer l'induction en faisant intervenir l'éther du milieu isolant qui sépare les deux circuits, milieu qui, en effet, comme nous le verrons (2208), a une grande influence sur le phénomène. Quand le courant est lancé dans le circuit inducteur, il s'y propage progressivement (2042), et la tête du flux amène une diminution de pression latérale, comme on l'observe dans les conduites d'eau (I, 257). Cette diminution détermine dans l'éther ambiant une raréfaction qui se communique à l'éther du circuit induit, et produit un changement d'équilibre qui voyage avec la tête du flux et constitue le courant induit. Un nouvel état d'équilibre est aussitôt constitué, de sorte que le courant induit ne dure qu'un instant. Quand on supprime ensuite le courant inducteur, un effet inverse se produit par le rétablissement progressif de sa pression latérale, et il se produit un second courant induit de sens contraire au premier<sup>1</sup>. — M. Edlund a développé, de son côté, une théorie qui a quelques points de ressemblance avec la précédente, en partant également de l'hypothèse d'une seule électricité<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> *L'Unité des forces physiques*, par le P. Secchi (1874), p. 352.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 230.

## II. Lois des courants d'induction.

**2196. Rhéotropes.** — L'intensité des courants d'induction dépend des circonstances dans lesquelles ils prennent naissance, comme l'étendue et la distance des circuits en présence, leur résistance, l'intensité et la nature du courant inducteur, etc. Dans les expériences que l'on fait à ce sujet, on a souvent besoin d'interrompre et de rétablir rapidement le courant inducteur, de ne recueillir que l'un des deux courants induits successifs en interceptant l'autre, ou enfin de renverser ce dernier, pour obtenir, dans une partie du circuit induit, des courants toujours de même sens. Les physiciens ont imaginé pour cela divers appareils, désignés sous les noms de *commutateurs*, *disjoncteurs*, *tachytropes*, *gyrotropes*, *rhéotropes*. Nous allons d'abord décrire deux de ces appareils :

La figure 1522 représente le rhéotrope de MM. Masson et Breguet<sup>1</sup>. Cinq roues métalliques, *a*, *b*, *c*, *d*, *r* (fig. 1522), portant des crans égaux remplis par du bois, sont fixées à un même arbre tournant, et isolées les unes des autres. La roue *r* sert uniquement à interrompre le courant de la pile *P*. Le fil qui joint les pôles de cette pile est enroulé sur la bobine *B*, en même temps que le fil induit *xy*. Les quatre autres roues, *a*, *b*, *c*, *d*, sont affermies sur l'arbre tournant, de manière que les dents de bois des roues extrêmes se trouvent vis-à-vis des dents métalliques de celles du milieu. L'extrémité *x*

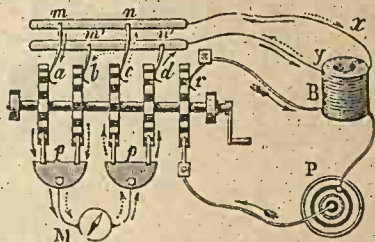


Fig. 1522.

du fil induit est fixée à une bande de métal *mn* qui porte deux ressorts, *ma*, *nc*, pressant le côté des roues *a*, *c*; et l'extrémité *y* est jointe à une autre bande, *m'n'*, dont les ressorts *m'b*, *n'd* pressent les roues *b*, *d*. Sur les contours des roues s'appuient quatre autres ressorts fixés à des plaques de métal *p*, *p'*, et disposés de manière que ceux des roues *a* et *d* s'appuient sur du métal pendant que ceux des roues *b* et *c* s'appuient sur du bois, et *vice versa*. Aux plaques *p*, *p'* sont fixées les extrémités de la partie *M* du circuit dans laquelle on veut que les courants induits marchent toujours dans le même sens, pendant la rotation du système.

Supposons que le courant induit parte de *x* quand le circuit inducteur se ferme, et que les ressorts des roues *a* et *d* s'appuient sur du métal, auquel cas les ressorts des roues *b*, *c* touchent du bois. Le courant suivra la direction des

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. IV, p. 433.





mités  $x, y$  du fil de la bobine communiquant avec les ressorts  $e$  et  $h$ . Supposons que l'induit inverse engendré au moment où le ressort  $r$  arrive sur du métal, sorte de la bobine en  $x$ ; ce courant suivra la route  $hTt$ , parcourra le fil  $M$  dans le sens de la flèche, puis le ressort  $s'$  opposé à  $s$  (ce ressort  $s'$  s'appuyant sur du métal pendant que  $s$  repose sur du bois), traversera la roue  $S$ , et enfin le ressort  $e$ , avec lequel  $y$  communique. Si le courant induit change de sens et sort par  $y$ , c'est que le courant inducteur est interrompu, le ressort  $r$  touchant une dent de bois. Alors le courant suit la route  $eSs$ , le ressort  $s$  s'appuyant sur du métal, parcourt le fil  $M$ , le ressort  $t'$ , la roue  $T$ , et enfin le ressort  $h$ , dans la direction des flèches ponctuées.

**2198. Comparaison des courants induits par leurs divers effets. —**

M. Henry est le premier qui se soit occupé de rechercher les lois des courants d'induction. Il évaluait leurs intensités par la commotion, l'étincelle, les actions chimiques, la déviation de l'aiguille du rhéomètre, ou enfin par l'aimantation d'une aiguille d'acier renfermée dans une hélice faisant partie du circuit induit<sup>1</sup>. Il a d'abord reconnu que les intensités sont soumises à des lois différentes, suivant le mode d'évaluation employé. Par exemple, le courant d'un couple étant lancé d'une manière intermittente dans une spirale, les courants induits dans une autre spirale formée d'un ruban de cuivre de 18<sup>m</sup> de long donnaient des commotions très-faibles, et cependant produisaient des étincelles, décomposaient l'eau et aimantaient une aiguille d'acier. La spirale induite ayant été remplacée par une autre formée d'un fil de 2422<sup>m</sup>, les étincelles furent beaucoup plus faibles, il n'y eut ni aimantation, ni décompositions chimiques, mais les commotions furent tellement fortes que 66 personnes purent les éprouver en même temps. Du reste, il y a un maximum de longueur du fil induit, d'autant plus élevé que ce fil est plus gros, au-delà duquel les secousses vont en s'affaiblissant.

Pour expliquer les différences d'intensité dans les divers effets, remarquons que l'action inductrice totale, ou la quantité d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit, reste la même, comme nous allons le voir, pour des variations égales de distance ou d'intensité du courant inducteur. Si donc la variation se fait plus rapidement, la même quantité  $q$  d'électricité traversera le circuit induit dans un temps plus court  $t$ , et sa tension  $I$  ou la force électromotrice sera plus grande, car on a  $q = It$ . Or, certains effets (étincelle, déviation de l'aiguille, actions chimiques) dépendent de la quantité d'électricité qui passe dans un certain temps très court; tandis que d'autres (aimantation, commotion) dépendent de la tension, et par conséquent de la rapidité du passage.

**2199. Comparaison des inductions produites par un circuit fixe et par un courant mobile. —** Quand on approche peu à peu un courant inducteur, d'un circuit fermé, la somme des courants, induits dans ce dernier par chaque déplacement infiniment petit du courant inducteur, est égale au courant induit qui serait produit, dans la position d'arrivée, par la clôture ou la rupture

<sup>1</sup> Trans. de la Société phil. américaine, t. VI et VIII; et Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> s. t. III.

*du circuit inducteur.* La position initiale de ce dernier est supposée assez éloignée pour qu'il ne produise pas d'action quand on le ferme ou qu'on l'ouvre. Pour établir cette loi, on approche le courant inducteur, assez rapidement pour que l'aiguille du rhéomètre reçoive sans avoir le temps de revenir sur ses pas, les impulsions des courants inducteurs qui naissent successivement, et l'on compare la déviation observée à celle que produit le courant induit produit par la rupture ou la clôture du circuit inducteur dans sa position la plus rapprochée. Voici comment a procédé M. Félici, qui a établi cette loi : il prend deux roues de bois portant une gorge sur leur contour, et une rainure diamétrale sur une des faces. Sur chacune de ces roues est enroulé un fil de cuivre, de manière qu'après avoir été appliqué sur la moitié de la circonférence, il traverse la rainure pour s'enrouler sur l'autre moitié en sens contraire, en formant comme un 8, et il fait ainsi plusieurs tours. Les deux roues semblables A et M sont assemblées sur un même arbre ; l'une, A, porte le circuit inducteur, l'autre, M, le circuit induit, comprenant un rhéomètre. Si les rainures diamétrales de A et M étant perpendiculaires l'une à l'autre, on ferme ou l'on rompt le circuit inducteur A, on n'observe pas de courant dans M, les courants induits dans les deux moitiés de la partie diamétrale, ainsi que dans les deux moitiés de chaque demi-tour, étant de sens contraire. Si, en partant de cette position, on fait tourner la roue M, de 90°, pendant que le courant inducteur est continu, on observe un courant induit en M. Si on la fait encore tourner de 90°, on aura un autre courant induit de sens contraire au premier, et si le mouvement de rotation est continu, on aura une série de courants alternatifs. On pourra, au moyen d'un *rhéotrope* tournant avec la roue M, ne laisser arriver au rhéomètre que les courants d'un même sens ; et, si le mouvement est assez rapide, l'aiguille indiquera la somme des courants produits par chaque déplacement infiniment petit de la roue M, dans l'angle de 90°. On compare cette déviation à celle qui se produit quand on ouvre et qu'on ferme le circuit inducteur A, les rainures diamétrales étant parallèles, et l'on trouve la même déviation.

M. Félici a aussi employé la méthode suivante qui dispense de mesurer les intensités. Il dispose sur le même arbre, une troisième roue, A', de manière que la roue induite M soit entre les deux autres, et il la place à une distance telle, que, les trois rainures diamétrales étant parallèles, il n'y ait pas de courant induit en M quand on introduit ou qu'on supprime un même courant circulant en sens contraire en A et A'. Quand les circuits A et A' sont identiques, M doit en être à des distances égales. Cela fait, et le courant de la pile passant d'une manière continue, on fait tourner la roue M, et l'on remarque qu'il ne s'y produit pas non plus de courant induit.

**2200. La quantité d'électricité induite est la même dans les courants induits inverse et direct.** — *Comparés au moyen du rhéomètre, ces deux courants présentent la même intensité, quand ils sont produits par des changements égaux de distance ou d'intensité du courant inducteur ; ce qui montre qu'ils contiennent des quantités égales d'électricité, circulant pendant un*

temps très-court, mais qui n'est pas nécessairement le même pour tous les deux.

Matteucci a prouvé cette égalité entre les quantités d'électricité, en faisant passer le courant d'une pile, par intermittences, au moyen de la roue R (fig. 1523) dans la bobine B, et faisant passer tous les courants induits à travers un voltamètre à sulfate de cuivre interposé dans le circuit induit *xy*. Il ne se fait aucun dépôt de cuivre, ce qui montre que les courants qui se succèdent dans les deux sens, se neutralisent mutuellement.

M. A. Lallémand a prouvé le même principe au moyen des actions électrodynamiques, et en se servant de sa *balance électrodynamique* (fig. 1524)<sup>1</sup>. Cet instrument consiste en une balance de torsion dans laquelle est suspendu un fil de cuivre contourné en deux spirales *a, b* de sens contraire, de manière à annuler l'action terrestre. Les extrémités de ce fil plongent dans des coupes de mercure *c, c*, par lesquelles on fait arriver le courant induit. On présente à l'une des spirales, *a*, une troisième spirale rhéophore qui agit sur elle, et l'on cherche la torsion qu'il faut donner au fil pour maintenir à une distance constante, les spirales en présence. Si l'on fait passer dans ces spirales la même série de courants induits obtenus au moyen d'un courant inducteur passant par une roue dentée en mouvement, il y a attraction ou répulsion, suivant que les courants sont de même sens ou de sens contraire dans les spirales en présence, dans lesquelles ils sont renversés au même moment. On obtient des résultats semblables quand, au moyen d'un rhéotrope, on ne laisse passer que les courants induits d'un même sens. Si la spirale fixe est parcourue par un courant continu, l'action est nulle quand la spirale mobile reçoit les courants inverses et directs; et, quand ces courants passent isolément, il y a attraction ou répulsion, et l'angle de torsion qui les mesure est le même. — D'autres expériences faites en mesurant directement chaque courant induit isolé, au moyen du rhéomètre à réflexion de Weber (2058), ont conduit au même résultat.

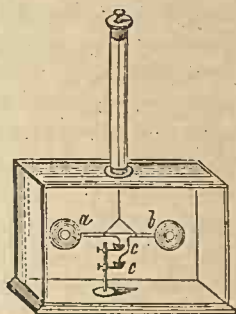


Fig. 1524.

**2201. Comparaison des effets des courants directs et inverses dépendant de la tension.** — Les courants induits inverses et directs produits par l'introduction et la suppression du courant inducteur fixe, aimantent une aiguille d'acier d'une manière très-différente; ce qui tient à ce qu'ils n'ont pas la même durée, ni, par conséquent, la même tension. C'est le courant direct ou par rupture qui l'emporte ordinairement. Aussi, comme l'a reconnu M. Abria, quand on ajoute la résistance d'un fil à la spirale induite, le courant inverse est-il plus affaibli que le courant direct.

Les effets calorifiques des courants directs sont aussi les plus intenses, ce

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXII, p. 432, et 4<sup>e</sup> série, t. II, p. 444.

que l'on voit en lançant le même nombre de courants inverses ou directs, dans un fil de platine enroulé autour de la soudure d'une pince thermo-électrique communiquant avec un rhéomètre (1897). Mais on a reconnu que les courants induits par rupture donnaient des étincelles plus longues que les courants inverses. On peut même faire en sorte que les premiers puissent seuls passer par étincelles, de manière qu'un voltamètre placé dans le circuit induit ne présente de décomposition que dans le sens qui convient aux courants directs. Ces derniers peuvent aussi charger un condensateur, et donner, dans l'œuf électrique, une aigrette de 2 à 3<sup>cm</sup> de longueur<sup>1</sup>.

M. Hipp a constaté, au moyen d'un appareil analogue à celui de M. Guillemin, (2193), que l'induit direct atteint son maximum d'intensité plus promptement que l'inverse, la durée du premier était environ 9 fois plus petite que celle du second et sa tension plus grande, de manière qu'on pouvait transmettre une dépêche à une distance de 1000 kilomètres dans un fil télégraphique, tandis que l'inverse ne pouvait la transmettre qu'à 80 kilomètres<sup>2</sup>.

M. Blaserna a reconnu que le courant induit, pendant sa courte durée, augmente rapidement d'intensité, puis diminue plus lentement en formant une courbe tangente à l'axe des abscisses. L'aire de la courbe est la même pour les courants inverse et direct, ce qui montre que les quantités d'électricité sont les mêmes; mais les ordonnées correspondant au second, sont renfermées dans un espace plus étroit, ce qui montre que sa tension est la plus grande.

M. Henry a trouvé que les *différences* entre les courants directs et inverses dépendent de la tension du courant introduit et supprimé dans le circuit inducteur. Ainsi, avec les deux spirales citées ci-dessus (2198), et un seul couple, l'induit direct donnait une forte commotion, l'inverse n'en donnant qu'une très-faible. Avec 2, 3, 4..... couples, la secousse du courant inverse allait en augmentant, celle du courant direct variant à peine; avec 10 couples, les commotions des deux courants étaient égales; et avec 30, le courant inverse l'emportait notablement sur le courant direct. On arrivait aux mêmes résultats en diminuant la résistance du circuit inducteur, soit en le raccourcissant, soit en augmentant sa section, la partie en hélice restant invariable. Ces résultats se conçoivent facilement; car, la tension augmentant, ou la résistance diminuant dans le circuit *inducteur*, le courant s'y établit plus brusquement et la durée de l'état *variable* est moindre (2042). Ce résultat n'a pas d'influence sur le courant direct, l'électricité existant d'avance dans le circuit inducteur, quand on le rompt.

M. Abria, dans un beau travail sur les lois des courants induits, a employé principalement, pour en mesurer les intensités, l'aimantation d'une aiguille d'acier<sup>3</sup>. Il a d'abord constaté que le courant induit, produit en une seule fois le maximum d'aimantation dont il est capable; car si l'on répète plusieurs fois

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LII, p. 418.

<sup>2</sup> *Annales télégraphiques*, t. III, p. 394.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. III, p. 5.

l'expérience, en ayant soin de retirer l'aiguille de l'hélice pendant le passage des courants inverses, la force de l'aiguille n'augmente pas. Du reste, les courants induits produits par l'arrivée et la rupture du courant inducteur, ont une durée tellement courte que, si l'on introduit l'aiguille d'acier dans l'hélice aussi promptement que possible, après avoir fermé ou rompu le circuit inducteur, elle ne reçoit aucune trace d'aimantation. Les aiguilles avaient 16<sup>mm</sup> de longueur, et 0<sup>mm</sup>,4 à 0<sup>mm</sup>,5 de diamètre, dimensions avec laquelle la force magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant (2127).

Il résulte de ce qui précède qu'il faut avoir grand soin, quand on énonce les lois des courants induits, d'indiquer par quels effets on les a mesurés. Il y a à distinguer : 1<sup>o</sup> ceux qui dépendent de la quantité d'électricité mise en mouvement (effets chimiques et action sur le rhéomètre) ils sont proportionnels à l'intensité du courant induit. 2<sup>o</sup> Ceux qui sont proportionnels au carré de cette intensité (effets calorifiques et électrodynamiques). 3<sup>o</sup> Ceux qui dépendent de la tension, ou de l'intensité maximum (*commotions, étincelles, aimantation*).

**2202. LOIS DES COURANTS INDUITS.** — Ces lois s'appliquent également aux courants inverses et aux courants directs, quand on mesure les intensités par les actions qui dépendent des quantités d'électricité et non des tensions ; elles s'appliquent aussi à l'induction par les aimants, puisqu'ils représentent des systèmes de courants (2177).

**Intensité du courant inducteur.** — *Les intensités des courants induits et inducteurs données par le rhéomètre ou par l'aimantation d'une tige d'acier, sont proportionnelles entre elles.* Cette loi, établie par M. Abria, a été démontrée depuis par M. Félici, sans avoir à mesurer des intensités<sup>1</sup>. Il enroule sur un cylindre de bois, de 25<sup>cm</sup> de diamètre, un fil de cuivre garni de soie ne formant qu'un tour ; c'est l'*anneau induit*, communiquant avec un rhéomètre par des fils tordus ensemble. Ayant fait passer un même courant en sens contraire dans deux *anneaux inducteurs* identiques au premier et placés à égale distance de chaque côté, il n'obtient aucun signe d'induction. Ayant ensuite remplacé l'un des anneaux inducteurs par un faisceau de fils fins de cuivre, courbés en anneau et recouverts de soie, excepté en dehors de la partie circulaire, où ils étaient tordus ensemble de manière que le courant se partageât entre tous, il n'observa encore aucun courant induit dans l'anneau du milieu. Comme les effets produits par les différents fils fins s'ajoutent, on voit que, s'il y en a  $n$  dans lesquels l'intensité du courant de la pile est  $n$  fois plus petite que dans l'anneau d'un seul fil, il faut la réunion de ces  $n$  courants pour produire le même effet. M. Lallemand a constaté la même loi, au moyen de sa balance (2200), en observant les intensités des actions électrodynamiques exercées par un courant continu sur l'un des courants induits.

**2203. Longueur du circuit inducteur.** — 1<sup>o</sup> *L'intensité du courant d'induction mesurée par l'aimantation d'une aiguille, ou par le rhéomètre, croît*

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 64.

proportionnellement au nombre des éléments agissants du courant inducteur, quelle que soit la section de son fil, section dont l'action de chaque élément est indépendante; et cette action est en raison directe de la quantité d'électricité qui traverse l'élément. Pour établir ces lois, M. Abria disposait en spirale, un faisceau de quatre fils garnis de soie, de manière à pouvoir diviser un même courant inducteur entre 1, 2, 3 ou 4 fils, représentant des circuits à section simple, double, triple, quadruple, et il trouvait toujours le même courant induit, quand le courant inducteur était toujours ramené à la même intensité au moyen d'un rhéostat. Sans rhéostat, on trouvait, ce qui revient au même, que le rapport entre les intensités du courant inducteur et du courant induit restait le même. — Si l'on faisait passer le courant inducteur dans des fils réunis bout à bout, de manière à former un circuit ayant successivement les longueurs 1, 2, 3, 4, l'intensité du courant induit était sensiblement proportionnelle au nombre de tours de la spirale inductrice, l'intensité du courant inducteur étant supposée constante.

2° Quand l'induction est produite par plusieurs fils à la fois, l'intensité des courants induits mesurée au rhéomètre est, en général, égale à la somme des courants induits que produirait chacun des fils séparément. Pour établir cette loi, M. Wartman enroulait sur une même bobine, deux fils inducteurs, et un fil induit placé entre les deux autres. — Il résulte de cette loi, 1° que les actions inductrices produites dans un même circuit induit ne s'influencent pas mutuellement, et que chacun des courants inducteurs reste soumis aux lois précédentes; 2° qu'un circuit traversé par un courant, subit l'induction de la même manière que s'il était à l'état naturel.

**2201. Longueur, résistance, etc., du circuit induit.** — 1° *La résistance totale du circuit induit restant constante, l'intensité du courant induit est proportionnelle au produit des parties actives des circuits induit et inducteur, c'est-à-dire de celles qui agissent les unes sur les autres.* — M. Félici, qui a trouvé cette loi, employait deux cylindres égaux en bois, sur chacun desquels étaient enroulés deux fils de cuivre appartenant, l'un au circuit induit, l'autre au circuit inducteur. Le courant d'une même pile parcourait les deux circuits inducteurs, et les deux courants induits circulaient en sens inverse dans les deux fils d'un rhéomètre différentiel. Si  $n$  et  $m$  sont les nombres de tours des fils sur le premier cylindre, et  $n'$ ,  $m$ , ces nombres sur le second, les courants induits se contre-balançaient dans le rhéomètre différentiel, quand on avait  $mn = m'n'$ . Comme l'intensité du courant induit est proportionnelle au nombre de tours du circuit inducteur (2203), on voit que cette intensité est aussi proportionnelle au nombre de tours du circuit induit.

Cette loi montre que chaque élément actif des deux circuits ajoute son action à celle des autres éléments, pour produire l'intensité du courant induit. — M. Abria ayant pris pour spirale induite, la spirale à 4 fils ci-dessus (2203), trouva qu'une aiguille aimantée par le courant induit, prenait une force proportionnelle au nombre des fils communiquant par leurs extrémités avec l'hélice

magnétisante, pourvu que les fils ne communiquant pas avec elle formassent toujours un circuit fermé. Tous les fils recevaient des courants induits sensiblement de même intensité; et les courants des fils qui communiquaient avec l'hélice ajoutaient leurs effets pour aimanter l'aiguille.

2° *L'action inductrice entre deux éléments varie en raison inverse de la simple distance.* — Pour le prouver, M. Félici prend deux anneaux égaux, perpendiculaires à la droite qui joint leurs centres, fait passer le courant inducteur dans un de ces anneaux, et mesure l'intensité du courant induit développé dans l'autre. Il recommence ensuite l'expérience, en mettant les anneaux à une distance  $n$  fois plus grande, et, afin que les distances de tous les éléments deux à deux, changent dans le même rapport  $n$ , il donne aux anneaux des diamètres  $n$  fois plus grands. D'après la première loi, si la distance n'était pas changée, l'intensité du courant induit, avec les anneaux  $n$  fois plus grands, devraient être  $n^2$  fois plus grande; mais l'expérience montre que cette intensité est seulement  $n$  fois plus grande; l'effet est donc seulement  $n$  fois plus petit.

4° Quand la partie induite reste la même, *l'intensité du courant induit varie en raison inverse de la résistance totale du circuit induit.* — Cette intensité est donc proportionnelle à la conductibilité et à la section du fil induit, et en raison inverse de sa longueur totale (2062). — Comme l'intensité du courant induit est proportionnelle à la longueur de la partie induite (1<sup>re</sup> loi), cette intensité sera indépendante de la longueur du circuit induit quand l'induction s'exercera sur toute la longueur. — On voit aussi que le diamètre du fil induit n'aura aucune influence, si sa résistance totale reste constante.

2205. M. Gaugain, qui a vérifié les lois précédentes, est arrivé à l'énoncé qui suit<sup>1</sup> : *L'intensité d'un courant induit est en raison directe de la somme des forces électromotrices mises en jeu, et en raison inverse de la somme des résistances du circuit.* La loi d'Ohm s'applique donc aux courants induits, et l'intensité d'un de ces courants sera  $i = E : R$ , en représentant par  $R$  la résistance du circuit induit et par  $E$  la somme des actions inductrices élémentaires.

Quand on connaît  $R$  et  $i$ , on peut évaluer  $E$  en fonction de l'intensité  $I$  du courant inducteur et du temps  $t$  pendant lequel a lieu l'induction; car la quantité d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit est  $q = it$  (2198) : elle est proportionnelle à l'intensité  $I$  du courant inducteur, et à la longueur et par conséquent à la résistance  $R$  de la partie induite. On a donc aussi  $q = CIR$ ,  $C$  étant une constante qui dépend de la distance à laquelle s'exerce l'induction.

On a donc  $q = it = CIR$ , d'où  $i = \frac{CIR}{t}$ , et par suite  $E = iR = C \frac{IR^2}{t}$ ; formule qui montre que : 1° *la force électromotrice d'induction est proportionnelle au carré de la résistance du circuit induit.* Un circuit dont la partie induite présente une grande résistance peut donc être comparé à une pile à grand nombre de couples, la partie non induite représentant le fil conjonctif. — 2° La

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXIX, pp. 909 et 1023.

valeur de  $E$  est en raison inverse de la durée de l'induction, ce qui nous explique les différences d'effets du courant inverse et du courant direct.

**2206. Formule de la force d'induction.** — M. Félici a d'abord démontré qu'on peut, sans modifier les effets, substituer à un courant inducteur un courant sinueux qui s'en éloigne très-peu. Pour le prouver, M. Félici plaça un anneau induit à égale distance de deux anneaux inducteurs parallèles, dont un était formé de petites sinuosités, et fit passer le courant d'une même pile par intermittences et en sens contraire dans les deux anneaux inducteurs. Il n'y eut aucun courant induit dans l'anneau du milieu. — Ce principe s'applique également au circuit induit.

Il résulte de là que l'action inductrice d'un élément de courant  $ds$  sur un élément induit  $ds'$  est proportionnelle à  $ds \cdot ds' \cdot \cos \alpha \cos \alpha'$ , en représentant par  $\alpha$  et  $\alpha'$  les angles que font les deux éléments, avec la droite qui joint leurs milieux. Nous avons vu, en outre (2204), que la force d'induction varie en raison inverse de la simple distance. La force électromotrice élémentaire  $e$  sera donc

$$[1] \quad e = k \frac{ds \cdot ds'}{r} \cos \alpha \cos \alpha'.$$

Dans cette formule, due à M. Félici, la constante  $k$  dépend de l'intensité du courant inducteur et de la résistance du circuit induit.

**2207. Influence de la disposition en spirale.** — Les deux fils induit et inducteur entourés de soie, étant juxtaposés, les courants induits sont généralement plus intenses quand ces fils sont disposés en spirale, au lieu d'être en ligne droite. Par exemple, M. Gaugain<sup>1</sup>, ayant enroulé le double fil de diverses manières, a trouvé les intensités suivantes, au courant induit :

		Déviation du rhéomètre.	
Le même double fil formant :	}	1° Une seule circonvolution.....	3°,50
		2° Deux circonvolutions superposées.....	6,17
		3° Un toron circulaire de 4 tours.....	10,66
		4° Un toron de 15 tours de 0 <sup>m</sup> ,27 de diamètre..	28,55
		5° Un toron de 30 tours de 0 <sup>m</sup> ,14 de diamètre..	29,87
		6° Une hélice de 80 tours de 0 <sup>m</sup> ,05 de diamètre.	28,86

On voit que, pour les diamètres suffisamment grands, l'intensité est à peu près proportionnelle au nombre de tours, chacun de ceux du circuit inducteur agissant à peu près également sur tous ceux du circuit induit. Mais, pour les petits diamètres, l'intensité des courants induits finit par diminuer quand le nombre de tours augmente.

**2208. Influence des lames et des spirales interposées.** — M. Henry a reconnu qu'une plaque métallique  $n$  (fig. 1525) interposée entre une spirale inductrice,  $a$ , et une spirale induite,  $b$ , rend presque insensibles les commotions produites par la première, et les amortit d'autant mieux que la plaque est plus

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXIX, p. 1023.



épaisse, et la distance des deux spirales plus grande. L'affaiblissement est dû à un courant induit qui s'y développe et y circule dans le même sens que le courant induit *a*. Le courant de la plaque agit sur le circuit *a*, les courants induits produisant eux-mêmes l'induction comme nous le verrons (2210), et tend à y engendrer un courant inverse, de sens contraire à celui que produit la spirale *b*. En effet, une spirale mise à la place de la plaque, agit comme elle, quand ses bouts sont réunis, et ne produit pas d'effet, quand ils sont séparés. De plus, si l'on fend la plaque placée en *n*, elle n'affaiblit plus le courant induit. Il en est de même de deux disques fendus superposés, même quand les fentes ne se correspondent pas. Enfin, si l'on soude aux bords de la fente, un fil métallique *f, f'*, s'enroulant autour d'une aiguille d'acier, celle-ci est aimantée de manière à indiquer un courant de même sens que le courant induit en *a*. Quand la plaque est placée au-dessus de la spirale induite *a*, au lieu d'être entre *a* et *b*, son influence se fait encore sentir, mais d'une manière moins prononcée.

Une plaque non conductrice ne produit aucun effet.

Ces résultats nous donnent l'explication de l'effet des conducteurs interposés, sur l'aimantation par la décharge (2126).

M. Abria a aussi fait, sur l'influence des spirales interposées, des expériences qui l'ont conduit à admettre que l'induction ne se fait sentir qu'après un temps qui dépend de la distance du conducteur induit<sup>1</sup>. Trois spirales A, B, C sont superposées et maintenues à des distances égales, B étant entre les deux autres. L'intensité du courant induit, dans une quelconque des spirales, par l'une quelconque des deux autres (intensité mesurée par l'aimantation d'une aiguille d'acier), est à très-peu près la même quand celle qui ne sert pas est ouverte, les différences de distance étant insensibles. Si cette dernière spirale est fermée, il y a un affaiblissement du courant induit, comme nous venons de le voir. Quand c'est la spirale du milieu, B, qui reçoit le courant inducteur, l'affaiblissement est sensiblement le même dans A et C; mais si c'est la spirale A qui sert d'inducteur, le courant induit en C est beaucoup plus affaibli que celui de B. M. Abria explique cette différence, en admettant que l'action de A ne se transmet à C qu'après s'être fait sentir sur B. C reçoit donc simultanément les actions contraires du courant inducteur de A et du courant induit de B. Mais la spirale B ne reçoit l'action contraire du courant affaibli de C, qu'après un temps double de celui qui a été nécessaire pour que l'action se transmette de B à C. Le courant induit par A dans B, a donc eu le temps d'aimanter l'aiguille, avant d'être affaibli par l'action de C. — M. Abria a retrouvé ces mêmes résultats en évaluant l'intensité des courants induits, par la commotion, les effets calorifiques et les effets chimiques; mais le rhéomètre en donnait de tout différents.

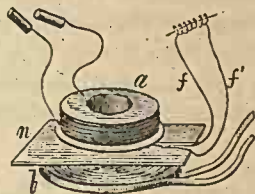


Fig. 1528.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. I, p. 385.

III. Induction par les courants instantanés. — Courants induits de différents ordres.

**2209.** Les courants induits produits par la clôture et la rupture d'un courant inducteur étant de sens contraire, on doit se demander ce qui aurait lieu si le courant inducteur cessait immédiatement après avoir commencé, c'est-à-dire s'il était instantané. Les premières expériences à ce sujet ont été faites par M. Henry, d'abord en prenant pour courants inducteurs des courants induits de durée insensible, ensuite au moyen de la décharge de la bouteille de Leyde. Nous allons considérer d'abord le premier cas.

**2210. Courants induits de différents ordres.** — M. Henry<sup>1</sup> disposa un certain nombre de spirales de la manière suivante : la spirale *a* (fig. 1526) reçoit le courant inducteur, venant d'une pile. Ce courant est appelé du *premier ordre*. Tout près de la spirale *a* s'en trouve une autre, *b*, dans laquelle le courant inducteur, au moment où il est lancé ou supprimé en *a*, développe un courant induit nommé *courant du second ordre*, ou *courant induit*

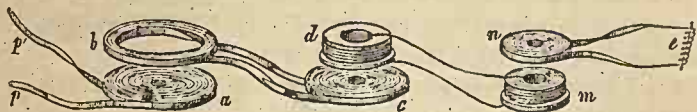


Fig. 1526.

*primaire*, et qui est soumis aux lois que nous avons examinées. Ce courant induit *instantané*, parcourt la spirale *c*, et développe, dans l'hélice *d*, un autre courant induit, dit *courant du troisième ordre*,<sup>2</sup> ou *induit secondaire*. Celui-ci parcourant à son tour l'hélice *m*, agit sur la spirale *n* et y développe un *courant du quatrième ordre*, ou *induit tertiaire*; et ainsi de suite. L'aimantation d'une aiguille d'acier dans une hélice *e*, permet d'étudier le sens et l'intensité des courants induits des divers ordres; mais ces courants, à partir de l'induit secondaire, ne dévient pas l'aiguille du rhéomètre, et ne produisent pas d'actions chimiques. M. A. Lallemand a constaté avec sa balance électrodynamique (2200) que deux spirales traversées par le courant du troisième ordre agissent vivement l'une sur l'autre.

M. Henry a reconnu que *les courants induits par des courants induits, produisent l'aimantation d'une aiguille d'acier, comme s'ils étaient de sens contraire à ces derniers*. Par exemple, le courant induit primaire excité en *bc*, par la fermeture de l'inducteur *pp'a*, étant *négalif*, l'induit secondaire en *dm* agit comme s'il était *positif*, l'induit tertiaire en *ne*, comme s'il était *négalif*, et ainsi de suite.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. III, p. 394.

M. Abria a vérifié cette loi jusqu'au courant de 7<sup>e</sup> ordre<sup>1</sup>; au delà, le courant induit ne produisait plus d'effet. Il a reconnu, en outre, que, toutes circonstances égales d'ailleurs, le rapport entre les intensités de deux induits consécutifs, mesurées par l'aimantation, reste sensiblement constant. Pour que les deux spirales comparées fussent toujours dans les mêmes conditions, il opérait sur les deux dernières d'une série disposée comme dans la figure 1526, en faisant passer le courant de la pile successivement dans le premier, le second... des circuits précédant les deux derniers.

**2211. Explication des induits de différents ordres.** — M. Henry, après avoir constaté l'action presque insensible sur le rhéomètre, des courants induits d'ordre supérieur à l'induit primaire, qui cependant produisent des commotions énergiques et aimantent fortement des aiguilles d'acier, a montré que l'induit secondaire est formé de deux courants se suivant de très près, l'un inverse, quand le courant induit primaire commence, l'autre direct, quand il cesse presque aussitôt. Ces deux courants étant égaux en quantité (2200), leurs effets sur le rhéomètre se neutralisent; mais comme leurs tensions sont différentes, une aiguille d'acier est aimantée dans le sens du plus intense, qui est ici le courant inverse, contrairement à ce qui a lieu pour les courants induits primaires. Quant aux effets physiologiques, ils sont d'autant plus énergiques, qu'il y a là deux courants de sens contraire se suivant très-rapidement.

M. Abria a confirmé cette théorie, par des expériences faites avec le rhéomètre. Il fit d'abord communiquer cet instrument avec une spirale soumise à l'induction d'un courant rendu intermittent par une roue dentée; il vit que l'aiguille aimantée, sous l'influence des courants induits primaires alternativement de sens contraire, était dans un état d'équilibre instable, et déviée d'une même quantité, d'un côté ou de l'autre indifféremment. Si les deux courants successifs avaient à vaincre une résistance, comme celle d'un rhéotrope, ou à franchir une lacune en donnant une étincelle, le courant direct qui possède la plus grande tension l'emportait toujours. Or, M. Abria ayant employé une troisième spirale, induite par une suite de courants induits primaires, directs ou inverses, observa les mêmes phénomènes; ce qui montre que le courant induit secondaire est aussi formé de deux courants successifs de sens contraire. Avec le courant tertiaire, les résultats sont peu constants; ce courant étant formé de quatre courants successifs: deux, produits par le courant secondaire inverse commençant et cessant, les deux autres par le courant direct qui le suit. Il est à remarquer que les deux courants moyens sont de même sens, et peuvent être considérés comme n'en formant qu'un seul.

Verdet démontre l'existence des deux courants dans l'induit secondaire, en le faisant passer à travers un voltamètre<sup>2</sup>; il trouve à chacune des électrodes, des mélanges d'oxygène et d'hydrogène en volumes inégaux et variables, que les

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. III, p. 59.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXIX, p. 501.

courants secondaires soient produits par les induits primaires directs ou inverses isolément, ou par les deux réunis mais ramenés au même sens au moyen d'un rhéotrope. Avec l'appareil employé, il fallait de 20 à 30 mille interruptions du courant de la pile, pour obtenir deux centimètres cubes de gaz, à cause de la recombinaison partielle aux électrodes. Un barreau de fer doux ayant été introduit dans la bobine de l'induit secondaire, il n'en fallut plus que 2 à 3 mille. — Masson a confirmé ces résultats, et, en employant des fils de platine très-fins, il a obtenu des mélanges explosifs purs; ce qui montre une fois de plus que les quantités d'électricité sont égales dans les courants direct et inverse. Enfin, Matteucci, en constatant que les induits *secondaires* ne produisent aucune décomposition dans une solution de sulfate de cuivre, a apporté une nouvelle preuve de l'existence des deux courants dans l'induit secondaire.

**2212. INDUCTION PAR LA DÉCHARGE.** — Aimé paraît avoir le premier obtenu l'induction électrodynamique au moyen de la décharge d'une bouteille de Leyde. Ayant collé sur les deux faces d'une lame de verre, des bandes d'étain opposées, il vit des étincelles à toutes les solutions de continuité d'une de ces bandes, formant un circuit fermé, quand il déchargeait une bouteille de Leyde à travers la bande opposée. M. Henry, après avoir opéré au moyen de courants induits, eut l'idée d'essayer les effets de la décharge<sup>1</sup>. Il enveloppa un cylindre de verre, de deux hélices, l'une en dehors, l'autre en dedans, fit passer la décharge d'une bouteille à travers l'hélice extérieure, et obtint dans l'hélice intérieure, une *décharge induite* dont il reconnut la présence, soit par l'aimantation d'une aiguille d'acier, soit par l'étincelle, soit enfin par la commotion. Deux spirales plates superposées et séparées par une lame de verre, lui donnèrent des résultats semblables. Ce qu'il y a de singulier, c'est que la commotion peut être à peine sensible avec une forte décharge, et très-prononcée avec une faible.

La décharge induite peut être produite à une distance surprenante : M. Henry a pu, au moyen d'une simple étincelle de 3<sup>cm</sup>, lancée d'une machine électrique, sur l'extrémité d'un circuit placé dans une chambre, obtenir dans un autre circuit placé dans une cave, à 10<sup>m</sup> de distance, un courant induit capable d'aimanter une aiguille d'acier. — C'est au courant induit réagissant sur le fil dans lequel passe une décharge, qu'il faut attribuer l'affaiblissement de celle-ci par un fil voisin de celui qui sert à la produire (1713).

L'induction par la décharge était aussi découverte, vers la même époque, par Masson, Riess, Matteucci, et Marianini qui appelle courants *leyd-électriques* les courants qui ont cette origine. La figure 1527 représente un appareil imaginé par ce dernier physicien, au moyen duquel les expériences se font avec facilité. Deux plateaux de verre A et B, pouvant être plus ou moins rapprochés l'un de l'autre, portent sur leur face intérieure une spirale formée d'un fil de cuivre garni de soie et enduit de gomme laque. Les extrémités de chaque spirale aboutissent, l'une au centre, l'autre près du bord de chaque disque. On décharge

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. III, p. 403.

la bouteille en  $aa'$  à travers l'une des spirales, pendant que les extrémités du fil  $f, f'$  de la spirale opposée communiquent avec les appareils que doit traverser le courant induit.

**2213. Du sens de la décharge induite.** — La décharge induite se compose de deux courants instantanés : l'un *inverse*, quand la décharge inductive agit; l'autre *direct*, quand elle cesse. Celui de ces courants qui dure le moins est le plus fort, et détermine le sens de la décharge induite.

M. Henry, ayant produit par décharge, des induits de différents ordres, au moyen d'hélices fixées à l'extérieur et à l'intérieur de tubes de verre, les trouva tous de même sens. Avec des spirales planes, les courants induits furent alternativement dans les deux sens, comme avec les courants voltaïques. Marianini<sup>1</sup> a trouvé l'explication de ces anomalies. Il a reconnu, au moyen de son *rhé-électromètre* (2059), que les causes qui ralentissent la décharge tendent à produire un induit inverse, tandis que ce courant est direct quand le circuit inducteur n'offre que peu de résistance, ou que la tension est assez forte pour la vaincre facilement. Ainsi, une grande jarre qui, *fortement chargée*, produit un induit de *même sens* que le courant qu'elle fournit, en produit un de sens contraire quand elle est faiblement chargée, ou que le circuit inducteur est très-résistant. Une petite bouteille, quoique fortement chargée, produit aussi un induit inverse. Ces résultats semblent dépendre de ce que le courant leyd-électrique, s'introduisant brusquement, développe un induit

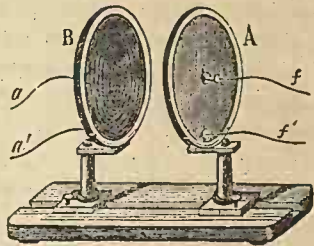


Fig. 4527.

inverse intense, tandis que, cessant graduellement quand il y a résistance, l'induit direct dure davantage, et, par suite, possède une plus faible tension.

Matteucci, après avoir constaté, au moyen du rhéomètre, que l'*intensité* de la décharge induite augmente avec la tension et avec la surface armée de la batterie, a trouvé que le sens du courant induit dépend aussi de la disposition des circuits inducteur et induit, qui peuvent être continus, ou donner une étincelle<sup>2</sup>. Le courant du circuit induit continu était observé au rhéomètre, qui ne donnait que des résultats incertains quand il y avait interruption. On faisait alors jaillir une étincelle de 2<sup>mm</sup> à travers un morceau de papier ajusté au perce-carte. Le sens du courant était indiqué par la position du trou, qui est toujours près de la pointe négative (1716). Matteucci a trouvé ainsi que, lorsque les circuits sont tous les deux fermés en même temps, ou donnent tous les deux une étincelle, le courant induit est inverse du courant inducteur. Mais, si l'un des circuits est ouvert et l'autre fermé, l'induit est de même sens que l'inducteur.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 498.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. IV, p. 453.

Le courant leyde-électrique étant nécessairement ouvert au point où part l'étincelle, Matteucci, pour se procurer un courant inducteur dans un circuit fermé, a eu recours aux courants de différents ordres, au moyen de spirales échelonnées. La figure 1528 indique, comme exemple, le sens des courants induits dans diverses hélices présentant ou ne présentant pas de solution de continuité. Dans les couples de circuits *a*, *b*, et *c*, *d*, qui sont dans le même cas, les courants inducteur et induit sont de sens contraire; dans les circuits *b* et *c*, dont un seulement présente une solution de continuité, ils sont de même sens. Une simple bouteille de Leyde suffit pour avoir des étincelles de 2<sup>mm</sup> de longueur dans une série de 4 spirales.

M. Riess a cherché le sens de l'induit par décharge, au moyen d'un condensateur, des plateaux duquel il approchait les extrémités du fil induit. Mais les difficultés de cette méthode lui ont fait préférer la suivante<sup>1</sup> : on place entre les extrémités terminées en pointe du fil induit, un plateau de métal dont les faces sont vernies avec de la poix-résine. Les électricités qui arrivent par les pointes

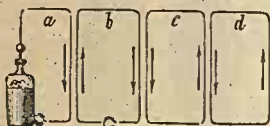


Fig. 1528.

se répandent sur la couche résineuse, et l'on en reconnaît la nature en projetant sur chaque face un mélange de soufre et de minium; les deux poudres se séparent et prennent un aspect différent sur les deux faces, comme dans l'expérience de Lichtenberg (1643). La distance des pointes et des fils induit et inducteur, leur conductibilité, l'intensité de la décharge ne changent rien à la position relative des figures. M. Knochenhauer évaluait l'intensité du courant induit par l'échauffement du fil de platine d'un thermomètre électrique (1708), et il jugeait de la direction du courant induit, en faisant passer un courant continu dans le même fil, admettant que l'induit est de même sens que ce dernier quand il augmente l'échauffement, et de sens contraire quand il le diminue, ce qui est contestable d'après les expériences de Matteucci. Ces diverses méthodes sont incertaines et sujettes à objections. La plus sûre est celle qu'il nous reste à décrire.

**2214. Sens de la décharge induite déterminé par la polarisation des électrodes.** — M. Henrici ayant reconnu qu'une décharge à travers un liquide polarise les électrodes de platine, Verdet a cherché le sens de la décharge induite, en la faisant passer dans un liquide, par l'intermédiaire de lames d'or ou de platine, qui sont polarisées par l'électrolyse du liquide, et donnent ensuite un courant de sens contraire à celui qui les a polarisées. Verdet se servait de spirales verticales comme celles de l'appareil de la figure 1527. Les spirales induites étaient formées de 24 tours d'un fil de 0<sup>mm</sup>,5 de diamètre et de 28<sup>m</sup> de longueur, et les spirales inductrices, de 25 tours d'un fil de 1<sup>mm</sup> et de 48<sup>m</sup> de longueur. La batterie, de 9 jarres, se déchargeait d'elle-même sur un électromètre de Lane (1670).

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de phys., 2<sup>e</sup> série, t. LXXIV, p. 158, et 3<sup>e</sup> série, t. XXVI, p. 378.

Verdet a reconnu que : 1° quand la spirale induite ne présente pas de solution de continuité, le courant induit est de même sens que l'inducteur, comme l'avait trouvé Matteucci. Seulement, pour obtenir des traces de polarisation suffisantes, il faut les plus fortes décharges, pendant qu'avec les faibles décharges le courant induit, exploré par l'aimantation ou la commotion, présente une grande intensité. *Les deux courants qui se succèdent dans le circuit induit non interrompu correspondent donc, comme pour les courants voltaïques, à des quantités égales d'électricité.* — 2° Si le circuit induit est interrompu en quelque point, la polarisation est, en général, assez forte, et le sens de l'induit dépend de la grandeur de l'interruption et de la forme des conducteurs au point de séparation. Si l'étincelle d'induction part entre la pointe d'une vis micrométrique verticale et une surface de mercure, le courant induit *direct* l'emporte sur l'*inverse*, quand le premier va de la pointe au mercure, quelle que soit sa distance à ce liquide, distance avec laquelle l'intensité du courant induit croît rapidement. Mais, quand le courant *direct* marche vers la pointe, ce n'est qu'à partir d'une certaine distance qu'il l'emporte sur l'autre et que la décharge induite est de même sens que l'inducteur et augmente d'intensité avec la distance; au-dessous, le sens de la décharge induite varie irrégulièrement, ainsi que son intensité. — 3° S'il y a dans le circuit induit deux interruptions et deux vis, par une desquelles arrive toujours le courant *direct*, les résultats sont, pour toute distance, ceux du cas où le courant direct arrive par la pointe. La distance des spirales, leur conductibilité, la charge de la batterie et le sens de la décharge, n'ont pas d'influence sur ces phénomènes.

Verdet conclut de là que l'interruption affaiblit l'induit inverse plus que le direct, ce qui explique, non-seulement le sens de la polarisation, mais encore ses variations; car, le courant inverse n'ayant pas la même intensité pendant toute sa durée, une partie seulement est arrêtée, d'autant plus grande que l'espace à franchir est plus considérable. Tout obstacle qui affaiblit l'effet total d'induction tend donc à faire prédominer l'induit direct. Quant à l'influence de l'espèce d'électricité qui arrive par la pointe quand il n'y a qu'une interruption, elle provient de ce qu'un courant passe plus facilement d'une pointe à une surface métallique que dans le sens opposé (1948), et Verdet a constaté directement que la distance maximum que franchit la décharge induite est la plus grande quand le courant direct qui en fait partie arrive par la pointe.

Verdet est arrivé aux mêmes conclusions en étudiant la décharge induite secondaire produite par l'induite primaire, et qu'il considère comme formée de quatre courants, dont les deux moyens sont de même sens, et qui sont sensiblement égaux, de manière à ne pas produire d'effet quand le circuit ne présente pas de résistance. Mais une résistance fait prédominer certains courants, le plus souvent les directs, ce qui dépend aussi de plusieurs circonstances, comme la forme des extrémités du conducteur interrompu, la distance, l'intensité de la

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXIV, p. 377.

décharge. On peut rapprocher ces phénomènes de ceux que nous avons signalés antérieurement en parlant de l'écoulement différent des deux électricités par les pointes (1692). Il semble aussi, d'après les expériences de Marianini (2213), que si, au lieu d'obstacles à franchir, le circuit présente seulement une plus grande résistance tout en restant continu, c'est le courant inverse qui doit prédominer.

M. Buff a répété les expériences de Verdet et est arrivé aux mêmes résultats<sup>1</sup>. Il a pu aussi renverser le sens du courant induit, en réunissant les lames de platine par un fil de dérivation, présentant une petite interruption terminée par des boules entre lesquelles la décharge induite passait en partie, avec étincelle. Si l'on rapprochait peu à peu ces boules, la polarisation diminuait, disparaissait, puis reprenait sa direction primitive. Il y avait donc bien deux décharges induites : d'abord, la décharge directe était la plus intense et franchissait le plus facilement l'interruption du circuit ; mais, si l'on établissait le fil de dérivation, le courant direct passait aussi plus facilement entre les boules, et le courant inverse prédominait dans un voltamètre ou dans un rhéomètre.

**2215. Expériences de Masson**<sup>2</sup>. — Ces expériences, destinées principalement à prouver l'égalité des quantités d'électricité dans les courants, direct et inverse, de la décharge induite, ont été faites avec des spirales disposées comme celles de la figure 1527. L'aiguille d'un rhéomètre introduit dans le circuit induit n'était pas déviée ; mais s'il y avait une interruption, elle l'était, et les gaz étaient séparés dans un voltamètre, de manière à indiquer la prépondérance du courant *direct*. On peut aussi arrêter le courant le plus faible, au moyen de l'œuf électrique, en y raréfiant convenablement l'air. On reconnaît, aux auréoles qui entourent les boules, si les deux courants passent à la fois, ou si l'un d'eux est intercepté. — Des expériences semblables faites sur les courants induits *secondaire* et *tertiaire* ont donné les mêmes résultats : seulement, quand il y avait interruption, c'était le courant inverse qui l'emportait.

**2216. Influence des lames interposées, sur la décharge induite.** — Cette influence s'exerce de la même manière que pour l'induction par les courants voltaïques, et elle est due à la même cause. Matteucci et Masson ont reproduit à ce sujet les expériences de M. Henry. Le premier a aussi opéré avec un appareil, qu'il nomme *inductionomètre différentiel*, composé de deux spirales *induites* identiques, placées parallèlement, à une même distance de part et d'autre d'une spirale *inductrice*. Les fils des spirales induites s'enroulent en sens contraire autour d'une aiguille d'acier, de manière que les courants induits s'y neutralisent s'ils sont égaux. Une lame métallique placée près de l'une des spirales fait que le courant de l'autre devient prépondérant. Des lames de verre, soufre, résine, n'altèrent pas l'égalité.

**2217. INFLUENCE DES MÉTAUX DANS L'INTÉRIEUR DES BOBINES.** — Dove a fait

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIX, p. 502.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LII, p. 418.



un grand nombre d'expériences pour reconnaître l'influence de masses métalliques, magnétiques ou non, introduites dans l'intérieur de la bobine autour de laquelle sont enroulés les fils induit et inducteur<sup>1</sup>. Il nomme *inducteur différentiel* l'appareil dont il a fait surtout usage dans ces expériences.

**Inducteur différentiel.** — H et H' (fig. 1529) sont les hélices induites, parfaitement identiques, et dont les spires enroulées sur des tubes de carton, sont isolées au moyen de gomme laque. Le fil passe de l'une à l'autre en *n*, et ses extrémités libres sont en *f*, *f'*, où l'on place les appareils destinés à éprouver les effets de la décharge induite. Deux autres hélices *h*, *h'*, formées d'un gros fil de cuivre faisant 80 tours sur deux tubes de 33<sup>cm</sup> de longueur et de 2<sup>cm</sup>,5 de diamètre, sont introduites dans l'intérieur des premières; elles communiquent entre elles par le fil *m*, et sont destinées à recevoir la décharge inductrice de la batterie, avec laquelle on les met en relation par les boutons *c* et *a*. Les hélices induites H, H' sont réunies de manière que les courants induits qui s'y développent marchent en sens contraire, et se neutralisent s'ils sont égaux. Si l'introduction de masses métalliques dans le tube de verre de l'une d'elles y modifie l'induction, l'équilibre n'a plus lieu, et l'on obtient des effets plus ou moins intenses, en *f* et *f'* — Dove a fait avec cet appareil, ou avec des spirales planes disposées d'une manière analogue, de nombreuses expériences sur les courants induits par les *courants voltaïques et thermo-électriques*, et a comparé l'influence que les métaux introduits exercent sur ces sortes de courants induits, à celle qu'ils exercent sur la *décharge induite*.

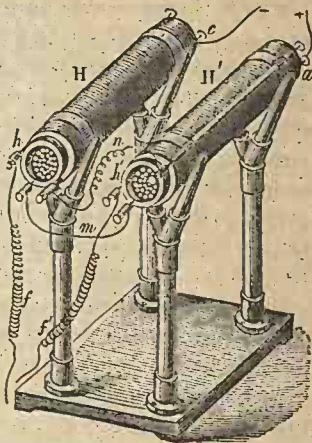


Fig. 1529.

**2218. Influence des métaux non magnétiques, sur les effets physiologiques.** — La décharge induite ne donne pas de commotion quand les hélices sont vides; mais si l'on introduit un barreau d'un métal non magnétique dans l'une d'elles, on obtient une commotion en *f*, *f'*. Or, les figures sur la résine (2213) montrent que le sens du courant dominant est celui qui correspond à l'hélice vide; le barreau introduit *diminue* donc les effets physiologiques de l'induction, et l'on remarque que les métaux les meilleurs conducteurs sont, pour cela, les plus efficaces.

Une hélice de cuivre introduite à la place du barreau, ne produit aucun effet, si ses extrémités sont séparées; mais si elles sont réunies, elle agit comme un barreau de cuivre. Si l'hélice est formée de deux hélices inverses superposées,

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de phys., 3<sup>e</sup> série, t. IV, p. 336, et Arc. de l'élect., t. II, p. 290.

elle n'agit plus, même quand ses extrémités sont réunies. Ces résultats s'expliquent facilement : l'hélice simple et fermée est parcourue par un courant induit agissant sur l'hélice extérieure II de manière à neutraliser en partie l'effet de la décharge *inductive* ; et quand il y a deux hélices inverses, les actions des courants opposés qui les parcourent s'entre-détruisent. Les masses métalliques agissent aussi par les courants induits qui y circulent, et des solutions de continuité dans le sens de leur longueur atténuent beaucoup leur effet. Par exemple, un faisceau de fils métalliques isolés ; ou un tube fendu suivant une arête, ne produisent plus que très-peu d'effet. — Dans le cas des courants induits par les *courants voltaïques*, les masses de substances non magnétiques n'exercent pas d'influence.

**2219. Corps magnétiques.** — Des barreaux de fer, d'acier trempé ou non, de fonte grise ou blanche, *diminuent* aussi l'effet physiologique de la décharge induite, dans l'hélice qui les renferme ; la commotion se produit, et le sens du courant est celui qui correspond à l'hélice vide. Des faisceaux de lames d'acier ou de fer-blanc isolées ou non, agissent de la même manière, mais moins fortement. Il suffit même d'une différence de nature dans deux barreaux de fer égaux, pour que leurs effets soient inégaux et que l'un des courants induits prédomine. Un barreau de nickel agit aussi, mais faiblement ; et le courant a le sens qui correspond à l'hélice qui le renferme ; le nickel *augmente* donc un peu l'induction, contrairement au fer.

Quand l'induction est produite par un *courant voltaïque*, l'intensité du courant induit est toujours *augmentée* par la présence d'un barreau de fer, à cause du magnétisme qui s'y développe. Avec les corps magnétiques, il se produit, comme le remarque Dove, deux phénomènes distincts : 1<sup>o</sup> le développement du magnétisme dans le barreau, qui, ajoutant son effet au courant inducteur, augmente le courant induit ; 2<sup>o</sup> le développement, dans ce barreau, de courants induits, qui agissent pour affaiblir le courant de l'hélice induite, comme le font les métaux non magnétiques. Ce dernier effet l'emporte sur le premier, dans le cas de la décharge, le magnétisme n'ayant pas le temps de se développer pendant sa durée excessivement courte, et les induits directs qui se développent dans le fer au moment où elle cesse, l'emportant sur l'effet contraire dû au retour du barreau à l'état neutre magnétique.

**2220. Effets des faisceaux de fil de fer.** — Si, comme l'a fait Dove, on remplace le barreau de fer par des fils de fer isolés les uns des autres, à travers lesquels il ne peut s'établir de courants, l'induit dans l'hélice qui contient le faisceau, l'emporte sur celui de l'hélice vide. Quand les fils sont un peu gros, chacun d'eux agissant comme un petit cylindre, on conçoit qu'il y en aura qui ne produiront aucun effet, leur action magnétique étant contre-balancée par celles que produiront les faibles courants induits qui pourront s'y développer ; ce qui est confirmé à l'expérience.

Si le faisceau de fils fins est enveloppé d'un tube de cuivre, ou d'une hélice simple à bouts réunis, il agit comme un barreau massif ; et la décharge induite

reprend le sens qui appartient à l'hélice vide. Si le tube de cuivre est fendu suivant une arête, ou l'hélice simple interrompue, ou enfin si elle est formée de deux parties superposées de sens inverse, le faisceau de fils de fer agit comme s'il n'était pas enveloppé. Son effet est à peine diminué, si l'hélice simple à bouts réunis est en argentan, dont la conductibilité est très-faible.

Dans le cas des *courants voltaïques*, les solutions de continuité longitudinales dans les masses magnétiques exaltent singulièrement l'accroissement qu'elles produisent dans les effets physiologiques des courants induits. Aussi, l'inducteur différentiel donne-t-il de violentes secousses quand, l'une des hélices renfermant un barreau de fer, l'autre contient un faisceau de fils de fer, même d'un moindre poids. Les enveloppes de cuivre ou de fils de cuivre en hélice, agissent de la même manière que pour les courants par la décharge.

Les propriétés des fils de fer donnent le moyen de comparer les effets des divers métaux; on les introduit dans l'un des tubes de l'inducteur différentiel, et l'on cherche à neutraliser leur influence par des brins égaux de fil de fer introduits dans l'autre tube dont le nombre est d'autant plus grand que le métal agit davantage. On reconnaît aussi quand un métal augmente ou diminue le courant induit. Si des fils de fer dans le tube opposé peuvent rétablir l'équilibre, c'est que le métal augmentait le courant induit; si, au contraire, les fils de fer accroissent l'effet, c'est que le courant était diminué, et l'on peut alors rétablir l'équilibre, en remplaçant les fils de fer par des fils de cuivre.

**2221. Action des métaux intérieurs, sur les effets non physiologiques.** — Nous n'avons considéré jusqu'à présent que les effets physiologiques. Les effets de la décharge induite suivent la même marche dans l'aimantation des aiguilles d'acier; mais ils sont tout différents quant à l'action sur le rhéomètre, et aux effets chimiques et calorifiques. Si l'on introduit un barreau magnétique ou non, dans l'une des hélices de l'inducteur différentiel, la décharge ne produit aucun effet sur le rhéomètre, ni sur l'aimantation du fer doux, ni sur les actions chimiques; tandis que la commotion, le condensateur, les effets calorifiques dans un thermomètre électrique (1708), les figures sur la résine indiquent un affaiblissement de l'induction dans l'hélice qui contient le barreau, et que l'aimantation de l'acier indique au contraire une augmentation.

Si l'on remplace le barreau par un faisceau de *fils de fer*, toutes les actions sont augmentées, et tous les appareils indiquent une même direction du courant induit, excepté l'effet calorifique qui est sensiblement diminué.

Avec les *courants voltaïques*, toutes les actions sont augmentées par les métaux magnétiques en masses ou en faisceaux, mais d'une manière différente, suivant la nature des effets. Par exemple, les solutions de continuité, qui accroissent d'une manière si marquée les actions physiologiques, sont sans influence sur le rhéomètre. Une des hélices de l'inducteur différentiel contenant un barreau de fer, et l'autre un faisceau de fil de fer, de manière à produire l'équilibre sur le rhéomètre, on a de violentes commotions; et si l'on retire une partie des fils de fer, de manière à faire disparaître les commotions, l'aiguille du

rhéomètre est fortement déviée dans le sens correspondant à l'hélice qui contient le barreau. Dove ayant comparé les effets de barreaux égaux de fer, acier, fonte, en rétablissant l'équilibre au moyen de fils de fer placés dans l'hélice opposée, a trouvé aussi que le nombre de ces fils est très différent, suivant qu'on apprécie le courant induit, par le rhéomètre ou par la commotion. Par exemple, avec l'acier trempé, la fonte grise et le fer forgé, il suffisait de 7, 11 et 15 fils de fer pour établir l'équilibre relativement aux effets physiologiques, et il en fallait 28, 27, et plus de 110, pour les effets sur le rhéomètre.

#### IV. Induction réfléchie ou intérieure. — Extra-courant.

**2222. Induction d'un courant sur lui-même.** — L'introduction et la suppression d'un courant dans un fil très-long, peuvent donner naissance à des courants induits, circulant dans le fil même. La première observation se rattachant à ce phénomène a été faite, en 1832, par M. Henry : ayant fait passer le courant de quelques couples à travers un fil de 10 à 12 mètres de longueur, il obtint, au moment où il retirait une des extrémités du fil, d'une capsule de mercure servant à fermer le circuit, une vive étincelle, qui ne se produisait pas quand le fil était court. Si ce fil était enroulé en spirale ou en hélice à spires très rapprochées, l'étincelle était beaucoup plus forte ; Dal Negro en obtint de très-vives avec l'hélice d'un *électro-aimant*. M. Jenkins, ayant pris dans ses mains deux points du fil d'un *électro-aimant* en activité, éprouva une forte commotion, au moment où il ouvrait le circuit, et cela avec un seul couple. Masson a découvert, de son côté, le même phénomène, en opérant de la manière suivante : on prend dans les mains des cylindres de laiton, et on les met en contact, de manière à fermer un circuit, contenant une pile et un *électro-aimant*, puis on les sépare ; aussitôt on ressent une forte commotion. Enfin, Pouillet, vers la même époque, ayant ouvert le circuit du grand *électro-aimant* de la Faculté des sciences de Paris, en prenant dans ses mains les extrémités de l'hélice magnétisante, plongeant dans des coupes de mercure, reçut une violente secousse, à laquelle il était loin de s'attendre.

Faraday a prouvé que tous ces effets sont dus à un *courant induit* instantané, qui se développe dans le fil rhéophore, et qui s'élance sous forme d'étincelle entre les extrémités du fil, au moment où on les sépare, ou dans les bras de l'expérimentateur qui les tient à la main. Ce phénomène est connu sous les noms d'*induction réfléchie* ou *intérieure*, d'*induction d'un courant sur lui-même*, de *réaction des plis d'une hélice*.

**2223. Extra-courant.** — Faraday a fait de nombreuses expériences sur l'induction réfléchie<sup>1</sup>. Pour montrer le courant induit instantané produit dans le fil rhéophore, au moment où l'on ouvre le circuit contenant une hélice, il soude

<sup>1</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. LIX (1835), p. 428.

en deux points de ce circuit, deux fils  $f$ ,  $f'$  (fig. 1530), entre lesquels il place les appareils destinés à recevoir le courant induit. Le point de rupture  $o$  et l'hélice B sont dans des parties différentes du circuit séparé en deux par les points de soudure. Le courant d'un couple, P, parcourant ce circuit, au moment où on l'ouvre en  $o$ , le courant produit par la rupture se précipite dans les fils de dérivation, et l'on peut obtenir en  $ff'$  la commotion, l'étincelle, la fusion d'un fil métallique, les décompositions chimiques, l'aimantation et la déviation de l'aiguille aimantée. Tous ces effets sont singulièrement augmentés par la présence d'un barreau de fer doux dans l'hélice B; ils sont beaucoup plus faibles, au contraire, quand le fil de l'hélice est développé en ligne droite. Comme ils ne se manifestent qu'à l'instant où l'on rompt le circuit, on ne peut les attribuer au courant direct de la pile.

Faraday a nommé *extra-courant* le courant induit produit ainsi dans le circuit inducteur même<sup>1</sup>, et il a reconnu, par les effets chimiques et magnétiques, que l'extra-courant est de même sens que le courant de la pile; il marche donc en  $ff'$  dans le sens du courant dérivé de la pile P, si cette pile se trouve avec l'hélice B, dans la même partie du circuit, par rapport aux fils  $ff'$  (fig. 1530); alors l'extra-courant passe à travers la pile. Ce courant est, au contraire, de sens opposé au courant dérivé en  $ff'$ , quand les points de soudure laissent la pile P dans la partie qui ne contient pas l'hélice B, comme dans la figure 1531; alors l'extra-courant ne



Fig. 1530.

passe pas dans la pile : l'interruption est en  $sr$ , le courant dérivé dans le fil de dérivation  $rma$  est dirigé suivant la flèche  $a$ , tandis que l'extra-courant marche dans le sens de la flèche  $e$ , comme étant la continuation de celui de l'hélice B.

Il se produit aussi un courant induit dans une hélice, au moment où on la fait communiquer avec une pile; mais, le circuit étant alors fermé, il faut certaines précautions pour dériver ce courant à l'extérieur, de manière à pouvoir le constater. Faraday a reconnu qu'il est, comme on devait s'y attendre, de sens contraire au courant de la pile. Masson, qui a répété les expériences de Faraday<sup>2</sup>, disposait dans le conducteur de dérivation une série de vases pleins d'eau, réunis par des arcs métalliques, formant une résistance que ne pouvait vaincre le courant de la pile. Au moment où ce courant était établi, l'extra-courant de clôture, assez intense pour vaincre la résistance des vases, se portait en partie dans le conducteur dérivé, où l'aiguille aimantée indiquait un courant inverse; puis revenait au repos pendant le passage continu du courant inducteur. — On peut aussi, au moment où l'on ferme le circuit qui contient l'hélice, obtenir des étincelles, des commotions, décomposer l'eau, comme l'a fait Faraday; mais ces

<sup>1</sup> Dove l'appelle *contre-courant*, et nomme *juxta-courant* l'induit dans un fil voisin.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. LXVI, p. 5.

effets sont plus faibles que lorsqu'on ouvre le circuit, l'induit inverse produit quand on ferme l'inducteur ayant pour effet d'affaiblir ce dernier au premier instant.

M. Edlund est parvenu à isoler l'extra-courant de clôture, et il l'a trouvé sensiblement égal à celui de rupture<sup>1</sup>. Leur durée est aussi la même, quoiqu'on ait avancé le contraire, d'après des expériences inexactes.

**2224. Extra-courant par la décharge.** — L'extra-courant se développe dans une hélice parcourue par la décharge d'une bouteille de Leyde, comme l'a prouvé Dove en montrant qu'on éprouve une vive commotion quand on prend dans les mains, des cylindres fixés aux fils *f, f'* (fig. 1530), la pile P étant remplacée par la bouteille de Leyde. Cette commotion n'est plus ressentie quand l'hélice n'est pas comprise entre les points de soudure, et elle est bien plus forte quand l'hélice contient un faisceau de fils de fer. Un barreau de fer ou de tout autre métal diminue, au contraire, la commotion produite par l'extra-courant, de même qu'il diminue l'intensité de la décharge induite dans un fil séparé (2219). Dove a aussi produit des extra-courants au moyen de courants d'induction magnéto-électriques instantanés lancés à travers une hélice, quoiqu'ils naissent et disparaissent presque au même moment, et il a trouvé que les masses métalliques exercent la même influence sur ces sortes de courants que sur les courants induits dans un fil voisin.

**2225. Lois de l'extra-courant.** — D'après M. Abria, l'extra-courant est soumis aux mêmes lois que les courants induits dans des fils voisins<sup>2</sup>. Il a, en comparant les intensités de ces deux sortes de courants, par la méthode de l'aimantation, reconnu, avec des spirales de gros fils, en plaçant l'aiguille d'acier à aimanter tantôt dans le courant de la pile, tantôt dans le fil de dérivation de l'extra-courant, qu'il y a un rapport sensiblement constant entre les intensités de ces deux courants. L'extra-courant était à peu près les 0,72 du courant principal, et la valeur de ce rapport changeait peu avec la longueur et la section de la spirale. Cette valeur est cependant un peu trop faible, à cause de la résistance qu'éprouve le courant principal dans l'hélice; elle s'accorde avec celle qui a été obtenue dans l'induction sur un fil voisin.

Antérieurement, Masson avait étudié les effets produits par les masses de fer doux introduites dans les hélices où se forme l'extra-courant. Il avait reconnu que la présence du fer augmentait beaucoup la commotion, mais de moins en moins à mesure qu'il multipliait le nombre des tours de l'hélice; ce qui est d'accord avec l'existence d'un maximum dans l'aimantation du fer (2132).

Quand on augmente la longueur du fil de l'hélice qui donne l'extra-courant, l'intensité des commotions augmente, et l'augmentation tend vers une limite qui dépend de la résistance que le fil oppose au courant principal. On doit donc penser que les commotions s'accroissent avec le nombre de couples de la pile. C'est, en effet, ce qui a lieu.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIII, p. 51.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VII p. 474.

Faraday a reconnu, d'un autre côté, que tout ce qui tend à affaiblir le courant principal augmente l'intensité de l'extra-courant au moment de la rupture du circuit. Par exemple, si l'on met un fil de platine dans un courant qui le fait rougir, il n'y a qu'une étincelle très-faible au moment de la rupture; mais, si l'on ajoute au circuit un long fil de cuivre qui l'affaiblit assez pour que le fil de platine ne s'échauffe pas, il y a une vive étincelle à la rupture.

**2226. Théorie de l'extra-courant.** — Il y a deux cas à examiner : les réactions des plis d'une hélice les uns sur les autres, et l'induction d'un courant sur lui-même quand aucune des parties n'est repliée contre une autre.

1<sup>o</sup> Voici comment Masson présente l'explication donnée par Faraday, dans le cas d'une hélice à spires serrées : au moment où l'on ouvre le circuit, le courant cesse de proche en proche, en passant par l'état variable (2042). Son affaiblissement dans la première spire développe donc dans la spire suivante un courant direct qui s'ajoute au courant de la pile. Ces deux courants réunis cessant ensuite dans la deuxième spire, déterminent dans la troisième un induit direct, qui s'ajoute aux deux courants réunis qui la parcourent. Ces trois courants réunis produisent de même un courant induit dans la quatrième spire, et ainsi de suite. Ces courants engendrés les uns après les autres, vont en augmentant d'intensité; et le phénomène est tellement rapide qu'il paraît instantané. Les mêmes effets ont lieu en même temps à l'autre extrémité de l'hélice, et les courants induits qui y prennent naissance s'ajoutent à ceux dont nous venons de parler. Remarquons aussi que chaque spire agit sur plusieurs en même temps, entre autres sur celles qui la précèdent et où les courants ont cessé; celles-ci reçoivent donc aussi des courants directs qui s'ajoutent à ceux qui prennent naissance dans les spires suivantes. Il résulte de là qu'il faut autant que possible que chaque spire soit très-rapprochée de toutes les autres; il y a donc avantage à les disposer en plusieurs couches superposées, de manière à former un anneau, plutôt qu'à les enrouler en une seule couche, formant une hélice dont les spires extrêmes seraient trop éloignées les unes des autres pour s'influencer mutuellement. — L'extra-courant qui se produit au moment de la clôture du circuit, s'explique de même, le courant se propageant de proche en proche dans les spires de l'hélice.

L'influence du fer doux s'explique par l'induction que produit sur les spires, le magnétisme développé par l'extra-courant même; ce dernier, ainsi exalté, réagit de nouveau sur le barreau, l'aimante plus fortement et en reçoit un surcroît d'intensité, et ainsi de suite. Il se produit donc une série d'actions réfléchies, qui diminuent et cessent en un temps insensible.

M. Villari et M. Herwig ont remarqué que l'extra-courant est d'une intensité remarquable dans les fils de fer; il y a ici évidemment intervention du magnétisme, mais le mode en est très-obscur.

2<sup>o</sup> L'induction réfléchie d'un courant non plié en hélice, n'est pas aussi facile à expliquer. Faraday l'attribue à l'action exercée par le courant qui circule dans chaque série de molécules polarisées, sur les séries voisines, qui reçoivent l'induction de la même manière que si elles n'étaient pas elles-mêmes parcourues

par des courants. Les choses se passeraient donc comme dans un faisceau de fils parallèles, dans lesquels se subdiviserait un même courant; chaque fil réagissant sur les autres y produirait l'extra-courant. Mais des essais tentés pour appuyer cette assimilation, n'ont pas donné des résultats aussi concluants qu'on pouvait l'espérer.

**2227. EFFETS DE L'EXTRA-COURANT.** — L'extra-courant, produit par la rupture du circuit d'un électro-aimant, possède, en général, les mêmes propriétés que les courants d'induction ordinaires. Masson et Breguet ont pu charger un condensateur avec l'extra-courant, et obtenir ainsi de l'électricité statique. Pour cela, le fil  $f'$  (fig. 1530) étant en contact avec l'armature extérieure, on approche très-près de l'armature intérieure, le fil  $f$  tenu par un manche isolant, et on le retire le plus vite possible dès que l'étincelle produite par la rupture du circuit a jailli, afin d'éviter la décharge du condensateur à travers le fil de l'hélice.

**Effets physiologiques.** — Les effets physiologiques de l'extra-courant diffèrent de ceux des courants induits par les courants voltaïques instantanés; c'est que ces derniers sont composés de deux courants successifs de sens contraire, tandis que l'extra-courant se compose d'un mouvement d'électricité dans un seul sens.

Masson a fait une étude spéciale des effets physiologiques de l'extra-courant<sup>1</sup>. Il a reconnu qu'il n'affecte que les points touchés, et que la sensation ne s'étend que fort peu en dehors de ces points. Ainsi, en appuyant seulement un doigt sur chacun des cylindres à commotions, il ne ressentait, avec son appareil, qu'un léger frémissement ne s'étendant pas au-delà de la dernière phalange; en saisissant ces cylindres avec 2, 3... doigts, puis avec la main, la secousse augmentait rapidement d'intensité; d'où il conclut que chaque filet nerveux communique l'ébranlement qu'il reçoit au nerf principal, et que la sensation est l'effet résultant de tous ces petits ébranlements. Cette localisation de l'action physiologique a une grande importance dans les applications médicales.

Pour produire une succession rapide de commotions par l'extra-courant, Masson a employé la disposition (fig. 1531). B est l'hélice, P la pile,  $m$  les manipules disposés dans les fils de dérivation  $am$ ,  $mr$ , et R une roue dentée métallique placée dans le circuit principal et en relation avec ce circuit par les ressorts  $r$  et  $s$ , dont le premier s'appuie constamment sur l'arbre de la roue, et l'autre sur son contour; le circuit est fermé quand le ressort  $s$  s'appuie sur une dent, et ouvert quand il se trouve entre deux dents. Avec cet appareil, Masson

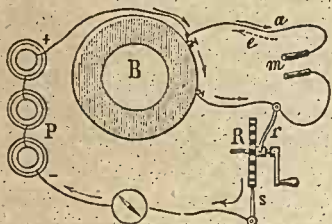


Fig. 1631.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. LXVI, p. 26.



a pu tuer en quelques minutes un chat vigoureux placé en *m*, et cela avec une pile de 5 ou 6 couples seulement. Il est à remarquer que les commotions diminuent d'intensité quand on tourne trop vite; les extra-courants successifs étant alors tellement rapprochés, qu'ils forment un courant continu.

**2228. Condensateur voltaïque.** — De La Rive s'est servi de l'extra-courant pour décomposer rapidement l'eau avec un seul couple<sup>1</sup>. Il lance l'extra-courant dans la pile que contient le circuit, et dans un sens convenable pour augmenter l'oxydation du zinc et désoxyder le sulfate de cuivre ou l'acide azotique. Le condensateur voltaïque ou condensateur électro-chimique, imaginé pour cet objet, consiste en un électro-aimant *ff'* (fig. 1532) dont le fil aboutit aux godets à mercure *o, o'*. Le circuit qui contient l'hélice et la pile, *P*, est fermé par un ressort *nm*, recourbé en *m*, où il plonge dans une coupe de cuivre amalgamée, et communiquant en *c* avec un des pôles de la pile. Une petite balle de fer soudée au ressort *nm*, est attirée par le noyau *f'* de l'électro-aimant quand il est en activité; alors ce ressort est soulevé, le circuit est ouvert en *m*, et l'extra-courant produit s'éclance dans le circuit de dérivation *o'vc'* contenant un voltamètre *v*, et dans le couple *P*, où il a le même sens que le courant principal, et où il active l'oxydation du zinc. L'électro-aimant étant ramené à l'état neutre par la rupture du courant, le ressort *nm* retombe, le courant se rétablit, le ressort se relève de nouveau, et ainsi de suite, de manière à faire 6 à 8 oscillations par seconde; et l'eau est décomposée rapidement dans le voltamètre.

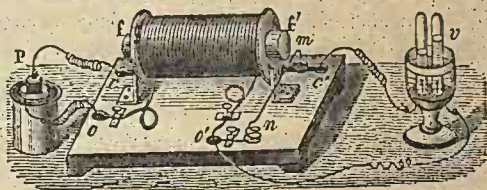


Fig 1532.

— Il faut que le fil qui entoure le noyau soit peu résistant. De La Rive le formait de 3 fils de cuivre réunis par leurs extrémités, de manière à n'en former qu'un de section triple, et lui faisait faire 100 tours. Un couple de Daniell, incapable de décomposer l'eau, la décomposait avec l'aide de cet appareil, en dégageant de 18 à 20 centimètres cubes de gaz par minute. — Si la pile n'était pas traversée par l'extra-courant, comme dans la figure 1531, la décomposition de l'eau serait très-faible.

Avec le condensateur voltaïque, un seul couple produit des effets chimiques qui en exigeraient plusieurs dans chacun desquels il y aurait la même quantité de zinc dissoute. Il ne faudrait pas croire cependant que le zinc dissous dans le couple unique aidé du condensateur, ne dépasse pas la quantité qui représente le nombre d'équivalents d'eau décomposée. De La Rive fait remarquer, en effet, que pendant la fermeture du circuit par le ressort *nm*, le courant passant presque entièrement par ce ressort et ne traversant pas le voltamètre, le zinc

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 36.

dissous pendant ce temps n'est pas représenté par de l'eau décomposée. Despretz a trouvé que la quantité de zinc dépensée peut être près du double de celle qui correspond au volume de gaz recueilli dans le voltamètre<sup>1</sup>. Il employait 8 couples à charbon et zinc amalgamé, disposés de manière à représenter deux couples de surface quadruple, et le zinc était pesé avant l'expérience, et après qu'il s'était dégagé  $\frac{1}{2}$  litre de gaz. On doit donc se demander s'il y a plus d'avantage à augmenter la force électromotrice au moyen du multiplicateur voltaïque, qu'à l'augmenter au moyen de couples additionnels. De La Rive pense que la consommation de zinc est la même dans les deux cas<sup>2</sup>. Seulement, le condensateur n'occupe pas la place, et n'exige pas les soins des couples auxquels il supplée.

**2229. Manière d'atténuer les effets de l'induction réfléchie.** — Les extra-courants ont été l'objet de nombreuses recherches mathématiques et expérimentales; ils jouent un rôle important dans les appareils volta-électriques et magnéto-électriques, décrits plus loin, destinés à donner des commotions, dont ils augmentent l'énergie. Ils agissent aussi dans la formation des courants induits de différents ordres, dont ils contribuent à dénigrer les lois. Mais où ils sont particulièrement nuisibles, c'est dans les appareils où le mouvement est produit par la clôture et la rupture alternative du courant dans l'hélice d'un électro-aimant. L'étincelle d'induction qui accompagne la rupture, bien plus intense que celle du courant de la pile, détériore les rhéotomes, le courant inverse de clôture affaiblit le courant principal, et le courant direct de rupture prolonge dans l'électro-aimant l'état magnétique qu'on a intérêt à supprimer instantanément. On a donc cherché à combattre ces effets nuisibles par différents moyens.

On atténue les inconvénients de l'étincelle sur les interrupteurs, en leur donnant une grande surface, par exemple en les formant d'un faisceau de fils métalliques ou *balai*; en les mettant en contact avec du mercure ou un amalgame, ou en les plongeant dans de l'alcool.

On procède aussi en établissant, entre la pile et l'électro-aimant, une dérivation qui se ferme au moment de la rupture du circuit dans ce dernier, de manière que l'extra-courant se jette dans la dérivation, qui lui oppose moins de résistance. On dispose encore dans cette dérivation un condensateur à grande surface, dans lequel l'extra-courant est absorbé. On a imaginé diverses autres dispositions pour remplir le même objet, et pour éviter l'affaiblissement produit par les courants induits dans les courants interrompus.

M. Carlier a proposé, pour les électro-aimants employés dans la télégraphie, de former l'hélice magnétisante, d'un fil de cuivre non recouvert de soie, dont le courant parcourt cependant les spires, quand il n'est pas trop fort. Quant aux courants induits réfléchis, leur tension supérieure les fait sauter d'une spire à l'autre, ce qui réduit dans une grande proportion l'accroissement de

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XLIV, p. 1009.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.)*, t. XXV, p. 415.

leur intensité par la réaction des plis les uns sur les autres. M. du Moncel<sup>1</sup>, qui a fait une longue étude de ce système, prescrit de séparer les spires par du papier bien sec.

#### V. Magnétisme par mouvement.

**2230. Rotation d'un aimant par un disque tournant.** — Arago a découvert, en 1824, que les corps conducteurs en mouvement tendent à entraîner les aimants placés à une petite distance de leur surface<sup>2</sup>. Ce phénomène, resté d'abord sans explication, a été rattché, depuis, à l'induction magnéto-électrique; voici comment il a été découvert. Arago, ayant fait osciller une aiguille aimantée dans une boîte de cuivre, remarqua que l'amplitude décroissait avec une grande rapidité, et que l'aiguille s'arrêtait après 3 ou 4 oscillations, quand elle était très-près du fond de la boîte, comme si elle eût été plongée dans de l'eau. Ayant ensuite placé là même aiguille très-près de la surface de différentes plaques, il reconnut que le décroissement de l'amplitude dépendait de la nature de ces plaques, qu'il était beaucoup plus prononcé avec les métaux qu'avec toute autre substance, et d'autant plus que la distance était plus petite. Tous ces résultats ont été confirmés dans la même année par Seebeck. Nous avons signalé l'application qui a été faite de cette propriété pour amortir les oscillations des aiguilles des rhéomètres (2053), et le rôle qu'elle joue dans l'aimantation par les courants (2126) et dans l'induction par les courants ou par la décharge (2216).

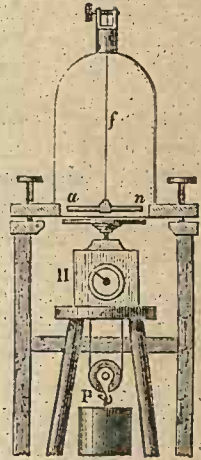


Fig. 1533.

Le voisinage d'une plaque métallique ralentissant les oscillations d'un aimant, il était naturel de penser que, si la plaque était en mouvement, elle pourrait entraîner l'aimant. C'est ce qu'Arago a vérifié au moyen de l'appareil (fig. 1533). *an* est un aimant suspendu par un fil sans torsion *f*; tout près d'un disque de métal que fait tourner une horloge *II*, toute en cuivre. Une feuille de papier ou de parchemin tendue au-dessus du disque, empêche l'agitation de l'air d'agir sur l'aimant. L'aiguille est entraînée dans le sens du mouvement du disque, puis s'arrête, en faisant avec le méridien magnétique un angle, qui dépend de la substance et de l'épaisseur du disque, et qui augmente avec la vitesse de rotation. Quand cette vitesse est assez grande pour que l'aimant éprouve une déviation dépassant 90°, ce dernier tourne d'une manière continue dans le sens du disque. — Ampère et Colladon ont reproduit ces divers effets au moyen d'un

<sup>1</sup> Voy. *Exposé des applic. de l'électr.*, par le comte du Moncel (1873), II, III et V, 345.

<sup>2</sup> *Ann. de ch. et de phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XXVII, p. 363; XXVIII, 325; XXXII, 213.

solénoïde, au lieu d'aimant, et Gay-Lussac a reconnu qu'ils sont nuls avec une aiguille de fer doux. — Si l'on pratique des fentes dans le disque, suivant les rayons (fig. 1534), l'effet est nul, ou du moins considérablement affaibli.

Ces phénomènes ont reçu le nom de *magnétisme de rotation* ou de *magnétisme par mouvement*. Pour en faire l'expérience, on emploie divers appareils, dans lesquels un arbre vertical reçoit un mouvement de rotation, d'un engrenage ou d'une corde sans fin. On fixe à cet arbre le disque, qu'on recouvre d'une feuille de parchemin tendue sur un cadre. L'aimant est équilibré sur une pointe courte, dont le pied, large et mince, est porté par la membrane tendue. — M. Bourbouze fait tourner, derrière un barreau aimanté disposé comme celui de son *galvanomètre à fléau* (1831), un large disque de cuivre, et le fléau s'incline d'autant plus dans le sens de la rotation, que le mouvement est plus rapide. Si l'on fait osciller l'aimant, le disque étant fixe, on reconnaît que les oscillations cessent bien plus tôt qu'en l'absence du disque.



Fig. 1534.

**2231. Composantes de la force qui agit sur l'aimant.** — Arago a reconnu que, indépendamment de la force parallèle au disque, qui entraîne l'aimant, il existe deux autres composantes, l'une perpendiculaire au disque, l'autre suivant le rayon. La première se constate en suspendant l'aimant verticalement au bassin d'une balance en équilibre, au-dessus du disque tournant; l'aimant est repoussé, quel que soit le pôle qui est en bas, et d'autant plus fortement que la distance est plus petite et la vitesse du disque plus grande. La répulsion, qui se mesure par les poids nécessaires pour maintenir l'équilibre, est nulle au-dessus du centre. — Pour constater la composante parallèle au rayon, on approche du disque une aiguille verticale mobile dans un plan vertical contenant un rayon. Quel que soit le pôle inférieur, ce pôle est repoussé tant que l'aiguille reste en dehors du disque, *a* (fig. 1535). La répulsion diminue à mesure qu'on avance vers le centre, devient nulle et l'aiguille, *b*, se tient verticalement; puis la force change de sens, *c*, augmente d'abord d'intensité, pour diminuer ensuite et redevenir nulle, en *o*, au-dessus du centre.

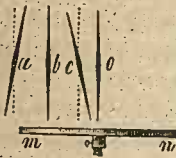


Fig. 1535.

**2232. Circonstances qui influent sur l'intensité de l'action.** — À peine les expériences d'Arago étaient-elles connues, que divers physiciens s'empressèrent de les répéter et d'en varier les circonstances. J. Herschell et Babbage ont procédé en renversant l'expérience<sup>1</sup> : ils faisaient tourner un disque de cuivre suspendu par un faisceau de fils sans torsion, au moyen d'un aimant en fer à cheval tournant autour d'un axe placé entre ses deux branches et passant par le centre du disque.

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève, (Sciences et arts), t. XXIX (1825), p. 254

M. Harris a reconnu que des plaques de métaux non magnétiques interposées entre l'aimant et le disque tournant, peuvent détruire l'action de ce dernier, quand elles ont une épaisseur suffisante, par exemple de 8 à 12<sup>cm</sup>.

Herschell et Babbage ont constaté que les actions exercées à la même distance sur un même aimant, par des disques égaux de différentes substances, tournant avec la même vitesse, sont d'autant plus prononcées que les disques sont meilleurs conducteurs. En prenant pour unité l'action exercée par le cuivre, ils ont trouvé les nombres suivants : zinc 0,90 ; étain 0,47 ; plomb 0,25 ; antimoine 0,11 ; bismuth 0,01. L'argent paraît se rapprocher du cuivre ; l'or a donné de faibles résultats, mais il paraît que son épaisseur était plus faible que celle des autres disques. Le charbon de cornue a produit une action marquée ; mais les corps peu ou pas conducteurs, verre, résine, bois, n'en ont produit aucune. M. Christie est parti de là pour comparer les conductibilités des métaux. Cependant, les métaux magnétiques forment une exception facile à concevoir ; de Haldat a reconnu que le fer doux agit avec plus d'énergie que toute autre substance, tandis que l'acier ne produit pas d'effet.

Herschell et Babbage ont aussi vérifié l'influence des fentes pratiquées suivant les rayons du disque, et ont constaté que, si on les soude avec différents métaux, l'action se reproduit, avec une intensité qui dépend de la nature de la soudure. Par exemple, l'effet que produisait un disque de bronze fut réduit, après qu'il eût été fendu, à 0,24 de ce qu'il était d'abord. Les fentes ayant été soudées avec du bismuth, l'effet devint 0,53, et en employant l'étain pour soudure, 0,38. Si les fentes étaient remplies avec les mêmes métaux en limaille ou en fils fins, l'action était à peine augmentée.

**2233. Lois du magnétisme de rotation.** — Ces lois sont relatives à la manière dont varie, avec la vitesse de rotation du disque, son épaisseur et sa distance à l'aimant, l'action exercée sur ce dernier. Les physiiciens se sont surtout occupés de la composante tangentielle, dont ils évaluaient l'intensité, tantôt au moyen des oscillations de l'aimant sur le disque en repos, tantôt par la déviation de l'aimant pendant la rotation. Dans ce dernier cas, la composante est proportionnelle au *sinus* de la déviation, comme l'action terrestre à laquelle elle fait équilibre.

Par cette dernière méthode, M. Harris a trouvé que *la force tangentielle est proportionnelle à la vitesse de rotation du disque*. Matteucci a vérifié cette loi, en faisant tourner un électro-aimant sous le disque suspendu par un fil métallique, et mesurant la force, par l'angle de torsion.

M. Abria a établi la même loi en vérifiant les conséquences par l'expérience<sup>1</sup>. Il résulte des calculs de Poisson que les amplitudes successives d'une aiguille oscillant sur un disque fixe, forment une progression géométrique décroissante, quand l'amplitude est petite et les résistances émanant du disque proportionnelles aux vitesses. La raison de la progression est

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XLIV, p. 172, et LXV, p. 257.

$$[1] \quad \beta = e^{-\frac{\sqrt{ga}}{2\gamma k}}, \quad \text{dans laquelle on a } \gamma = \sqrt{1 - \frac{ga}{4k^2}}$$

$g$  est la pesanteur,  $a$  la demi-longueur de l'aimant oscillant,  $k$  une constante, et  $e$  la base des logarithmes népériens.

Pour vérifier cette conséquence de la loi, M. Abria pose transversalement sur l'aimant oscillant, une aiguille d'ivoire portant à ses extrémités des arcs divisés. L'aimant étant en repos, il vise, avec une lunette fixe, une division, la 10<sup>e</sup>, par exemple; puis, faisant osciller l'aimant, il observe quelles divisions  $n, n', n'' \dots$  paraissent coïncider avec le fil du réticule, à la fin de la 2<sup>e</sup>, de la 4<sup>e</sup>, de la 6<sup>e</sup>... oscillation. Il est évident que les amplitudes sont  $n-10, n'-10, n''-10 \dots$  et l'expérience montre qu'elles forment une progression géométrique.

M. Abria a aussi procédé par la méthode des déviations. Le calcul montre que, si la loi est vraie, on a pour le *sinus* de l'angle de déviation  $\theta_n$ , quand la plaque fait  $n$  tours par seconde,

$$\sin \theta_n = -\frac{4}{\pi \log e} nT\gamma \log \beta = -2,932 nT\gamma \log \beta,$$

$T$  étant la durée d'une oscillation de l'aimant sous l'influence de la terre. L'expérience a donné des résultats suffisamment d'accord avec ceux du calcul.

M. Abria a reconnu, en faisant osciller au-dessus du disque, un aimant dont il augmentait graduellement la force, que la composante tangentielle croît à peu près proportionnellement à la force magnétique. — On obtient des effets intenses quand on présente perpendiculairement au disque, deux aimants par leurs pôles contraires. Si on les présente par les pôles de même nom, l'effet est nul.

Les lois relatives à la distance et à l'épaisseur sont peu connues. Suivant Matteucci la force tangentielle croît avec l'épaisseur du disque, mais moins rapidement, les diverses couches étant à des distances différentes de l'aimant.

La loi relative aux distances a été étudiée par MM. Christie, Prévost, Colladon, et Harris. Ce dernier trouve que la composante tangentielle varie en raison inverse du carré de la distance, probablement en supposant l'épaisseur négligeable.

M. Abria a fait une longue étude du cas particulier d'un aimant suspendu horizontalement entre deux paires de disques égaux placés verticalement de chaque côté, et à des distances égales, et ayant leur ligne des centres parallèle à l'axe de l'aimant en repos. Il faisait varier la distance, le diamètre, l'épaisseur et la distance des deux paires de disques à l'aimant, et faisait osciller celui-ci soit dans un plan horizontal, soit dans un plan vertical parallèle aux disques. Il a représenté l'ensemble des résultats par des formules empiriques, qui sont assez compliquées pour montrer qu'il n'y a pas de lois simples du phénomène.

**2234. Explication du magnétisme de rotation.** — Plusieurs physiciens, entre autres Herschell et Babbage, avaient attribué le magnétisme de rotation à un développement de magnétisme proprement dit dans le disque, sous l'influence

des pôles de l'aimant, et Poisson, ayant soumis cette hypothèse au calcul, avait retrouvé les trois composantes d'Arago. Mais tout cela est devenu inutile, depuis que la découverte des courants d'induction est venu donner la véritable explication des phénomènes.

**Courant dans un disque tournant près d'un aimant.** — Aussitôt après la découverte des courants induits, Faraday eut l'idée d'y rapporter le magnétisme de rotation. Dans son premier Mémoire sur l'induction, il indique plusieurs moyens de dériver une partie de ces courants dans un rhéomètre<sup>1</sup>. Considérons une lame métallique rectangulaire AB (fig. 1536), que l'on fait marcher dans le sens de la flèche *s*, au-dessous du pôle d'un aimant, N, dans lequel les courants d'Ampère ont le sens indiqué par les flèches. Les bords de la plaque glissant sur les extrémités fixes, *r*, *r'* du fil d'un rhéomètre, dirigées suivant la droite *rr'* qui passe par l'axe de l'aimant, le rhéomètre indique un courant allant de *r'* en *r* dans la lame. Si le fil *r* est fixé à la lame, en *f*, le courant va à travers celle-ci, de *r'* en *f*;

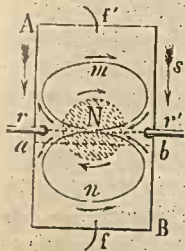


Fig. 1536.

et si ce fil est en *f'*, il va de *r'* en *f'*. — Le sens du courant change quand la plaque revient sur ses pas. Ce sens change aussi quand le pôle est placé au-dessous de la plaque, ou quand on le remplace par le pôle contraire. — Il résulte de là que, si la plaque glisse entre deux pôles magnétiques oppo-

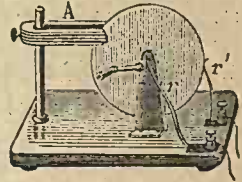


Fig. 1537.

ses, les actions de ces deux pôles s'ajoutent. — Quand les fils du rhéomètre sont en *r*, *r'*, le courant allant dans le sens *r'r'*, si l'on enlève les fils *r*, *r'*, ce courant pourra se former à travers la plaque, en parcourant des circuits, *m* et *n*. — Comme les courants induits demandent un certain temps pour se développer, la ligne suivant laquelle marche le courant *r'r* ne passe pas par l'axe de l'aimant, mais est un peu en avant, en *ab*. Il résulte de là que la partie antérieure de l'aimant est plus vivement attirée par *ab* que la partie postérieure n'est repoussée, et l'aimant tend à marcher dans le sens de la plaque.

Faraday a montré les courants d'un disque tournant en présence d'un aimant au moyen de l'appareil (fig. 1537). A est un fort aimant ou électro-aimant, entre les pôles très-rapprochés duquel tourne un disque de cuivre. L'axe et le contour de ce disque sont mis en rapport avec un rhéomètre au moyen des ressorts *r*, *r'*. Les bords du disque sont amalgamés, pour rendre le contact plus intime. Pendant la rotation, l'aiguille est déviée dans un sens qui ne dépend pas du point de contact du ressort *r'*; mais l'intensité du courant dérivé dans le

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 2<sup>e</sup> série, t. L, p. 42.

rhéomètre varie avec la position de ce point, et augmente quand il se rapproche des pôles de l'aimant. Si l'on change le sens de la rotation, le courant est renversé. Si l'on appuie les deux bouts du fil du rhéomètre sur le contour du disque, le sens du courant dépend de celui qui est le plus rapproché des pôles de l'aimant. Si les deux bouts sont à la même distance de part et d'autre de ces pôles, l'aiguille n'est pas déviée.

Une fois admise l'existence des courants induits dans le disque, il est facile de concevoir qu'ils puissent déplacer l'aimant, et d'autant mieux que, le disque étant meilleur conducteur, les courants d'induction s'y développent plus facilement (2204). Les fentes empêchent tout effet, en interrompant les circuits dans lesquels les courants induits tendent à se former. Ces courants ne peuvent se produire sur les disques isolants; cependant, Arago a vu les oscillations d'une aiguille aimantée se ralentir un peu dans le voisinage de plaques de verre ou de

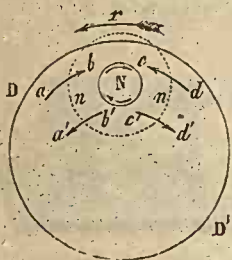


Fig. 1538.

gomme laque. Ce fait, d'abord contesté, puis confirmé, se rattache à des phénomènes de *diamagnétisme*, dont nous parlerons plus loin. — Les courants peuvent être observés dans les liquides en mouvement : M. A. Fleming, ayant fait couler une colonne d'eau acidulée dans un tube vertical de verre placé entre les pôles d'un électro-aimant, obtint un courant, dans des fils de platine enfoncés dans les extrémités du tube et en rapport avec un rhéomètre. — Une masse liquide tournant au-dessus du pôle d'un aimant donne aussi des courants, qu'on peut dériver dans un rhéomètre, au moyen d'électrodes non polarisables.

— Il nous reste à analyser les courants qui circulent dans les disques tournants, et à étudier les courbes parcourues, courbes qui sont fixes dans l'espace pendant que le disque tourne et se dérobe, pour ainsi dire, sous elle.

**2235. Courants à la surface du disque tournant.** — Nobili et Antinori ont fait de nombreuses expériences sur ce sujet<sup>1</sup>. Ils exploraient la surface du disque au moyen de cônes en cuivre, ou *sondes*, fixés aux extrémités du fil du rhéomètre, et qu'ils appuyaient en deux points du disque, en ayant soin de ne pas trop appuyer, de peur de produire des courants thermo-électriques. Voici les résultats auxquels ils sont arrivés. Soient DD' (fig. 1538) le disque tournant dans le sens  $r$ ; N le pôle nord d'un barreau aimanté supposé au-dessus du disque. Les sondes, appliquées successivement en  $a$ ,  $b$ ,  $a'$ ,  $b'$ , indiquent entre ces points des courants directs par rapport à ceux de l'aimant, dus à ce que la partie  $ab'$  du disque s'éloigne du pôle. En  $cd$  et  $c'd'$  on trouve, au contraire, des courants inverses provenant de ce que la partie  $cd'$  s'approche de ce pôle. Les courants  $ab$ ,  $a'b'$  attirent l'aimant, les courants  $cd$ ,  $c'd'$  le repoussent. Il sera

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XLVIII, p. 426, et t. L, p. 280.



donc sollicité dans le sens du mouvement du disque. — Remarquons que les parties du courant  $cd$ ,  $c'd'$  qui repoussent l'aimant, tendent à l'éloigner du disque, tandis que les courants  $ab$ ,  $a'b'$  tendent à l'en rapprocher; mais, à cause du sens du mouvement, les premiers sont plus rapprochés de l'aimant et envahissent le disque jusque sous son pôle. Leur action l'emporte donc sur celle des autres, qui agissent de plus loin et plus obliquement. De là l'explication de la répulsion normale au disque constatée par Arago.

Quant à la composante parallèle au rayon, remarquons que l'aimant est repoussé vers le centre par les courants en  $cd$ , et en sens contraire par ceux qui sont en  $c'd'$ . Les forces qui agissent ainsi proviennent des points du disque renfermés dans une circonférence  $mn$ , dont le rayon dépend des distances et des intensités des courants développés par l'aimant. Des actions opposées sont produites par les courants  $ab$ ,  $a'b'$ ; mais nous venons de voir qu'elles sont plus faibles. Or, si l'aimant est assez rapproché du bord du disque pour qu'une partie de la circonférence  $mn$  soit en dehors; on voit que les courants tels que  $c'd'$  l'emporteront, et le pôle N sera repoussé vers l'extérieur; si l'aimant se rapproche du centre, cette répulsion diminuera, deviendra nulle; puis, quand le cercle  $mn$  sera tout entier sur le disque, les courants tels que  $cd$  l'emporteront, les parties du disque voisines du centre n'éprouvant qu'une faible induction, à cause de leur faible vitesse. Mais, une fois que le cercle  $mn$  aura dépassé le centre, les mouvements du disque étant en sens contraire de part et d'autre de ce point, les effets produits par les parties de cercle  $mn$  qui ne sont pas du même côté du centre se contrarieront, l'aimant se rapprochera de la position verticale, et s'y arrêtera complètement quand il sera au-dessus du centre. Dans cette position, on ne trouve plus de courants induits.

Les effets intenses produits par les disques de fer doux sont dus au magnétisme contraire développé par les pôles de l'aimant. Ce magnétisme persiste après que le point influencé a un peu dépassé l'aimant, et agit sur ce dernier par attraction. Quant à la nullité d'effets d'un disque d'acier, il est difficile de s'en rendre bien compte; on soupçonne cependant qu'elle est due à la persistance des états magnétiques excités sous les pôles de l'aimant.

**2236. Distribution générale des courants sur le disque.** — Nobili et Antinori n'avaient exploré que certaines parties des courbes parcourues sur le disque par les courants; ils ont cependant, dans le cas de deux pôles d'aimant placés symétriquement par rapport au centre, construit deux courbes formant ensemble une espèce de 8, parcourues par les courants développés pendant la rotation. Mais c'est à Matteucci qu'est dû le travail le plus complet sur ce sujet<sup>1</sup>. Pour rendre intenses ces courants, il employait un électro-aimant puissant dont le fer doux seul pesait 100 kil., et qui était animé par 20 couples de Grove. Les branches de cet électro-aimant étaient horizontales et placées symétriquement par rapport au centre d'un disque vertical en cuivre, de 0<sup>m</sup>,80 de diamètre,

<sup>1</sup> Ann. de ch. et de ph., 3<sup>e</sup> s., t. XXXIX et XLIX, et Cours sur l'induction. Paris (1854).

appliqué sur un autre disque en bois, centré sur un arbre mu par une roue et une corde sans fin. Dans l'appareil du même physicien (fig. 1539), le disque  $d$  reçoit son mouvement d'une roue à manivelle  $m$  et d'une corde sans fin. Les branches de l'électro-aimant,  $e, e$ , peuvent s'écarter plus ou moins, et des

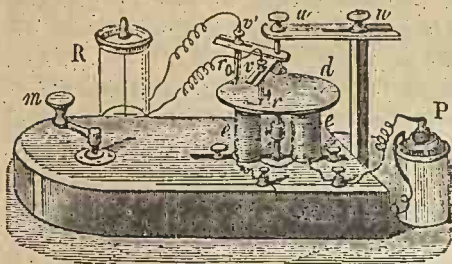


Fig. 1539.

Sur la figure 1540 sont tracés les résultats obtenus dans ces expériences : N et S sont les pôles nord et sud de l'électro-aimant. Les courants parcourent, dans le sens des flèches, les courbes tracées en points. On voit qu'il y a quatre systèmes de circuits fermés, disposés deux à deux symétriquement par rapport à la ligne des pôles, à laquelle ils sont tangents. Les courbes 1, 2, 3, 4 et 5

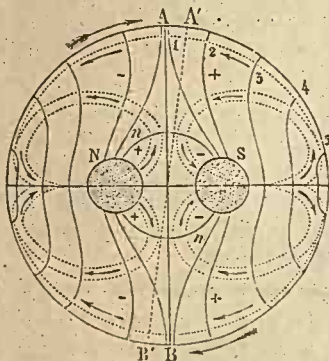


Fig. 1540.

1, 2, 3, 4 et 5 sont des lignes neutres ou de *nul courant*; elles sont normales à la ligne des pôles et au contour du disque. Les courants ont leur maximum d'intensité dans les points où ils coupent normalement ces lignes. La ligne neutre AB établit la séparation entre des états électriques opposés. Il en est de même de la circonférence  $mn$ , qui passe par les projections des pôles des électro-aimants, et qui est aussi une ligne neutre. Quand on fait tourner le disque avec une vitesse suffisante, la ligne neutre AB se déplace proportionnellement à la vitesse, dans le sens du mouvement, et vient en  $A'B'$ ; il en est de même de tout le système des autres lignes neutres et des courbes que parcourt l'électricité. En même temps, la circonférence neutre  $mn$  se resserre. Cette influence de la vitesse prouve qu'il faut, pour le développement de l'induction, un temps comparable à la durée d'un tour du disque.

Matteucci, ayant formé avec des fils de cuivre garnis de soie et fixés sur un plateau de cire, des circuits semblables à ceux qui sont tracés sur le disque (fig. 1540), et les ayant fait parcourir par des courants voltaïques; a pu

reproduire, sur une aiguille aimantée, tous les effets des trois composantes d'Arago (2231).

**2237. Arrêt de masses métalliques par l'induction.**— Si l'on suspend entre les pôles d'un puissant électro-aimant, par un cordon fortement tordu,

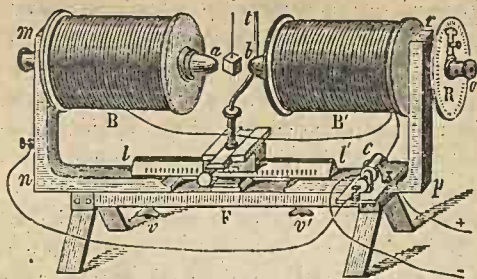


Fig. 1541. — 1/12

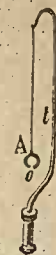


Fig. 1542.

un cube de cuivre, d'argent..., ce cube se met à tourner avec une vitesse croissante. Si alors on lance dans l'électro-aimant, le courant de 25 à 30 couples, on voit le cube tournant s'arrêter subitement, pour recommencer à tourner sous l'influence de la torsion, dès qu'on supprime le courant. Cette expérience se fait facilement avec l'appareil de Ruhmkorff (fig. 1541). BB' sont deux bobines enveloppant de gros cylindres de fer doux, et formant des pôles *a* et *b* de nom contraire. Les cylindres sont réunis par des barreaux de fer coudés *mn*, *rp*, pouvant se fixer à différentes distances l'un de l'autre, au moyen de vis *v*, *v'*, sur une barre de fer *F*, qui forme la enclasse de l'électro-aimant. Avant de circuler dans les bobines, le courant passe par un commutateur *c*. Une règle graduée *l l'* porte un curseur qui soutient une tige *l*, à laquelle on suspend le cube tournant.

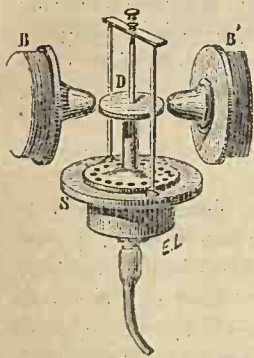


Fig. 1543.

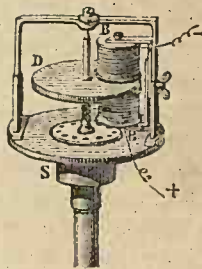


Fig. 1544.

Dans l'appareil (fig. 1543) imaginé par M. Bourbouze, la masse de cuivre *D* est affermie sur l'arbre d'une sirène (I, 623) qui lui imprime une vitesse, dont la constance est attestée par celle de la hauteur du son produit. Dès qu'on lance un courant dans l'électro-aimant BB', le son descend rapidement, ce qui indique que la vitesse de rotation est promptement diminuée. Dans un autre appareil (fig. 1544), M. Bourbouze place les pôles opposés de deux

électro-aimants B, B de chaque côté d'un disque D fixé à l'arbre de la sirène, dont les montants servent en même temps de support aux électro-aimants.

Les phénomènes d'arrêt qui nous occupent, découverts par Faraday, sont dus à des courants d'induction développés dans la masse en mouvement, par l'électro-aimant, et sur lesquels réagit ensuite le magnétisme de ce dernier. Quand il s'agit du cube suspendu par un fil tordu, le moindre déplacement suffit pour y développer des courants induits, et il est sans cesse ramené au repos.

— Pour confirmer cette explication M. E. Becquerel remplace le cube par un anneau vertical de cuivre A (*fig. 1542*), ouvert en *o*; le mouvement continue pendant l'action de l'électro-aimant, des courants induits ne pouvant se développer dans l'anneau brisé. Si l'on ferme cet anneau au moyen d'un fil métallique, la vitesse est subitement anéantie.

M. Lamy a remarqué que, si l'on fait mouvoir le commutateur de manière à renverser fréquemment le courant, ou seulement à l'interrompre et à le rétablir, la masse, quelle que soit sa forme, tourne de plus en plus rapidement, pourvu qu'elle soit en dehors du plan vertical qui contient la ligne des pôles.

**2238. Masses composées de lames.** — Matteucci a fait un grand nombre d'expériences qui montrent bien le développement de courants d'induction dans la masse mobile, sous l'influence du magnétisme<sup>1</sup>. Cette masse était suspendue entre les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval tournant autour d'un axe vertical passant entre ses deux branches. La masse était sollicitée à tourner dans le même sens que l'électro-aimant, avec une force qu'on évaluait, soit par la torsion d'un fil d'argent, soit par le nombre de tours faits pendant un temps donné quand le corps était suspendu par un fil de cocon. Matteucci a reconnu ainsi qu'un cube formé de lames de cuivre très-minces séparées par des couches de vernis, ne prend pas de mouvement, quand il est suspendu de manière que les lames soient horizontales; tandis que le même cube tourne vivement, quand ces lames sont verticales. C'est que, dans le second cas, chaque lame peut être parcourue par des courants induits, dans un plan transversal à la ligne des pôles; ce qui ne peut avoir lieu dans le premier.

**Cas des cristaux.** — Matteucci ayant formé, avec du bismuth cristallisé, de petits cubes égaux dont deux faces étaient parallèles au plan du clivage le plus brillant, plan qui est perpendiculaire à l'axe principal de cristallisation, reconnu que l'action de l'électro-aimant vertical est plus vive quand ces faces sont verticales que lorsqu'elles sont horizontales. Les couches de bismuth se comportent donc comme les lames de cuivre de l'expérience précédente. Cependant, elles ne sont pas séparées par des matières isolantes; mais la conductibilité est moindre normalement aux plans de clivage que dans le sens de ces plans; car Matteucci ayant laissé refroidir lentement dans une large assiette, une couche de bismuth de 20 à 25<sup>mm</sup> d'épaisseur, dans laquelle il tailla deux tiges égales, l'une parallèle, l'autre perpendiculaire aux plans du clivage principal,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIX, p. 134, et XLIII, p. 467.

trouva, au moyen du rhéomètre différentiel, que les tiges parallèles aux plans de clivage conduisent mieux que les autres. Et il reconnut, de plus, que celles-ci s'échauffent plus que les premières, par le passage d'un même courant.

**2239. Réaction des courants induits, sur l'aimant qui les produit.** — En même temps que les aimants produisent dans les corps conducteurs, des courants induits, ceux-ci réagissent sur les aimants, et modifient leur état magnétique. M. Breguet, Weber, Faraday, Matteucci, Verdet, ont étudié ce genre de phénomène. Verdet faisait tourner devant les pôles d'un aimant enveloppé par l'hélice induite, des lames de différentes substances non magnétiques; un commutateur ne laissait circuler le courant induit que pendant  $\frac{1}{12}$  du temps d'une révolution de la lame, et à partir d'une position donnée de cette lame. La formation de courants induits dans l'hélice montrait que les courants induits dans la lame par l'aimant, réagissaient sur le magnétisme de ce dernier. La réaction n'avait plus lieu quand la lame était remplacée par un faisceau de fils métalliques, ou par une masse de limaille agglutinée par un mastic <sup>1</sup>.

**2240. Chaleur produite par l'induction.** — Dans l'induction par les aimants, il faut dépenser un certain travail mécanique pour vaincre les résistances dues aux réactions électro-magnétiques qui tendent à détruire la vitesse des parties mobiles de l'appareil. Ce travail doit être, d'après les principes de la thermodynamique (II, 1320), représenté par un certain développement de chaleur. C'est en effet ce qui a été constaté par M. Joule et par L. Foucault <sup>2</sup>.

M. Joule opère de la manière suivante : un petit électro-aimant de 12<sup>cm</sup> de longueur est renfermé dans un tube de verre rempli d'eau. Ce tube est fixé sur un arbre vertical, portant un commutateur auquel aboutissent les extrémités de l'hélice magnétisante, dont le circuit est fermé au moyen d'un rhéomètre. Le système fait 10 tours par seconde, et le travail mécanique dépensé au bout d'un temps donné est égal au produit du poids moteur par la hauteur dont il est descendu. Le tube de verre tourne ainsi entre les pôles d'un fort électro-aimant, et l'eau s'échauffe d'une quantité proportionnelle à l'intensité du courant induit, mesurée par le rhéomètre. La chaleur perdue par le contact de l'air, s'évalue en faisant tourner l'appareil après avoir supprimé le courant dans l'électro-aimant. On calcule ensuite, par les formules des chaleurs spécifiques, le nombre des calories développées dans le tube en mouvement. M. Joule a trouvé ainsi, pour le nombre de kilogrammètres équivalent à une calorie, des résultats variant de 322 à 572, et dont la moyenne est de 460<sup>km</sup>; nombre qui ne diffère pas trop, vu les incertitudes du mode d'expérience, de celui qu'on a déduit des autres méthodes (II, 1332).

Nous avons décrit l'appareil de M. L. Foucault au moyen duquel on produit l'échauffement d'un disque tournant entre les pôles d'un électro-aimant

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXI, p. 187.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, t. XXXIV, p. 504; et t. XLV, p. 316.

(II, 1322). — On peut aussi, comme l'a imaginé M. Tyndall, faire bouillir de l'eau, fondre divers alliages, dans un tube métallique tournant rapidement entre les pôles d'un électro-aimant, par exemple, entre les pièces polaires *a* et *b* (fig. 1541).

**2241. Magnétisme de rotation, par l'influence du globe.** — La terre se comportant comme un aimant, doit développer des courants induits dans un disque tournant. En effet, Faraday a constaté que, lorsqu'on fait tourner sur lui-même un disque de cuivre perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, on peut dériver dans le fil d'un rhéomètre en rapport avec l'axe de rotation et avec le contour, un courant dont le sens change avec celui de la rotation. Ce courant s'affaiblit quand le plan du disque s'incline sur l'aiguille d'inclinaison, et est nul quand ce plan lui est parallèle. — Une sphère de cuivre tournant autour d'un axe situé dans le méridien magnétique et formant un angle avec l'aiguille d'inclinaison, est parcourue par des courants assez intenses pour dévier une petite aiguille aimantée rendue astatique, et placée dans un plan horizontal passant par le centre de la sphère. Si la rotation se fait en sens contraire du mouvement de la terre, et que l'aiguille soit placée à l'est de la sphère de cuivre, le pôle nord est dévié à l'est. Le contraire a lieu quand l'aiguille est à l'ouest. Si l'on change le sens de la rotation, toutes les déviations, se font en sens contraire.

MM. Barlow et Marsch ont fait des expériences curieuses sur l'action d'un globe de fer tournant, sur une aiguille aimantée rendue astatique<sup>1</sup>. L'aiguille était tantôt tangente à la sphère, tantôt normale à l'axe de rotation, que l'on plaçait dans différentes directions. Le pôle nord était attiré ou repoussé, suivant que l'aiguille se trouvait au nord ou au sud du globe tournant, ce qui prouve que le magnétisme terrestre agissait sur le fer du boulet. Un fait remarquable, c'est que l'aiguille, qui est influencée de la même manière par une sphère massive ou creuse en repos, éprouve une action beaucoup plus vive de la part de la sphère massive quand il y a mouvement.

Il résulte des faits qui précèdent une conséquence curieuse : c'est que tout corps conducteur en mouvement doit être parcouru par des courants d'induction, sauf dans certaines positions particulières. Il doit en être ainsi des rouages des machines, des roues des wagons, des pièces des machines à vapeur, et peut-être même du corps des animaux pendant qu'ils se meuvent.

**2242. Explication des courants terrestres par le magnétisme de rotation.** — Les variations des courants terrestres admis par Ampère pour expliquer les actions qu'exerce le globe sur les aimants et les courants, étant liées, comme nous l'avons vu, aux changements de position du soleil (2175), on a cherché l'origine de ces courants dans une induction produite sur le globe en mouvement par l'influence du soleil supposé magnétique, ou, ce qui revient au même, entouré d'une ceinture de courants. Le P. Secchi a particulièrement développé cette hypothèse. L'idée de considérer les corps célestes comme

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Sciences et arts), t. XXIX (1825), p. 257.

magnétiques est fort ancienne, et l'on avait même cherché à expliquer les variations de l'aiguille aimantée, par l'action magnétique du soleil variant aux différentes heures du jour. Les coïncidences remarquées entre les années à faibles ou grandes perturbations et celles où les taches solaires sont rares ou nombreuses (1579), ont été citées en faveur de cette hypothèse. Néanmoins, elle est loin de présenter le même degré de probabilité que les explications que nous avons développées plus haut (2175).

#### VI. Appareils d'induction volta-électriques. — Bobine de Ruhmkorff.

**2243.** On nomme *appareils volta-électriques d'induction* les appareils dans lesquels les courants induits sont engendrés par un courant intermittent fourni par la pile, et non par le mouvement d'aimants. Beaucoup de ces appareils, dans lesquels l'extra-courant joue un rôle important, sont construits en vue des applications médicales. Les courants induits conviennent, en effet, tout particulièrement à l'électrisation musculaire; ils offrent l'avantage, à cause du peu d'intensité de leurs effets chimiques et calorifiques, de ne pas désorganiser les tissus, comme peuvent le faire les décharges leyden-électriques ou celles des piles à grand nombre d'éléments. De plus, dans les applications aux muscles de la face, on remarque que ces courants n'affectent que très-peu l'organe de la vue, tandis que les courants directs d'une pile agissent vivement sur la rétine et peuvent occasionner des accidents graves. Aussi, le Dr Duchenne, auquel on doit de nombreuses recherches sur l'emploi de l'électricité en thérapeutique<sup>1</sup>, remarque-t-il que les courants induits fournissent l'électricité vraiment médicale, et il nomme *faradisation*, du nom de Faraday, l'application de ces sortes de courants à l'art de guérir.

Les appareils d'induction *volta-électriques* ont reçu des constructeurs bien des formes différentes. On s'est appliqué à les rendre très-portatifs et à les disposer de manière à pouvoir faire varier avec facilité la rapidité des interruptions et l'intensité des courants induits qui en résultent.

**2244. Rhéotomes.** — Une pièce importante de tous ces appareils est le *rhéotome*, destiné à interrompre et rétablir successivement le courant inducteur. Un rhéotome fort usité est la roue dentée de Masson (2227). Un autre système, employé dès 1804 par Aldini, dans ses expériences physiologiques avec la pile, consiste en une plaque métallique striée, communiquant avec une des extrémités du fil inducteur, et sur laquelle on fait glisser plus ou moins rapidement l'autre extrémité, de manière que le courant se trouve interrompu quand le fil saute d'une saillie à l'autre. — De La Rive a employé un arbre tournant portant des aiguilles métalliques plongeant à chaque tour dans des coupes de mercure séparées, de manière à fermer le circuit, dont les extrémités aboutissent à ces

<sup>1</sup> De l'Electrisation localisée et de son application à la physiologie, etc. (1872).

coupes. Un mécanisme d'horlogerie fait tourner l'arbre avec une vitesse que l'on modifie à volonté. Ce système donne les plus fortes commotions, mais le mercure est projeté quand on tourne un peu vite, et il s'oxyde bientôt, ce qui diminue sa conductibilité.

On se sert le plus souvent de rhéotomes *automatiques*, ou agissant sous l'influence même du courant de la pile. Le tourniquet de Clarke (2131) a été employé pour cet usage par MM. Breton, Bianchi... Le courant est interrompu toutes les fois que les extrémités du fil de l'électro-aimant tournant passent par-dessus la cloison du vase à mercure.

Un rhéotome très-employé est le *trembleur*, imaginé en même temps par M. Neef et par de La Rive, dont nous avons expliqué le jeu dans le *condensateur voltaïque*, et qui a été utilisé, depuis, par Froment dans son appareil électro-musical (2131).

**2245. Appareils à commotions.** — Ces appareils, assez nombreux, diffèrent principalement par la manière dont on obtient les intermittences du courant inducteur, et par les dispositions qui permettent de modifier l'intensité

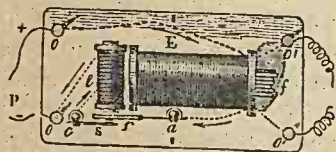


Fig. 1545.

des courants induits. La figure 1545 représente le petit appareil de M. Mirand, modifié par M. Bianchi, et qui donne des commotions énergiques avec un simple couple à charbon de 10<sup>cm</sup> de hauteur. Sur une bobine de bois E, sont enroulés deux fils revêtus de soie. Le premier, assez gros, constitue le fil inducteur; l'autre, beaucoup plus fin et formant un grand nombre

de tours superposés à ceux du premier, appartient au circuit induit; il aboutit à deux bornes  $o'$ ,  $o'$ , auxquelles on fixe les rhéophores qui doivent recueillir les courants induits. Les extrémités du fil inducteur sont fixées aux boutons  $o$ ,  $o$ , auxquels aboutissent les électrodes P du couple voltaïque. Le courant, après avoir parcouru le fil inducteur, arrive au support métallique  $a$ , parcourt les ressorts  $r$ ,  $s$  quand ils se touchent, passe dans le support  $c$ , et retourne à la pile après avoir circulé dans l'hélice magnétisante d'un petit électro-aimant  $c$ . Celui-ci attire le ressort en fer  $r$ , ce qui rompt le circuit en  $sr$ ; le ressort  $r$  revient donc en arrière, et le circuit est de nouveau fermé; alors l'électro-aimant attire le ressort de manière à rompre de nouveau le circuit, et ainsi de suite. Pour modifier la rapidité des oscillations du *trembleur*  $sr$ , on écarte plus ou moins de l'électro-aimant, les ressorts  $r$  et  $s$ , en faisant tourner sur eux-mêmes les supports  $c$  et  $a$ . — On fait varier l'intensité des courants induits, en enfonçant plus ou moins dans la bobine E, des fils de fer  $f$  en nombre variable. Les commotions, assez faibles en l'absence de ces fils, deviennent insupportables quand ils sont introduits. C'est afin de pouvoir les enlever à volonté qu'on fait fonctionner le trembleur au moyen d'un électro-aimant séparé. L'appareil est enveloppé d'une boîte, qui laisse en dehors les boutons  $o$ ,  $o$ ,  $o'$ ,  $o'$ ,



et porte une ouverture par laquelle on introduit les fils de fer. Enfin, une petite caisse séparée contient le couple ainsi que deux flacons dans lesquels on verse les liquides, quand on cesse de s'en servir.

**1246. Appareil volta-faradique de Duchenne.** — Dans cet appareil (fig. 1546), le couple, à charbon et sans diaphragme, est renfermé dans un tiroir T, où il peut rester amorcé pendant plusieurs mois. Il est composé d'une caisse de zinc *z*, qui s'ajuste dans le tiroir, et renferme une masse rectangulaire de charbon de corne, qui la remplit exactement. On verse dans la caisse un peu d'eau salée, et l'on imbibe le charbon d'acide azotique par une rigole *u*, creusée à sa partie supérieure. Deux boutons à vis *v'*, *v*, communiquent avec le zinc et avec le charbon; et quand le tiroir T est enfoncé de la même manière qu'un second tiroir T', ces boutons touchent des lames de platine *e*, *e'* auxquelles sont soudées les extrémités du fil inducteur. Le courant du couple traverse d'abord un rhéomètre fixé dans le tiroir T', et passe de là dans un ressort qui s'appuie sur la roue dentée à manivelle *r*, servant de rhéotome. De l'arbre de cette roue, le courant est conduit dans un *trembleur*, dont on règle les vibrations au moyen d'une vis *c*. Si l'on veut employer le *trembleur*, on place la roue *r* de manière que le ressort s'appuie sur une dent métallique. Si l'on veut se servir de la roue dentée, on met en contact les ressorts du *trembleur* au moyen de la vis *c*. Le courant passe ensuite dans une hélice contenant un faisceau de fils de fer, et arrive enfin à la lame de platine *e'*, et au bouton *v'*. Autour de l'hélice est enroulé un long fil très fin, qui constitue le fil induit, dont les extrémités aboutissent à deux boutons, auxquels on fixe les rhéophores destinés à recueillir les courants induits.

Duchenne fait varier l'intensité de ces courants par deux systèmes différents. Le premier, appliqué par M. Bonijol, dès 1840, à ses cassettes d'induction, et nommé *modérateur*, consiste en un tube de verre *m* rempli d'eau, dont le fond métallique communique avec le rhéophore *f*, et dans lequel on peut enfoncer plus ou moins une tige *o* mise en rapport, par la virole supérieure du tube, avec l'extrémité du fil induit. Les courants induits sont d'autant plus affaiblis que la tige *o* est moins enfoncée. On peut ensuite graduer ces courants avec précision, au moyen d'une méthode imaginée par Dove : deux manchons concentriques de cuivre, nommés *graduateurs*, enveloppent, l'un l'hélice induite, et l'autre le faisceau de fer doux; on les enfonce plus ou moins, soit ensemble, soit séparément, quand on veut affaiblir les courants induits. Nous avons vu (2208) comment agissent de semblables manchons pour contre-balancer l'action que reçoit l'hélice induite.

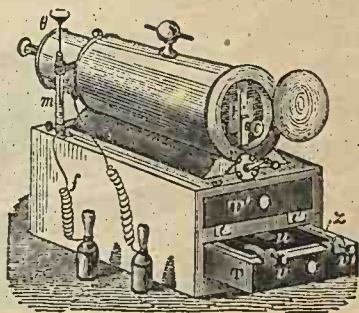


Fig. 1546.

Quand, au bout de deux ou trois mois, le couple ne fournit plus qu'un courant très-faible, on le démonte, on plonge le charbon dans l'eau, pour dissoudre les sels qui s'y sont incrustés, et l'on renouvelle l'eau salée et l'acide nitrique. Malgré toutes les précautions, il est bien difficile d'éviter que les vapeurs acides n'attaquent à la longue quelques parties de l'appareil; aussi préfère-t-on généralement se servir d'un couple séparé. — M. Breton a imaginé, pour les usages médicaux, une pile qui reste toujours humide : le zinc et le cuivre sont remplacés par des limailles de ces métaux mêlées à de la sciure de bois, séparées par un vase poreux, et mouillées par une solution de chlorure de calcium qui absorbe constamment l'humidité de l'air. On a construit des appareils puissants pouvant être renfermés, avec le couple destiné à les faire fonctionner, dans une caisse n'ayant pas plus de 1 décimètre cube de volume. Quoi qu'il en soit, à cause des soins et des frais qu'exige l'entretien du couple, on préfère généralement,

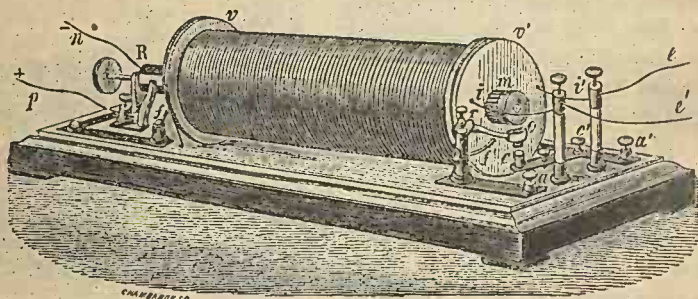


Fig. 1547.

pour les usages médicaux, les appareils *magnéto-électriques*, que nous décrirons bientôt (2268), qui sont toujours prêts à fonctionner, et n'exigent aucuns soins particuliers pour être maintenus en bon état.

Les commotions produites par les courants induits dépendent de la rapidité avec laquelle se succèdent les courants intermittents, et de la durée de chacun d'eux. M. Guillemin<sup>1</sup> a reconnu que : 1<sup>o</sup> la commotion diminue quand les intermittences deviennent trop fréquentes. Quand il y en a plus de 100 par seconde, on ne perçoit plus qu'un frémissement, qui finit par devenir nul quand elles sont encore plus nombreuses. 2<sup>o</sup> La commotion est d'autant plus forte que le temps qui sépare les deux courants induits successifs est plus grand. 3<sup>o</sup> Une armature de fer, introduite dans la bobine, n'augmente la commotion que lorsque les intermittences ne sont pas trop rapprochées.

**2217. BOBINE DE RUHMKORFF.** — Cet appareil produit, avec les courants induits, des effets de tension comparables à ceux des plus puissantes machines

<sup>1</sup> Recherches expérimentales sur l'induction volta-électrique. Montpellier, 1861.

électriques. Dès 1842, MM. Masson et Breguet, dans leurs recherches sur l'extra-courant, avaient fait construire un appareil d'induction qui, malgré que les fils fussent mal isolés, donnait de vives étincelles, et de la lumière électrique dans le vide assez intense pour faire reconnaître les différences d'aspect lumineux, aux deux électrodes<sup>1</sup>. M. Bonijol obtenait aussi, au moyen des courants induits, l'incandescence de fils de platine, et un petit arc voltaïque entre deux charbons. Ruhmkorff, réunissant toutes les conditions les plus favorables, a construit, en 1851, un appareil qui donne des effets de tension extraordinaires, des commotions foudroyantes et de très-longues étincelles. Il s'est appliqué surtout à bien isoler les fils de l'hélice. Après avoir placé l'hélice verticalement, il l'a disposée ensuite horizontalement, afin de pouvoir plus facilement lui donner une grande longueur, l'intensité des courants induits dépendant surtout du nombre des spires.

L'appareil de Ruhmkorff se compose d'un faisceau de fils de fer doux réunis à leurs extrémités par des disques de même matière *m* (fig. 1547), enveloppé d'un cylindre de carton sur lequel sont enroulés deux fils de cuivre garnis de soie, et dont les tours sont isolés avec beaucoup de soin au moyen de soie et de gomme laque. Le premier fil a 2<sup>mm</sup> de diamètre; c'est lui qui doit recevoir le courant inducteur de la pile. Le second, qui n'a que  $\frac{1}{2}$ <sup>mm</sup> de diamètre, est enroulé sur le premier, et forme le circuit induit. Il fait 25 à 30,000 tours, et peut avoir plus de 100 kilomètres de longueur. Les extrémités de ce fil, *i* et *i'*, aboutissent à des bornes d'attache isolées par des colonnes de verre, et auxquelles on adapte les rhéophores *e*, *e'*, destinés à recueillir les courants induits. Deux disques de verre *v*, *v'* retiennent les fils de la bobine. Les bouts du fil inducteur sortent de cette bobine, l'un en *f*, l'autre en *f'*, aux bases opposées, et sont mis en communication avec les électrodes *p* et *n* de la pile, par l'intermédiaire des ressorts du commutateur R, dont le support de gauche communique avec le fil *f* par une bande de cuivre appliquée sur la table de l'appareil, et celui de droite, avec le fil *f'*, par une bande semblable qui passe derrière la bobine et vient aboutir en *e'*, et par les pièces *c*, *or*, qui constituent un interrupteur oscillant. La lame de cuivre *e'c* porte un cylindre garni de platine, *c*, nommé l'enclume, sur lequel s'appuie un appendice, aussi en platine, fixé sous la tête d'un marteau en fer doux *or*, mobile, à charnière, sur la colonne métallique *r*, à laquelle aboutit l'extrémité *f'* du fil inducteur. — Quand, le marteau étant abaissé, le circuit inducteur fait communiquer les fils *p*, *n* avec la pile, le fer doux est aimanté, la partie *m* attire le marteau, et le circuit est rompu entre *o* et *c*. Le marteau retombe alors, le courant inducteur est rétabli, et ainsi de suite. Une vis placée entre *e* et *e'*, et qui s'appuie sur la table de l'appareil, permet, en soulevant plus ou moins l'enclume *c*, de modifier la rapidité des interruptions. Les bornes *a*, *a'* servent à fixer des rhéophores, quand on veut recueillir l'extra-courant qui se produit dans le fil inducteur pendant les interruptions.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. IV, p. 129.

**22-18. Condensateur annexé au circuit inducteur.** — Plusieurs physiciens ont cherché à augmenter la puissance de la bobine de Ruhmkorff. M. Fizeau ayant découvert qu'on augmente beaucoup l'intensité des courants induits en faisant communiquer avec un condensateur deux points du *circuit inducteur*, pris de part et d'autre du rhéotome, Ruhmkorff a fait communiquer les boutons *a*, *a'*, qui appartiennent à ce circuit, avec les armatures d'un condensateur. Ce condensateur est formé d'une bande de taffetas gommé de plusieurs mètres de longueur, sur les deux faces de laquelle sont collées des feuilles d'étain, et qui est repliée entre deux autres bandes de taffetas, de manière à pouvoir être logée dans l'épaisseur du socle de l'appareil. M. Halske remplace le taffetas par une feuille de mica très-mince, et forme ainsi un condensateur qui, sous de moindres dimensions, agit bien plus efficacement, le taffetas étant plus épais et moins uniforme que le mica ; celui-ci peut aussi être remplacé par du papier fin verni à la gomme laque.

On n'est pas d'accord sur le rôle que joue le condensateur. M. Fizeau pense qu'il recueille et condense l'électricité de l'extra-courant, qui, étant de même sens que le courant principal, produit un courant induit inverse contraire au courant direct résultant de la rupture du circuit inducteur. En effet, la présence du condensateur rend beaucoup plus faible l'étincelle qui jaillit entre le marteau et l'enclume, tout en augmentant celle que donne le courant induit<sup>1</sup>. Des expériences de Poggendorff et de M. Gaugain prouvent aussi qu'on augmente les effets du courant induit quand on diminue l'intensité de l'extra-courant, en apportant une résistance au point de rupture, au moyen d'un liquide peu conducteur, comme l'eau, l'alcool, dans lequel on plonge le rhéotome.

Poggendorff a reconnu, en employant des condensateurs de dimensions diverses, depuis 7 jusqu'à 400<sup>cm</sup> carrés, que les plus petits sont à peu près aussi efficaces que les grands, quand on emploie une pile peu énergique ; les étincelles sont tout aussi longues, seulement un peu moins grosses. Mais, quand on emploie un grand nombre de couples, auquel cas l'extra-courant est énergique, les grands condensateurs sont beaucoup plus efficaces que les petits, qui sont alors presque inutiles ; ce qui confirme l'explication de M. Fizeau. Ajoutons que le condensateur n'agit que dans le cas où le courant induit trouve des résistances à vaincre, des obstacles à franchir.

**22-19. Bobines cloisonnées.** — Poggendorff, après avoir étudié le rôle des différentes parties de l'appareil de Ruhmkorff, y a apporté diverses modifications importantes<sup>2</sup>. L'expérience ayant prouvé que la tension n'est pas la même aux deux extrémités du fil induit, l'extrémité *extérieure* donnant des étincelles, pendant que l'extrémité *intérieure*, celle qui termine la couche la plus profonde, ne peut en donner, Poggendorff fait sortir les deux bouts du fil par les bases opposées de la bobine, afin d'éloigner autant que possible les

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXVI, p. 418.

<sup>2</sup> *Pogg. Ann.*, t. XCIV, p. 289 ; et *Annales de ch. et de ph.*, 3<sup>e</sup> série, t. XLIV, p. 375.

parties du fil qui, n'ayant pas la même tension, pourraient laisser passer une décharge à travers l'enduit isolant. Depuis, il a divisé l'hélice induite en tronçons placés bout à bout sur la même bobine, comme on le voit en B (fig. 1550), ce qui présente, en outre, cet avantage que, si l'enduit isolant est percé par une décharge intérieure, on n'a à remplacer que le tronçon avarié, et, en attendant, l'appareil n'est affaibli que de la suppression de ce tronçon. Au lieu d'isoler le fil avec de la gomme laque dissoute dans l'alcool, le même physicien applique, à l'état de fusion, un mélange de blanc de baleine, d'acide stéarique, d'huile et de cire.

Poggendorff introduit dans la bobine un faisceau de 4,200 fils de fer fins, n'ayant que  $\frac{1}{4}$ mm de diamètre. On peut, du reste, en retirer une grande partie sans en affaiblir sensiblement l'effet. Il est inutile de les vernir, la couche d'oxyde qui les recouvre bientôt les isolant suffisamment.

L'Interrupteur ou rhéothome est placé à part et mu par un électro-aimant séparé, comme dans l'appareil (fig. 1545), ce qui permet de le faire jouer dans différents fluides, et même dans le vide. C'est ainsi que Poggendorff a pu constater que le condensateur annexé au circuit inducteur n'a plus d'influence quand l'interrupteur est plongé dans un liquide peu conducteur.

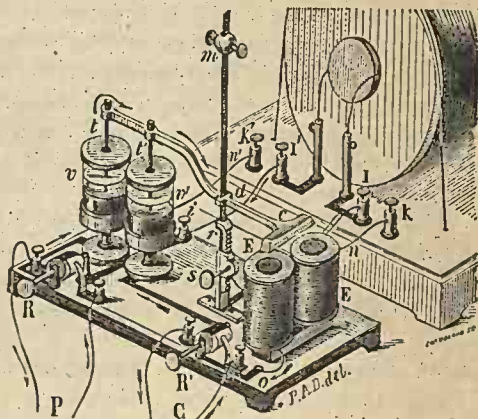


Fig 1548.

Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que les résultats sont encore égaux avec et sans condensateur, quand le rhéotome est dans l'air réduit à une pression de 3 à 4mm. Dans ce cas, les étincelles entre le marteau et l'enclume sont très fortes et détériorent rapidement ces deux pièces.

**2250. Interrupteur à mercure.** — Dans les grands appareils, le platine qui garnit le marteau et l'enclume s'altère et peut fondre. L. Foucault évite cet inconvénient, au moyen de l'interrupteur à mercure (fig. 1548). Le courant inducteur venant de la pile P passe par le fond métallique d'un cylindre de verre, *v* contenant du mercure et de l'alcool, et passe dans une tige de platine, *t*, quand elle touche le mercure. Cette tige est portée par un levier *te* fixé à une lame élastique *mr* pouvant osciller autour du point *r*, et dont on règle les oscillations soit en limitant la partie libre, au moyen d'un pignon denté *s*, soit en déplaçant la masse *r*. A chaque demi-oscillation, la tige *t* s'enfonce dans le mercure ; alors

le courant passe dans le levier *td* et le ressort *dr* qui communique, par la borne I, avec le fil inducteur de la bobine, puis passe entre les pieds des cylindres *v*, *v'* et arrive, par le commutateur R, à la pile P.

Voici comment oscille le ressort *rm*, avec le levier *tc*. En *c* est le contact d'un électro-aimant EE parcouru par le courant d'un couple spécial C. Ce courant passe par le commutateur R' dans le vase *v'* contenant du mercure et de l'alcool. Quand cette tige de platine *t'* touche le mercure, le circuit de l'électro-aimant EE est fermé, et le courant retourne à la pile par *t'dro* et le commutateur R'. En même temps, le contact *c* est attiré, et la tige *t'* sortant du mercure, le circuit s'ouvre en *t'v'*. Alors le contact devient libre, le ressort *rm* revient sur lui-même et la tige *t'* s'enfonce dans le mercure; aussitôt l'électro-aimant attire le contact *c*, le circuit est interrompu en *t'v'*, et ainsi de suite. Les fils *n* et *n'* communiquent avec les bornes *k*, *k'* qui appartiennent aux armatures du condensateur logé dans le socle de l'appareil.

L'interrupteur fait ordinairement 50 à 60 oscillations par seconde. Pour obtenir un nombre double d'interruptions, avec le même nombre d'oscillations, L. Foucault emploie un interrupteur à *double effet* : à l'extrémité *c* se trouve une tige de platine plongeant dans un vase à mercure et alcool, de manière que le circuit inducteur est fermé par ce vase à la fin de la demi-oscillation qui l'ouvre dans le vase *v*.

L'alcool superposé au mercure en empêche l'oxydation, atténue l'extra-courant (2248) et rend l'interruption plus brusque, comme on le reconnaît au bruit sec qui accompagne l'étincelle produite dans ce liquide. Avec les forts appareils l'alcool serait projeté au dehors, si les vases *v*, *v'* n'étaient pas munis d'un couvercle.

**2251. Effets de la bobine de Ruhmkorff<sup>2</sup>.** — Quand le circuit induit de l'appareil est fermé par un fil conducteur, il se produit des courants induits alternatifs, directs au moment de la rupture du circuit, quand le marteau est attiré, et inverses quand ce marteau retombe sur l'enclume. Ces deux sortes de courants sont égaux en quantité, mais les courants directs étant de moindre durée, ont une plus forte tension (2200); leur force électromotrice d'induction croît comme le carré de la résistance du circuit induit, qui est ici très grande, tandis que celle des courants inverses croît plus lentement. Quand le circuit induit présente une interruption, les courants directs passent seuls et les extrémités séparées présentent des pôles bien caractérisés. Poggendorff s'en est assuré, soit en faisant jaillir de l'une de ces extrémités, une étincelle sur le bouton d'un électroscope, soit en rapprochant les extrémités de manière que le courant passe par étincelles, et plaçant dans le circuit un rhéomètre ou un voltamètre.

**Commotion.** — Avec un ou deux couples à charbon, l'appareil de Ruhmkorff

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XLIII, p. 41.

<sup>2</sup> Notice sur l'appareil d'induction de Ruhmkorff, par le comte Th. du Moncel.

donne des commotions foudroyantes, auxquelles il serait plus que téméraire de s'exposer. En touchant seulement du doigt le fil induit, on reçoit une violente secousse, même quand ce fil est recouvert de soie. Il faut donc employer les plus grandes précautions, et ne jamais oublier de rompre le courant inducteur, au moyen du commutateur R (fig. 1547), pendant qu'on prépare les expériences.

**Étincelle.** — L'énorme tension des courants induits de la bobine, se manifeste surtout dans les effets lumineux. Si l'on ajoute aux extrémités du fil induit, de gros fils de cuivre dont les extrémités soient présentées l'une à l'autre, on obtient un jet presque continu d'étincelles d'un blanc éclatant, formant un faisceau de trois ou quatre traits sinueux dans une agitation continuelle. Les étincelles sont d'autant plus longues que les interruptions du courant inducteur sont moins rapides. Les bobines cloisonnées, munies de l'interrupteur Foucault conduit avec la main, peuvent en donner de 50<sup>cm</sup> et plus. Si, au contraire, on remplace l'interrupteur oscillant, par une roue dentée qu'on fait tourner avec une rapidité croissante, les étincelles sont de plus en plus courtes et finissent même par disparaître; le magnétisme du fer ne se développant pas instantanément. On peut interposer un tube étincelant dans le circuit induit, et en obtenir les effets les plus brillants.

Masson a remarqué que, si l'on fait jaillir les étincelles entre deux fils de fer très-fins, le fil négatif seul rougit et brûle. Ce n'est qu'avec un courant inducteur énergique que l'on voit les deux fils rougir en même temps.

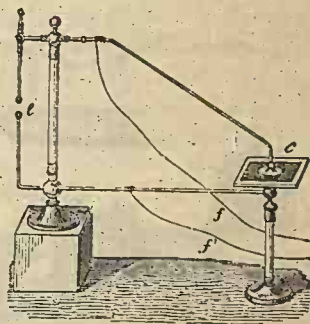


Fig. 1549.

Si l'on fait communiquer les extrémités du *fil induit* avec les armatures d'un condensateur, armatures réunies par un excitateur, on obtient entre les branches de ce dernier des étincelles plus fortes, plus brillantes, mais généralement moins longues. Masson, qui avait observé ces résultats, en 1842, a repris plus tard ses expériences au moyen de la bobine de Ruhmkorff. On voit (fig. 1549) la disposition qu'il employait, *e* est le condensateur, *f*, *f'* les extrémités du fil induit. Il a constaté que l'étincelle qui jaillit en *e* n'est exaltée par le condensateur qu'autant que l'excitateur *e* présente une résistance moindre que celle du fil induit. MM. Grove et Gassiot ont reconnu, d'autre part, que l'énergie de l'étincelle croît avec l'étendue du condensateur et le nombre des couples de la pile; mais il faut pour cela que cette étendue et ce nombre de couples augmentent en même temps et dans le même rapport. Avec un courant inducteur, fourni par 30 couples à charbon, et un condensateur de  $\frac{1}{2}$  mètre carré, ils obtinrent en *e* un torrent de feu volumineux, produisant un bruit assourdissant, et présentant une longueur de 4<sup>mm</sup>, qui devenait 10 fois plus grande

quand ils diminuaient la résistance de l'air en  $e$ , au moyen d'une flamme d'esprit de vin.

Quand on veut charger un condensateur non isolé  $c$  (fig. 1550), on fait communiquer l'armature intérieure avec l'extrémité extérieure du fil induit, qui présente la plus forte tension, et l'on a soin qu'il y ait une interruption  $o$  que franchit seul le courant de rupture. En quelques secondes, on charge ainsi un grand condensateur.

S'il n'y avait pas d'interruption, le condensateur se déchargerait par le fil induit. Dans ce cas, M. Koosen a observé des vibrations dans des armatures non adhérentes à la lame de verre; ce qui montre que le condensateur se charge et se décharge alternativement.

**2252. Batteries d'induction.** — Pour obtenir des résultats intenses sans courir le risque de percer l'enduit isolant en employant un grand nombre de

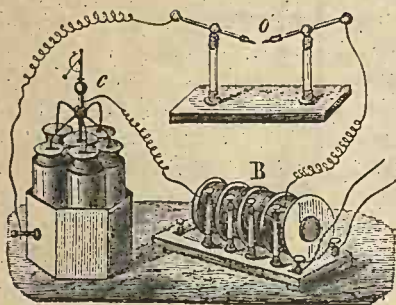


Fig. 1550.

couples, L. Foucault a eu l'idée de réunir en batterie plusieurs appareils égaux, de manière qu'ils marchent bien d'accord. Un même courant se subdivise dans les fils inducteurs des différentes bobines, et les extrémités par lesquelles il sort se réunissent à un seul fil qui passe par un interrupteur à mercure. Les fils induits sont réunis de manière que l'extrémité extérieure du fil d'une bobine communiquant avec l'extrémité intérieure du fil de la suivante, les courants induits au même instant dans tous les appareils s'ajoutent. M. Borstein

conseille de réunir aussi les noyaux par des armatures de fer. L'expérience a montré que : 1° la différence des tensions aux extrémités du fil induit de chaque bobine est la même que si cette bobine était seule et était parcourue par le courant partiel qu'elle reçoit; 2° la différence des tensions aux extrémités du fil induit total des appareils réunis, est égale à la somme des différences observées dans chaque bobine en particulier. Si donc il y a 4 bobines, on pourra, avec une pile de 4 fois plus d'éléments, obtenir une tension 4 fois plus forte, sans craindre de percer les enduits isolants, chaque bobine ne recevant pour courant inducteur que le quart du courant de la pile. — Avec deux appareils très-puissants, réunis ainsi en batterie, on peut percer, au moyen de l'étincelle, des lames de verre de 6<sup>cm</sup> et plus d'épaisseur. Souvent, le canal formé est composé de plusieurs embranchements.

On a construit des bobines qui, seules, donnent des résultats encore plus intenses. M. Ritchie, qui a beaucoup perfectionné ces sortes d'appareils et en a tiré le meilleur parti, a construit une bobine de 1<sup>m</sup>,20 de longueur, qui



donne des étincelles de 63<sup>cm</sup>, avec une pile de 3 couples seulement<sup>1</sup>. La grande bobine de l'Institut polytechnique de Londres est encore plus colossale ; elle a 3<sup>m</sup> de longueur, et le noyau de fer pèse 46 kil. Le fil inducteur, de 2<sup>mm</sup>, 4 de diamètre, présente une longueur de 35 kilomètres, et le fil induit, de 0<sup>mm</sup>, 40, une longueur de 240 kil. Excitée par 40 couples de Bunsen, cette énorme machine donne des étincelles de 74<sup>cm</sup>, et perce un bloc de verre de 127<sup>mm</sup> d'épaisseur !

**2253. Effets chimiques.** — MM. E. Becquerel et Fremy ayant fait passer une série d'étincelles d'induction entre deux fils de platine, dans un tube rempli d'air, ont vu, au bout de quelques minutes, ce tube rempli de vapeurs rutilantes d'acide hypo-azotique. Morren a formé de l'ammoniaque en combinant l'hydrogène et l'azote par le même moyen.

On peut faire jaillir l'étincelle d'induction à travers un liquide, et d'autant plus facilement qu'il est moins conducteur. Quand le liquide conduit notablement, comme l'eau, il faut que les électrodes de platine soient enveloppées de tubes de verre jusqu'aux extrémités, entre lesquelles on aperçoit un petit arc voltaïque. Dans l'eau acidulée, chaque fil de platine laisse échapper une gerbe d'étincelles, rouges au pôle positif, et violettes au pôle négatif. En même temps l'eau est décomposée, mais les gaz sont mélangés aux deux pôles, et un peu inégalement, à cause d'effets de polarisation. Grove a reconnu que, si l'un des fils de platine est terminé par un petit plateau, toute la décomposition se fait à sa surface.

M. A. Perrot a étudié spécialement la décomposition des mélanges gazeux, et particulièrement de la vapeur d'eau<sup>2</sup>. Pour soustraire les produits de la décomposition à l'action des étincelles, il fait circuler ce mélange entre les fils de platine qui donnent ces étincelles. Par exemple, pour la *vapeur d'eau*, il remplit d'eau bien purgée d'air, un ballon dont le col est traversé par des fils de platine, et est muni d'un tube abducteur s'engageant sous une éprouvette pleine d'eau purgée d'air et maintenue à une température de 90°. On fait bouillir l'eau du ballon, et quand tout l'air a été entraîné, on fait passer les étincelles, et l'on recueille dans l'éprouvette un mélange de 2 volumes d'hydrogène et de 1 d'oxygène. La décomposition n'est pas due à la chaleur du fil négatif, car elle a encore lieu quand on empêche ce fil de rougir en activant le passage de la vapeur, et cette décomposition est à peu près nulle quand le fil est traversé par un courant continu qui le fait rougir. — Du reste, l'étincelle d'induction agit sur la vapeur avec une bien plus grande énergie que celle des fortes machines électriques.

D'après Masson, dans tous les milieux, une petite partie de la décomposition est produite par électrolyse, et l'autre par l'action propre de l'étincelle agissant en tous les points de son parcours, probablement par la haute température

<sup>1</sup> *Les Mondes*, par M. l'abbé Moigno, t. XXX (1873), p. 60.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXI, p. 461.

qu'elle possède. M. Perrot a démontré cette coexistence des deux modes de décomposition en faisant arriver les fils de platine aux extrémités de deux tubes *a*, *c* (fig. 1551), à travers lesquels la vapeur entraîne les gaz dégagés près de leur orifice. Dans l'éprouvette positive *A*, il a toujours trouvé un excès d'oxygène, et dans l'éprouvette *B*, un excès d'hydrogène. Un voltamètre à sulfate de cuivre placé dans le circuit, a donné un travail chimique

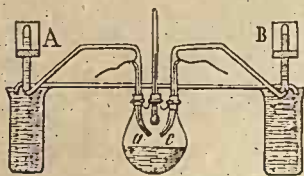


Fig. 1551.

bien inférieur à celui de l'étincelle, et à peine différent de celui qui correspond à la quantité de vapeur décomposée par électrolyse. La quantité décomposée par la décharge disruptive, se faisant en tous les points de l'étincelle, doit s'accroître avec sa longueur; c'est, en effet, ce que l'on observe, quand on a soin de comparer les résultats obtenus simultanément dans le même circuit, avec le même nombre d'étincelles.

M. Perrot a décomposé par la même méthode, les vapeurs d'alcool, d'éther, d'acide acétique, le gaz ammoniac, et l'acide carbonique en oxyde de carbone et oxygène.

**2254. Constitution de l'étincelle d'induction.** — L'étincelle d'induction diffère essentiellement de l'étincelle des machines à frottement; tandis que celle-ci est formée d'un simple trait lumineux, l'étincelle d'induction des fortes bobines se compose de deux parties: un trait brillant et une auréole souvent de forme ovoïde *ac* (fig. 1552); plus ou moins agitée et présentant une couleur rouge-orangé, avec teinte verdâtre du côté du pôle positif. Cette structure de l'étincelle, signalée par Masson, a été étudiée en détail par MM. du Moncel<sup>1</sup>,

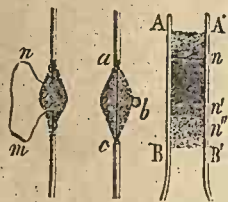


Fig. 1552.

Perrot<sup>2</sup>, Lissajous. M. Perrot considère le trait brillant comme une décharge d'électricité statique, et l'auréole comme un courant d'électricité dynamique, et c'est elle qui produit les décompositions par électrolyse, dans les actions chimiques de l'étincelle d'induction (2253).

On pourrait croire que l'auréole est une expansion du trait brillant; mais les expériences qui suivent montrent que les deux parties sont indépendantes l'une de l'autre: 1<sup>o</sup> Tandis que le trait n'a pas de durée appréciable, l'auréole dure un certain temps. Pour le prouver, M. Lissajous observe l'image de l'étincelle dans un miroir qu'il fait tourner dans sa main, et il voit que l'auréole s'étale en une longue bande de couleur fauve dont le trait brillant occupe l'extrémité postérieure. 2<sup>o</sup> Si, comme l'a fait

<sup>1</sup> Recherches sur la non homogénéité de l'étincelle d'induction. Paris, 1860.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. LXI, p. 201.

M. du Moncel, on dirige le vent d'un soufflet à travers l'étincelle, l'auréole est entraînée en formant une nappe violacée, tandis que le trait n'est pas déplacé. 3° On peut, comme l'a fait M. Perrot, détourner le trait brillant, sans déplacer l'auréole, en approchant latéralement un corps *b* (fig. 1552), que le trait vient lécher en se courbant suivant *abc*, si le corps est isolant, ou qu'il traverse, s'il est bon conducteur. On peut aussi détourner le trait, au moyen d'un fil métallique *nm*; et s'il y a une interruption *m*, il s'y produit une étincelle sans auréole. 4° Entre deux fils parallèles AB, A'B', on obtient une auréole rectangulaire AA'B'B, dans laquelle le trait brillant affecte des positions variables d'un instant à l'autre, *n*, *n'*, *n''*, sans que l'auréole se déplace. 5° Enfin, M. Perrot sépare complètement les deux parties de l'étincelle, par le moyen suivant : on fait jaillir l'étincelle en *o*, entre les

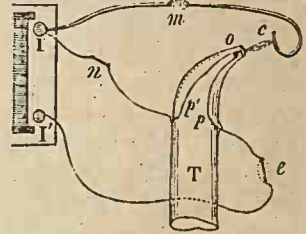


Fig. 1553.

extrémités de deux fils de platine *p*, *p'* (fig. 1553) communiquant avec la bobine de Ruhmkorff, en I, I', et placés à l'orifice d'un tube T par lequel sort un fort courant d'air. Un conducteur *Imc* communiquant avec le pôle positif est présenté à l'étincelle; le trait passe en *o* entre les fils de platine, et l'auréole s'en sépare et se dirige suivant *oc*. Si l'on ménage une interruption en *e*, on a un trait à auréole; en *n*, le trait seul; et en *m*, l'auréole seule. — Des voltamètres placés en *m* et *e* donnent les mêmes résultats, tandis qu'en *n* on n'obtient que des effets de tension. L'auréole représente donc la décharge de quantité, et le trait, la décharge de tension. En *n*, une feuille de papier est percée et non brûlée; dans l'auréole, dont on a séparé le trait suivant *abc* (fig. 1552), les corps combustibles prennent feu; un fil de verre, un fil de platine fondent, l'auréole ayant une certaine durée. — Enfin, les aimants puissants dévient l'auréole, qui s'étale en éventail, et n'agissent pas sur le trait, à cause de son instantanéité.



Fig. 1554.

**2255. Lucurs produites à travers les mauvais conducteurs.** — Si l'on applique, comme l'a fait M. du Moncel, des plaques de métal communiquant avec les extrémités du fil induit, sur les faces extérieures de deux lames de verre séparées par une couche d'air de 2 ou 3<sup>mm</sup> d'épaisseur, on voit dans l'obscurité, une pluie lumineuse d'un beau bleu, qui paraît s'échanger entre les deux surfaces de verre, et il se dégage une forte odeur d'ozone (2007). Si l'une des plaques métalliques est plus petite que l'autre, elle est entourée d'une auréole bleue rayonnant dans tous les sens. On peut ainsi, en appliquant sur la lame de verre une feuille d'étain découpée, obtenir un dessin qui se détache en noir sur un fond lumineux (fig. 1554). Une

couche d'un liquide conducteur mise à la place de la feuille d'étain, et formant un dessin, paraît lumineuse, et ses contours sont entourés de franges brillantes.

Il n'est pas facile d'expliquer le passage de l'électricité entre les deux lames de verre; cependant, on peut rattacher ce phénomène à la polarisation moléculaire, qui se fait dans les plus mauvais conducteurs, et à la pénétration lente de l'électricité à travers leur épaisseur. Dans tous les cas, les faces intérieures des lames de verre sont électrisées; car M. du Moncel a vu de la limaille métallique osciller entre ces deux lames, comme dans l'appareil à grêle (1597). D'un autre côté, Grove a découvert certains faits qui montrent que les molécules des faces intérieures des lames ont éprouvé, soit dans leur arrangement, soit dans leur nature, des modifications sensibles. Ayant fait l'expérience de M. du Moncel, après avoir pressé entre les deux lames une feuille de papier imprimée d'un côté, il put, après avoir démonté l'appareil, voir les lettres apparaître nettement sur la surface du verre qui était en contact avec le côté imprimé, en soufflant simplement sur cette surface. L'ayant exposée ensuite à des vapeurs d'acide fluorhydrique, les lettres se dessinèrent, d'une manière imparfaite, il est vrai, mais permanente, sous l'action corrosive des vapeurs acides. Ayant interposé entre les lames, des morceaux de papier découpés en forme de lettres, et ayant, après le passage du courant, exposé la surface du verre aux vapeurs acides, les lettres, d'abord invisibles, ressortirent très-nettement et d'une manière permanente.

**2256. Lumière des courants induits dans le vide.** — Nous avons déjà signalé, à propos de l'arc voltaïque (1957), les différences que présente la lumière électrique aux deux électrodes. Les courants d'induction à forte tension, qui ne produisent pas de chaleur intense, permettent d'observer plus facilement ces phénomènes, et MM. Masson et Breguet ont pu, avec l'extra-courant, distinguer dans le vide les différences d'aspect des deux électrodes. Ruhmkorff a étudié le même phénomène dans des conditions plus favorables, avec sa bobine. Ayant fait le vide dans l'*œuf électrique* (fig. 1556), il a vu constamment se produire deux lumières différentes; l'une de couleur violette, enveloppe complètement la boule et la tige négative; l'autre, d'un rouge de feu, semble adhérente à la boule positive, et forme une sorte de corps ovale qui s'étend vers la boule négative. Si l'on introduit une résistance considérable dans le circuit induit, la lumière rouge disparaît autour de la boule positive, et est remplacée par une lumière bleue comme celle de la boule négative. Si l'on fait communiquer une des tiges seulement, avec le fil induit, il ne se produit de lumière dans le vide qu'avec l'extrémité extérieure de ce fil; ce qui prouve une fois de plus que sa tension est beaucoup plus forte que celle de l'extrémité intérieure (2249). Quand le courant inducteur n'est pas trop intense, on peut, dans ce cas, dévier en tout ou en partie la gerbe lumineuse qui part de la boule, en approchant de la paroi du récipient un corps conducteur non isolé.

**2257. Étincelles composées.** — L'étincelle de la bobine de Ruhmkorff se divise souvent en plusieurs branches, surtout quand il y a un condensateur

dans le circuit induit, et c'est ce qui fait qu'elle perce les plaques de verre, de canaux souvent ramifiés. Ces branches jaillissent les unes après les autres, et chaque décharge est ainsi composée de plusieurs décharges élémentaires, même lorsqu'elle se produit dans un espace très-court. M. Niland<sup>1</sup> montre cette multiplicité de l'étincelle d'induction par une méthode simple due à M. Donders : une des extrémités du fil induit est liée à un diapason armé d'un style d'acier qui trace ses vibrations sur un cylindre conducteur noirci communiquant avec l'autre bout du fil. Quand le courant induit passe à travers le style, la courbe qu'il trace est criblée de centaines de points très-rapprochés et de moins en moins distincts, indiquant des décharges successives s'affaiblissant rapidement.

M. Ogden Rood et M. Cazin, chacun de leur côté<sup>2</sup>, ont étudié les étincelles multiples en partant du même principe d'expérience. Un disque opaque de 22<sup>cm</sup> de diamètre porte sur son contour 48 fentes très étroites dirigées suivant les rayons. Les étincelles d'une bobine de Ruhmkorff éclatent au foyer d'une lentille qui ramène la lumière sur ce disque, en faisceau parallèle limité par un écran de manière à ne laisser voir qu'une fente à la fois. Le disque tournant avec une vitesse de 48 tours par minute, si l'étincelle était simple, on ne verrait qu'une fente illuminée, mais, comme elle est multiple, on voit plusieurs traits brillants, à cause de la persistance des impressions dans l'œil. M. Cazin a reconnu que la distance explosible diminuant, le nombre des étincelles élémentaires qui composent la décharge croît graduellement de 1 à plusieurs centaines.

M. A. Mayer a procédé de la manière suivante<sup>3</sup> : On interpose entre les électrodes de décharge un disque de papier de 15<sup>cm</sup> de diamètre, couvert de noir de fumée et tournant avec une vitesse de 20 tours par seconde. La force centrifuge rend le disque parfaitement plan, et la décharge y produit des trous microscopiques. En même temps un diapason marque ses vibrations sur le disque de manière qu'on peut évaluer, en  $\frac{1}{50000}$  de seconde, le temps écoulé entre les décharges élémentaires. Voici les résultats de 3 expériences faites avec une grande bobine de Ruhmkorff : 1<sup>o</sup> Entre deux pointes de platine distantes de 1<sup>mm</sup>, sans condensateur, la décharge fut composée de deux parties : la première, qui dura  $\frac{1}{23}$  de seconde et produisit 33 trous de plus en plus rapprochés, les deux derniers l'étant 2 fois plus que les deux premiers ; la seconde qui dura  $\frac{1}{300}$ , et donna 30 trous, plus serrés au milieu qu'aux extrémités de la série. 2<sup>o</sup> Les deux pointes communiquant avec une bouteille de Leyde de 212<sup>cm</sup> carrés de surface armée, la décharge dura  $\frac{1}{24}$ , et se composa de 91 décharges partielles donnant chacune de 2 à 4 petits trous. 3<sup>o</sup> Les pointes ayant été remplacées par des boules de laiton de 1<sup>cm</sup>, la durée fut encore de  $\frac{1}{24}$ , mais il n'y eut plus que 71 décharges partielles.

**2258. Oscillations du courant induit.** — Le phénomène de l'étincelle

<sup>1</sup> Arch. Néerlandaises des sciences, t. VI, p. 292, et Journ. de phys., t. I, p. 439.

<sup>2</sup> Journal de physique, de M. d'Almeida, t. II, pp. 252 et 267.

<sup>3</sup> Journal de physique, de M. d'Almeida, t. IV, p. 155.

multiple de la bobine semble lié à des oscillations que présente souvent la décharge induite pendant sa courte durée, oscillations qui durent quelques dix millièmes de secondes, et pendant lesquelles le courant est alternativement inverse et direct. M. Borstein a constaté ce résultat au moyen de l'appareil (fig. 1555)<sup>1</sup>. B est l'hélice inductrice recevant le courant d'une pile P, et I l'hélice induite, dont le fil aboutit à l'axe de rotation d'un disque de laiton D, faisant 8 à 10 tours par seconde. Ce disque porte une pointe *a*, qui, à chaque tour, ferme le circuit induit pendant un instant très-court en touchant un fil fin de cuivre *c*. Sur le diamètre *aD* sont deux autres pointes *p*, *p'* qui ferment le circuit inducteur quand elles affleurent le mercure contenu dans deux auges courbes communiquant avec le fil de la bobine B. La pointe *a* peut être un peu déplacée au moyen d'une vis micrométrique, de manière à faire varier le temps *t* écoulé entre la clôture du courant inducteur et celle du courant

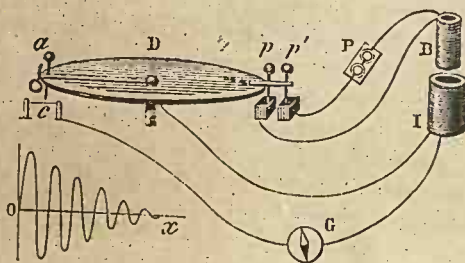


Fig. 1555.

induit. Un rhéomètre induit, par l'arc d'impulsion de son aiguille, l'intensité et le sens du courant induit pendant la durée de la clôture du circuit en *ac*.

En représentant les intensités par les ordonnées d'une courbe dont les abscisses représentent les valeurs de *t*, on obtient une courbe sinueuse telle que *Ox*.

M. N. Schiller<sup>2</sup> a observé les oscillations, au moyen de l'interrupteur de M. Helmholtz, qui consiste en un lourd pendule qui descend d'une hauteur constante, et rencontre vers le bas de sa course, deux taquets dont la distance peut être modifiée au moyen d'une vis micrométrique. En rencontrant le premier, le pendule ouvre le circuit inducteur, et en rencontrant le second, il sépare le rhéomètre, du condensateur et de la bobine induite. On peut ainsi mesurer la charge du condensateur un certain temps après la naissance du courant induit, temps que l'on peut aussi évaluer.

**2259. Stratification de la lumière électrique.** — Nous avons déjà cité (1694) la stratification de la lumière électrique dans l'air raréfié. Ce phénomène a été observé pour la première fois par M. Abria, au moyen de la décharge d'induction dans l'œuf électrique<sup>3</sup>. Plus tard, après l'invention de la bobine de Ruhmkorff, Grove, dans des recherches sur les taches que produit la décharge

<sup>1</sup> *Annales de Poggendorff*, t. CXLII, p. 54, et *Journal de physiq.* de M. d'Almeida, t. I, p. 77.

<sup>2</sup> *Annales de Poggendorff*, t. CLII, p. 535, et *Jour. de phys.* de M. d'Almeida, t. IV, p. 88.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 478.

de cet appareil sur des plaques métalliques disposées à l'électrode positive ou négative, fut conduit à expérimenter dans l'air très-raréfié contenant diverses vapeurs, et il vit, dans le vide fait sur du phosphore, la lueur qui joignait les deux boules divisée en couches minces transversales brillantes, séparées par des couches sombres continuellement agitées<sup>1</sup>. Ce phénomène était observé vers la même époque, par Ruhmkorff et par M. Quet, dans le vide fait sur la vapeur d'alcool, et dans des conditions de netteté inconnues jusque-là, et c'est depuis qu'on le désigne sous le nom de *stratification* de la lumière électrique.

M. Quet a fait une étude attentive de la lumière stratifiée, et il a montré qu'elle se manifeste quand on ne fait passer qu'un seul courant induit, en soulevant à la main le marteau de l'appareil d'induction<sup>2</sup>. Pour obtenir de belles stratifications, M. Quet fait le vide dans l'œuf électrique contenant des vapeurs d'esprit de bois ou d'essence de térébenthine, d'alcool, d'huile de naphte, de bichlorure d'étain, etc., ou enfin renfermant du fluorure de calcium; puis, il fait communiquer les électrodes *a* et *b* (fig. 1556) avec les colonnes de l'appareil de Ruhmkorff, et il soulève le marteau avec la main, de manière à ne faire passer qu'un courant induit à la fois. On voit alors les stratifications se dessiner nettement, sans être gênées par les mouvements vibratoires ou gyrotoires qui se produisent quand le marteau oscille rapidement. La boule positive *b* est enveloppée, ainsi que sa tige, de trois couches de lumière violette, dont la seconde est beaucoup plus sombre que les deux autres; puis vient un espace obscur, et enfin des couches alternativement rouges et sombres qui s'étendent jusqu'à la boule positive. Ces couches sont d'autant plus épaisses que les gaz sont plus raréfiés. Elles sont ordinairement courbes; mais M. Quet en a obtenu de sensiblement planes dans un récipient cylindrique à essence de térébenthine. Du reste, les apparences de la lumière stratifiée, le nombre et l'épaisseur des couches, dépendent de la nature des vapeurs employées et de la tension du courant induit. Dans le vide fait sur le fluorure de silicium, le pôle négatif est entouré d'une lumière jaune; et le pôle positif de lumière blanche, dans la vapeur d'essence de térébenthine. Avec 30 couples et l'adjonction d'un condensateur, il n'y a plus de stratifications, et l'œuf semble rempli d'une flamme de teinte uniforme.

**2260. Tubes de Geissler.** — L'aspect des stratifications dépend beaucoup de la forme des récipients. Ce résultat se voit facilement dans les tubes de Geissler (1694), tubes à ampoules de formes très-variées, fermés hermétiquement



Fig. 1556.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVII, p. 376.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Ac. des sc. de Paris*, t. XXXV; *Ann. de ch. et de ph.*, 3<sup>e</sup> s., t. LXV.

à la lampe, après qu'on y a fait le vide, en y laissant des traces de vapeurs diverses. La figure 1557 en représente un modèle posé sur un support R. Les extrémités du fil induit sont mises en communication, par les bornes d'attache B et A, avec des fils de platine  $r'$ ,  $r$  scellés dans le verre. Les strates sont ordinairement convexes vers le fil négatif  $r'$ , qui est enveloppé d'une auréole mince et brillante, autour de laquelle s'étend une lumière douce et sans stratifications. Les strates sont d'autant plus brillantes et plus épaisses que le tube est plus étroit au point où on les observe. En même temps, les parois du tube présentent un éclat particulier, désigné sous le nom de *fluorescence*, dont nous parlerons dans l'optique. — On a beaucoup varié les effets en enchâssant dans le

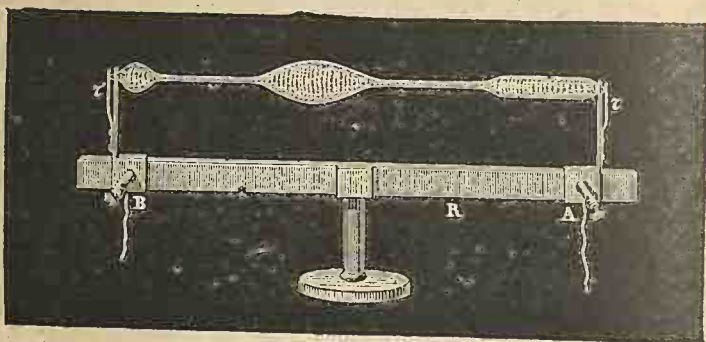


Fig. 1557.

tube principal d'autres tubes plus ou moins contournés et formés de différentes sortes de verre prenant différentes couleurs, par fluorescence, sous l'influence du flux électrique qui les traverse.

M. Gassiot a étudié les stratifications, au moyen de tubes de Geissler dans lesquels il faisait le vide après les avoir remplis de divers gaz<sup>1</sup>. Ces tubes contenant des traces de vapeurs de mercure, il obtenait un vide plus parfait en y introduisant un peu de potasse caustique, et les remplissant d'acide carbonique qu'il enlevait ensuite. En chauffant plus ou moins, il rendait plus ou moins complète l'absorption du gaz par la potasse, et pouvait opérer sous des pressions graduées à volonté. Il reconnut ainsi que les stratifications, qui partent du fil positif, s'étendent de plus en plus vers le fil négatif, et deviennent plus distinctes à mesure que le vide est plus parfait; puis, quand l'absorption du gaz est complète, il n'apparaît plus de lumière, *le vide ne laissant pas passer l'électricité* (1695). Au lieu d'employer l'étincelle d'induction, M. Gassiot a aussi employé celle de sa pile à eau de 3,520 auges isolées (1845), ou une pile de Grove de

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIV, p. 243, et t. LV, p. 241.



400 couples, et il a obtenu la stratification dans le tube vide d'acide carbonique, quand il y faisait passer le courant, par étincelles de 5<sup>cm</sup> de longueur. — On a remarqué, M. Riess entre autres, que, lorsqu'on approche un corps conducteur d'une partie renflée des tubes de Geissler, la lumière est attirée, et que l'on entend un pétillement produit par de petites étincelles qui jaillissent entre ce corps et le verre; il y a donc électrisation par influence de la surface extérieure du verre, et l'on peut, au moyen du plan d'épreuve, reconnaître qu'une partie du tube, électrisée positivement, est séparée de l'autre, électrisée négativement, par une ligne neutre, placée au milieu si le tube a une forme symétrique. L'espace sombre qui existe autour du fil négatif ne donne que des signes très-faibles d'électricité.

**2261. De la cause des stratifications.** — M. Gaugain a fait beaucoup d'expériences pour expliquer la stratification de la lumière électrique<sup>1</sup>. Ayant remarqué que, dans un récipient bien nettoyé, avec les boules et les tiges de cuivre polies et non vernies, il n'y a pas de stratifications; que, dans le vide fait dans une vapeur *combustible*, il y a des stratifications qui finissent par disparaître si l'expérience se prolonge; et que, dans un mélange d'air et de vapeur combustible, les couches sont d'autant plus nombreuses et plus minces, et persistent d'autant plus que l'air contient plus de vapeur; il a admis que les stratifications sont dues à la combustion des vapeurs. Il cherche à prouver que les couches sont formées de matière pondérable, en montrant qu'elles s'abaissent toutes ensemble au moment où l'on aspire le gaz par le robinet inférieur, et qu'elles remontent et semblent s'entasser près de la boule supérieure, quand on laisse rentrer un peu d'air.

Grove n'adopte pas cette explication. Il montre d'abord que les stratifications dépendent de la manière dont se fait la rupture du circuit inducteur; le manche du marteau étant appuyé sur un ressort flexible, les couches lumineuses sont d'autant plus minces et plus nombreuses que le ressort sur lequel s'appuie le manche du marteau est moins rigide. C'est que la rupture ne se fait pas aussi brusquement qu'on pourrait le croire; elle est accompagnée de quelques oscillations, pendant lesquelles le courant induit éprouve des intermittences d'intensité très-rapides, et c'est à ces intermittences qu'il attribue les stratifications. Pour rompre le circuit aussi brusquement que possible, Grove le ferme avec deux gros fils de cuivre croisés, et fait glisser très-rapidement l'un d'eux jusqu'à ce que son extrémité quitte l'autre. Alors, le plus souvent, il n'y a plus de stratifications.

MM. Quet et Séguin ont fait un grand nombre d'expériences, qui les ont conduit à repousser cette explication<sup>2</sup>. Ils font d'abord remarquer qu'un écoulement intermittent de l'électricité ne pourrait laisser voir des strates, car le déplacement est tellement rapide que l'impression sur l'œil ne pourrait former

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XL, p. 1036.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXV, p. 317.

qu'une lueur continue. Ils ont ensuite constaté que la décharge d'une bouteille de Leyde, quand elle n'est pas trop forte, donne des stratifications, et M. Feddersen a démontré que cette décharge est continue quand le circuit ne présente que de faibles résistances. Tout ce qui modifie la tension intérieure dans le récipient à vapeurs raréfiées, comme l'approche de corps conducteurs, y modifie la distribution de la lumière. Grove, en ménageant dans le circuit induit une interruption traversée par des étincelles, obtenait de la lumière, soit stratifiée, soit continue. MM. Quet et Séguin, qui ont répété cette expérience, ont constaté de plus que le récipient pouvait être en partie remplie de lumière stratifiée, du côté du pôle positif, et en partie de lumière continue, ce qui montre que les deux états peuvent coexister.

En partant de ces principaux faits, MM. Quet et Séguin ont expliqué ainsi les stratifications : l'électricité positive, arrivant à l'une des extrémités de la colonne, électrise d'abord une couche de gaz ; celle-ci agit par influence sur la suivante et la partage en deux zones : l'une négative, la plus rapprochée, l'autre positive. Cette seconde zone positive agit de même sur la couche gazeuse suivante, et ainsi de suite, et, l'action de l'électrode négative ajoutant son effet à l'autre extrémité, la colonne est divisée en zones alternativement positives et négatives, comme cela a lieu dans les médiocres conducteurs (1645). Mais, ici, la mobilité des gaz complique le phénomène et détermine des changements de densité dans les différentes couches. Le gaz, électrisé positivement autour de l'électrode, attire la zone négative contiguë, de manière à produire une couche condensée, et une couche dilatée entre cette zone négative et la seconde zone positive qui la suit, et ainsi de suite ; la colonne sera donc divisée en couches alternativement condensées et dilatées, dans lesquelles les décharges électriques se feront dans des conditions inégales, d'où les aspects lumineux différents des couches alternatives. Pour étayer cette théorie, les mêmes physiciens ont produit des zones transversales sur une couche de poussière de plombagine, étendue sur une bande de verre bien desséchée et isolée, traversée par les décharges induites.

**2262. Soupapes électriques.** — M. Gaugain a remarqué, en 1855<sup>1</sup>, que si l'on garnit de gomme laque l'une des boules de l'œuf électrique, ainsi que la tige qui la porte, en ne laissant qu'un point à découvert, et qu'on fasse arriver par cette boule les courants induits directs, qui seuls traversent le vide (2254), l'aiguille d'un rhéomètre placé dans le circuit se dévie de plus en plus à mesure que le vide est plus complet ; mais, si les courants induits vont de la boule nue à la boule vernie, quand la pression descend au-dessous d'une certaine limite, la déviation décroît, devient nulle, et finit par changer de signe. Les courants, qui passent librement de la boule vernie à la boule nue, semblent donc, sous une certaine pression, ne pouvoir traverser l'œuf, de la boule nue à la boule vernie ; l'œuf, ainsi disposé, se comporte donc par rapport à l'électricité comme une *soupape* par rapport aux fluides pondérables.

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XL, p. 640.

M. Riess forme une soupape électrique au moyen d'un tube de verre de 4<sup>cm</sup> de diamètre sur 10<sup>cm</sup> de longueur, fermé à une extrémité par une garniture métallique, et à l'autre par une plaque de verre traversée en son centre par un fil de platine qui affleure en dedans. A ce fil est opposé, dans l'intérieur du tube, un disque de laiton, à une distance de 2 à 3<sup>mm</sup>. La pression étant de 2<sup>mm</sup>, 25 à 4<sup>mm</sup>, 5, cette soupape sépare nettement les deux courants induits, ne laissant passer que celui qui va du disque au fil de platine.

Pour expliquer l'effet des soupapes, M. Riess constate d'abord qu'il dépend, non de la forme, mais de la différence d'étendue de la surface des électrodes. Il remarque ensuite qu'une décharge est toujours précédée d'une électrisation de l'air qui les enveloppe, électrisation souvent indiquée par des lueurs signalées par Faraday. Cet air électrisé agit par répulsion pour empêcher la décharge; mais, s'il se présente aussitôt une décharge en sens contraire, celle-ci est, au contraire, favorisée par la présence de l'air électrisé, et passe avec facilité. Or, l'expérience indique que, dans les gaz raréfiés, la lueur négative se produit plus facilement que la positive. Le passage d'un courant se présentant au disque de laiton par la partie négative, sera donc le plus entravé par l'air préalablement électrisé; le passage du courant en sens inverse, qui se présente presque simultanément, sera, au contraire, favorisé. Il y a bien un effet semblable à l'extrémité du fil de platine; mais, comme la surface est très-petite, il est insensible, et le passage se fait le plus facilement quand le courant marche de la surface la plus grande à la plus petite<sup>1</sup>.

Nous avons déjà cité plusieurs cas de l'influence du sens du courant sur la facilité de son passage, mais dans des circonstances différentes où d'autres causes interviennent. Nous avons vu l'étincelle jaillir plus facilement entre deux boules inégales quand la plus petite est positive (1685), un courant être presque totalement intercepté par un voltamètre quand il va d'une lame d'aluminium à une lame de platine (1965). — M. Andrews a reconnu qu'une flamme de charbon laisse plus facilement passer un courant induit descendant dans la flamme, que montant. Il en est de même des flammes de gaz, d'alcool, et de la colonne de vapeur qui s'élève de la lampe sans flamme (II, 1293). On remarque aussi que les effets lumineux, dans les tubes de Geissler, dépendent souvent du sens dans lequel les courants les traversent.

**Tubes de Holtz.** — Ces tubes produisent des effets qui se rattachent à ceux des soupapes électriques. Ce sont des tubes de Geissler divisés en compartiments par des cloisons de verre en forme d'entonnoirs ayant tous leur bec tourné du même côté, comme on le voit dans le double tube (fig. 1558). Ces tubes ont la propriété de laisser passer plus facilement les courants qui entrent par les becs, que ceux qui entrent par la base. La différence de résistance dans les deux sens, est assez grande pour que le courant de la bobine de Ruhmkorff ne passe que dans une des branches du système (fig. 1558), dans celle où le

<sup>1</sup> Ann. de Pogg., t. CXXXVI, p. 31, et Ann. de ch. et de ph., 4<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 482.

courant direct entre par les becs. M. Poggenдорff, qui a fait de nombreuses expériences sur les tubes de Holtz<sup>1</sup>, a remarqué que, dans un de ses tubes simples, il y avait 4 stratifications dans chaque compartiment quand le courant entrait par les becs, et 5 quand il passait en sens contraire.

**2263. Usages de la lumière stratifiée.** — M. Plucker a étudié l'action des aimants sur la lumière stratifiée, et il a reconnu qu'elle est attirée ou repoussée, comme l'arc voltaïque, par les électro-aimants (1951). Mais ce qu'il y a de curieux, c'est qu'il a pu obtenir des *courbes magnétiques*, non pas dans un plan, comme dans le *sceptre magnétique*, mais dans l'espace. Pour cela, il engage entre les pôles d'un électro-aimant, la sphère négative (*fig. 1558*), dans laquelle s'enfonce jusqu'au centre un fil de platine garni de verre, excepté à son extrémité. Dès que l'électro-aimant est en activité, la lueur uniforme qui remplit cette sphère dessine des lignes magnétiques brillantes dont la couleur dépend de la nature de la vapeur sur laquelle est fait le vide. Comme la résultante des actions d'un aimant sur un élément de courant est proportionnelle au

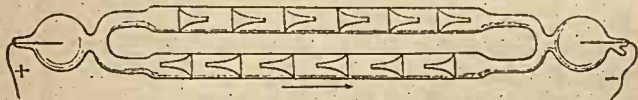


Fig. 1458.

sinus de l'angle que fait l'élément avec cette résultante (2121), on voit qu'il y aura équilibre quand l'angle sera nul ; les courbes magnétiques jouissent donc de la propriété d'être tangentes à chaque point, à la direction de la résultante en ce point<sup>2</sup>.

De La Rive a répété, au moyen des courants induits traversant le vide fait sur diverses vapeurs, ses expériences sur la rotation des filets lumineux dans le vide sous l'influence d'un aimant longitudinal, expériences qui lui ont servi d'argument pour sa théorie des aurores polaires (1794). M. Plucker a expliqué cette rotation par les lois de l'électrodynamique, et de La Rive est revenu plusieurs fois sur le même sujet, seul puis en collaboration avec M. E. Sarasin<sup>3</sup>. L'appareil employé est double, et composé de deux cylindres de verre disposés comme le récipient de la figure 1238 (1794). Chaque cylindre est fermé en dessus par une plaque de laiton munie d'un robinet, et posé sur un pôle d'un électro-aimant. On fait jaillir la décharge d'une bobine de Ruhmkorff entre la plaque supérieure et une boule de cuivre placée dans l'axe du cylindre. On a trouvé avec cet appareil que la vitesse de rotation des filets lumineux, est à peu près en raison inverse de la pression du gaz et de sa densité propre. Ce mouvement

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 482.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LIV, p. 230.

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. II, p. 421.

est accompagné d'une rotation du gaz qui peut être communiquée à un petit tourniquet intérieur.

**2264. Applications de la bobine de Ruhmkorff.** — MM. du Moncel et Liais ont eu l'idée de se servir de la bobine pour allumer au loin le gaz d'éclairage, en faisant jaillir l'étincelle qu'elle fournit entre deux fils de platine disposés en avant du bec, et soudés à l'extrémité de longs fils de cuivre. Le premier essai a été fait à la mire de nuit de l'Observatoire de Paris. La bobine et le robinet réglant la sortie du gaz, étaient placés dans une des salles de l'établissement, d'où l'on pouvait allumer la mire et l'éteindre, à volonté. Depuis longtemps, on emploie le même procédé, en Amérique, pour allumer le gaz dans les salles de réunion; et il a été appliqué, en 1873, à la salle de l'Assemblée nationale de Versailles, pour allumer simultanément les 63 becs composant chaque lustre, les mêmes courants d'induction donnant des étincelles entre 63 petites interruptions. On voit (fig. 1559) la disposition d'un bec. Les courants induits passent par les fils *a*, *c*, et les étincelles jaillissent en *o*, entre deux pointes de platine séparées par un espace de  $\frac{2}{3}$  mm, à travers le gaz, qui s'enflamme aussitôt. En appuyant sur différents boutons placés près de la bobine, on fait passer les décharges induites par les différents lustres. Les appareils ont été construits par M. Gaiffe, et la pile équivalait à 3 couples de Bunsen. A Londres, on a fait des essais pour allumer les becs de gaz des rues par le même moyen.

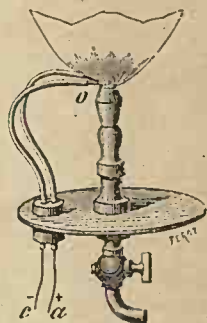


Fig. 1559.

M. Trève a appliqué le même procédé aux signaux de nuit que l'on fait en mer avec des fanaux, que l'on hisse ou descend suivant les signes que l'on veut former. Ces manœuvres sont longues et difficiles quand le vent est fort. M. Trève laisse les fanaux à poste fixe, les fait communiquer par des tubes de caoutchouc, avec un réservoir de gaz, et les allume à volonté au moyen de l'étincelle de la bobine de Ruhmkorff, ou les éteint instantanément au moyen de robinets placés tout près de cette bobine.

**Éclairage dans les mines.** — On commence dans certaines mines de houille, à s'éclairer au moyen des étincelles d'induction. Un petite bobine, qu'un ouvrier peut porter sur son dos, avec sa pile, illumine un tube de Geissler à circonvolutions nombreuses répandant une lumière suffisante pour le travail du mineur, et ne pouvant enflammer le *grisou*. Le tube est protégé par un manchon de verre épais. Du reste, s'il était brisé, l'interposition de l'air-entre les électrodes empêcherait la décharge de se faire à une aussi grande distance.

**Explosion des mines.** — Pour enflammer la poudre dans les fourneaux de mine, on emploie des tubes en toile ou *saucissons*, remplis de poudre, communiquant, à la surface du sol, avec une trainée de poudre, à l'extrémité de

laquelle est allumé un long morceau d'amadou qui ne s'enflamme qu'après un temps donné. Cette méthode présente plusieurs sortes de dangers. En outre, il est souvent important d'enflammer plusieurs mines au même instant, afin d'obtenir des ébranlements simultanés et, par suite, plus efficaces. Enfin, quand il s'agit de mines monstres, comme celles que MM. Dussaud et Rabattu ont employées à Alger, et plus récemment au bassin du port de Cherbourg, où ils ont pu détacher d'un seul coup 50,000 mètres cubes de roche, il arrive souvent que la poudre ne s'enflamme pas en totalité, et que l'effet est considérablement affaibli.

Tous ces inconvénients disparaissent quand on emploie l'électricité. M. Hare a d'abord pensé à faire rougir, au moyen d'un courant, un fil de platine plongé dans la poudre, idée que M. Roberts a rendue pratique. Mais il faut un grand nombre de couples, à cause de la grande longueur que doit avoir le circuit. M. du Moncel a proposé, le premier, d'employer l'étincelle de la bobine de Ruhmkorff, recevant le courant d'un seul couple, ou celui d'une machine magnéto-électrique. Mais la puissance calorifique des étincelles d'induction est trop faible pour enflammer la poudre. Ruhmkorff a levé la difficulté au moyen des fusées que venait d'imaginer M. Statham en voyant des étincelles passer à travers une fissure qui s'était formée dans l'enveloppe du câble télégraphique sous-marin de Calais à Douvres. Pour confectionner ces fusées, on prend deux fragments de fil de cuivre garni de gutta-percha *f, f'* (fig. 1560); on les entortille et on les recourbe de manière à rapprocher leurs extrémités *o* dépouillées de l'enveloppe isolante. On fait ensuite entrer ces extrémités dans un bout de tube en gutta-percha vulcanisée, c'est-à-dire soufrée, que l'on a enlevé d'un fil de cuivre qu'il recouvrait depuis longtemps, et qui y a laissé un dépôt de sulfure de cuivre. Dans ce tube est pratiquée une échancrure qui permet de voir en *o* les extrémités des fils, *f, f'*. On garnit ces extrémités de fulminate de mercure, on remplit l'échancrure de poudre et on l'enfonce dans une cartouche remplie de poudre. L'étincelle d'induction enflamme le sulfure de cuivre, et détermine l'explosion de la poudre. Il faut toujours essayer d'avance la fusée, car s'il n'y avait pas assez de sulfure, l'inflammation pourrait ne pas avoir lieu, et s'il y en avait trop, le courant induit passerait sans étincelles à travers cette substance. Dans les expériences faites à la Villette par Ruhmkorff et M. le colonel Verdu, on put enflammer la poudre à une distance de 26,000 mètres, soit avec un circuit formé de deux fils, soit en remplaçant un des fils par la terre.

On peut faire partir plusieurs mines en même temps, mais 4 ou 5 seulement, les solutions de continuité affaiblissant les courants. Le capitaine Savare a alors imaginé de faire communiquer chaque mine avec un circuit principal, au moyen de fils de dérivation. Les extrémités *o* du fil de la fusée sont en alliage fusible. L'étincelle jaillit d'abord là où elle trouve le moins de résistance; l'explosion

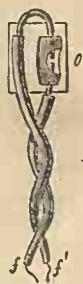


Fig. 1560.

fond l'alliage, et les courants induits sont forcés de passer par une autre mine, et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes aient éclaté dans un temps très court.

M. du Moncel emploie une disposition plus sûre : chaque fourneau de mine communique, d'une part avec un fil commun adapté à la bobine de Ruhmkorff, et d'autre part avec un distributeur formé d'une roue de gutta-percha, commandée par un ressort de pendule. Le contour de cette roue porte des plaques métalliques en relation avec des bandes annulaires placées sur les faces, et sur lesquelles s'appuient des languettes communiquant chacune avec un fourneau. Un ressort appuyé sur le contour de la roue, communique avec l'appareil d'induction. Quand la roue tourne, le courant induit est lancé dans le circuit qui aboutit à la plaque que touche le ressort. Il suffit donc de retirer un cliquet qui retient la roue, pour qu'elle tourne vivement, et que les explosions se fassent successivement dans toutes les mines, avec une rapidité telle qu'on peut les regarder comme simultanées.

#### VII. Appareils d'induction magnéto-électriques. — Générateurs dynamo-électriques.

**2265. Machine de Pixii.** — On a imaginé des appareils, nommés *machines* ou *générateurs magnéto-électriques*, au moyen desquels on développe par induction, de l'électricité en assez grande quantité pour en obtenir tous les effets propres à cet agent, tant à l'état statique qu'à l'état dynamique, et c'est même là le moyen le plus économique de se procurer de l'électricité pour les besoins de l'industrie. Le premier appareil magnéto-électrique a été construit par H. Pixii, en 1832 ; voici en quoi il consiste.

Un aimant en fer à cheval *aco* (fig. 1561) peut recevoir un mouvement de rotation autour d'un axe vertical *co*, d'une roue *r* et d'un pignon denté. Les pôles de l'aimant rasant, sans les toucher, les extrémités du fer doux d'un électro-aimant AB, dont le fil de cuivre est destiné à recevoir les courants induits, et dont les bobines se nomment *bobines d'induction*. Quand les pôles *a* et *b* de l'aimant (fig. 1562) s'approchent des extrémités *c*, *c'* de l'électro-aimant, il se produit dans le fil de ce dernier, un courant induit, inverse par rapport aux courants d'Ampère de l'aimant.

Ce courant augmente d'intensité à mesure que la distance diminue, et son maximum a lieu à l'instant où les pôles de l'aimant arrivent en face des extrémités *c*, *c'*. Les ordonnées de la courbe *AmB* représentent ces variations

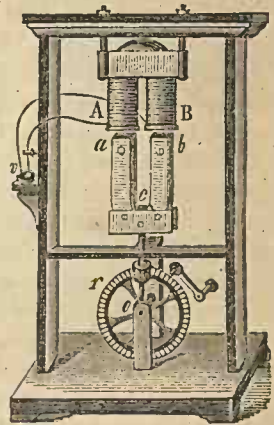


Fig. 1561.

d'intensité. — Quand les pôles s'éloignent ensuite en  $a'b'$ , il se produit un courant induit direct, par conséquent de sens contraire au précédent, et dont l'intensité diminue à mesure que la distance augmente, comme le représente la courbe  $BnC$ . Les pôles de l'aimant, après avoir tourné de  $90^\circ$ , s'approchent de nouveau des branches du fer doux, en  $b''a''$ , et produisent un courant induit négatif, mais de sens contraire au premier  $AmB$ , les pôles de l'aimant ayant changé de place. Ce troisième courant est donc de même sens que le second  $BnC$ , dont il est comme la continuation, et auquel il se superpose en partie : car le pôle  $a'$  se rapproche de  $c'$  en même temps qu'il s'éloigne de  $c$ , de sorte que le maximum d'intensité a lieu quand la ligne des pôles de l'aimant est perpendiculaire à celle de l'électro-aimant. La courbe  $BoD$  représente les intensités du courant résultant de la superposition des deux courants successifs. Le courant induit qui aura lieu ensuite, au moment de l'éloignement des pôles,  $b''$ ,  $a'''$ , devant être de sens contraire au précédent, sera  $DrE$ , de même sens que le premier  $AmB$ . On voit donc qu'il y aura à chaque tour, quatre courants

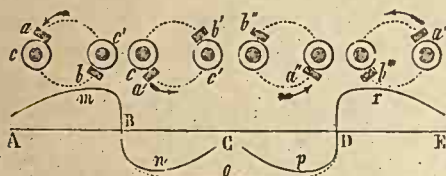


Fig. 1562.

induits, les deux moyens marchant dans un même sens, et les deux extrêmes dans le sens opposé. Si donc la rotation est assez rapide pour qu'il n'y ait pas d'interruption sensible entre deux courants consécutifs de même sens, comme il est représenté en  $BoD$ , et si l'on commence à compter les tours

en B, au moment où l'aimant s'écarte de l'électro-aimant, on ne trouvera à chaque révolution que deux courants se succédant en sens contraire.

On peut, au moyen de l'appareil de Pixii, obtenir des étincelles, donner des commotions, faire rougir un fil de platine, décomposer l'eau... Tous ces effets s'obtiennent de la même manière, au moyen de l'appareil de Clarke (2266); nous renverrons donc le détail des expériences à l'étude de ce dernier appareil. Disons seulement que, dans la décomposition de l'eau, comme le courant marche alternativement dans les deux sens, on recueille à chaque électrode un mélange d'oxygène et d'hydrogène. Pour avoir les gaz séparés, Pixii employait un commutateur analogue à celui d'Ampère (2147), seulement les arcs s'appuyaient sur des ressorts au lieu de plonger dans du mercure. La bascule, mue par un excentrique fixé à l'arbre tournant, renversait le courant au moment où il changeait de sens dans l'électro-aimant, de manière à lui conserver une direction constante dans la partie du circuit contenant le voltamètre. On emploie aujourd'hui le commutateur de Ruhmkorff, que l'on fixe à l'arbre tournant.

**2266. Machines de Saxton et Clarke.** — Dans la machine de Saxton (fig. 1563), l'aimant  $AA'$  est fixe et horizontal, et l'électro-aimant  $EE'$  est mis en rotation par la roue R, en présence des pôles de cet aimant, autour d'un axe



horizontal auquel aboutissent les extrémités du fil induit; ce qui permet de renverser facilement le courant au moyen d'un commutateur *nr*.

La machine de Clarke est une modification de celle de Saxton. Elle est représentée en perspective (*fig. 1564*), et en coupe (*fig. 1565*), sous la forme qu'on lui donne le plus souvent. *AA'* est un fort aimant maintenu par une traverse *tt, t'*, contre des vis qu'on enfonce plus ou moins dans une table verticale *TT, T'*, pour régler la position de l'aimant. L'électro-aimant *aa* est mobile autour d'un axe horizontal qui passe entre les branches de l'aimant. *a' a'* (*fig. 1564*) est la coupe d'un autre électro-aimant à fil plus court, pouvant se substituer au premier. Les extrémités libres des branches de l'électro-aimant rasant, sans la toucher, la surface de l'aimant; elles sont réunies par une bande de cuivre qui porte en son milieu une vis qu'on adapte à un écrou pratiqué dans l'arbre *oo'*. Cet arbre reçoit un mouvement de rotation, de la roue *R, R'*, (*fig. 1564* et *1565*) et d'une corde sans fin passant sur la poulie *p*. Les extrémités du fil de l'électro-aimant sont soudées, l'une à un arbre

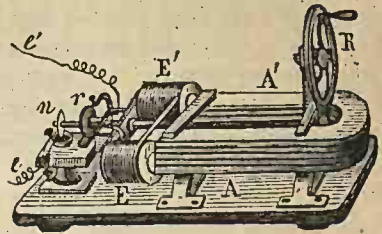


Fig. 1563.

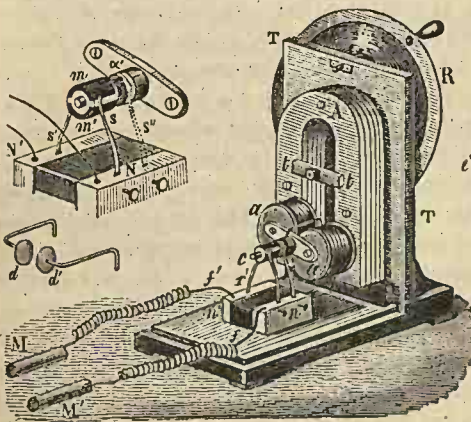


Fig. 1564.

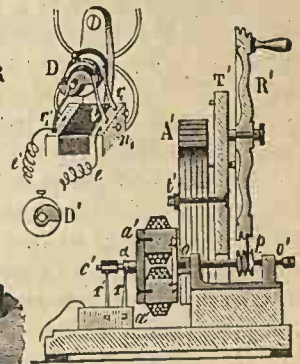


Fig. 1565.

métallique *c, c'* fixé au milieu de la bande de fer *aa, a' a'*, qui forme la culasse de l'électro-aimant, l'autre à un anneau métallique, *α*, isolé de l'arbre par une virole d'ivoire. Le circuit est fermé quand l'anneau *α* est réuni à l'arbre *c, c'* par un arc métallique. Au-dessous de l'arbre *c, c'*, sont deux plaques de laiton *n, n'* (*fig. 1564*), isolées par du bois, et qui portent des ressorts, dont un, *r* (*fig. 1565*),

s'appuie sur l'anneau  $\alpha$ , et dont l'autre,  $r'$ , communique avec l'arbre, par l'intermédiaire de pièces diverses fixées à cet arbre. De cette façon, les extrémités du fil induit sont en  $n$  et  $n'$  (*fig.* 1564), et l'on ferme le circuit en réunissant les deux plaques.

**Commotion.** — Pour éprouver la commotion de la machine de Clarke, on enfonce dans des trous pratiqués dans les plaques  $n$ ,  $n'$ , des fils de cuivre  $f$ ,  $f'$  (*fig.* 1564) terminés par des cylindres de métal, ou *manipules*,  $M$ ,  $M'$ , que l'on prend dans les mains mouillées d'eau salée ou acidulée, pour rendre l'épiderme conducteur. On ressent une commotion à chaque changement de sens des courants induits. Mais, les bras conduisant assez mal, ces courants induits et, par suite, les commotions sont faibles. Pour les rendre plus intenses, les ressorts  $r$ ,  $r'$  (*fig.* 1565) étant toujours en communication, l'un,  $r$ , avec l'anneau  $\alpha$ , l'autre,  $r'$ , avec le cylindre  $c$  (*fig.* 1564), on fixe à ce cylindre, au moyen d'une vis de pression, une pièce de rupture en métal, ou *disjoncteur*, représentée à part en  $D$  (*fig.* 1565). Une languette métallique  $l$  s'appuie sur le disjoncteur, qui est disposé de manière que la languette  $l$  cesse d'en toucher les parties renflées, au moment où les branches de l'électro-aimant arrivent dans la position verticale; ce qui a lieu deux fois à chaque tour. Alors le circuit est interrompu en  $l$ , et cela au moment où le courant induit atteint son maximum d'intensité. Tant que la languette  $l$  touche le disjoncteur, le courant induit passe par  $r_1$ ,  $n_1$ ,  $l$ , trajet dans lequel il trouve peu de résistance; mais, au moment où le circuit est interrompu en  $l$ , le courant, arrivé à son maximum, n'ayant pas d'autre issue se précipite dans l'arc de dérivation  $e$ ,  $e'$  dont fait partie l'observateur, qui reçoit alors une forte commotion augmentée de l'effet de l'extracourant (2223). La commotion se répète ainsi deux fois à chaque tour. Elle est très-forte quand le fil de l'électro-aimant, long et fin; présente une résistance, comparable à celle qu'oppose l'arc de dérivation. On donne ordinairement à ce fil, de 1200 à 1500 mètres de longueur; les commotions sont alors insupportables, même quand les mains ne sont pas mouillées. Elles ont pour effet de contracter les muscles et de faire serrer involontairement les manipules. On en augmente le nombre et l'intensité en tournant plus vite, et on peut les faire éprouver à plusieurs personnes formant la chaîne. — Quand on veut communiquer la commotion à différentes parties du corps, pour les applications médicales, on remplace les manipules par des cylindres métalliques contenant des éponges mouillées avec de l'eau salée, que l'on applique sur la peau.

**Actions chimiques.** — Si l'on met les fils  $f$ ,  $f'$  en rapport avec un voltamètre, l'eau est décomposée pendant la rotation. Mais, le courant changeant de sens à chaque demi-tour, chaque électrode reçoit un mélange d'oxygène et d'hydrogène; et si l'on tourne trop vite, ces gaz se recombinent en partie. Pour obtenir les gaz séparés, il faut ne laisser passer que les courants d'un même sens; pour cela, on emploie le disjoncteur  $D'$  (*fig.* 1565), qui ne touche le ressort  $l$  qu'une fois à chaque tour. Mais il vaut mieux renverser un des deux courants qui se suivent, de manière à leur donner le même sens dans la partie

extérieure du circuit. Pour cela, on adapte à l'arbre  $c$ , divers commutateurs. Le plus simple, représenté à part en  $mm'$  (fig. 1564), n'est autre chose que celui de Ruhmkorff (2147). L'une des plaques métalliques  $m$  communique avec l'anneau  $\alpha'$  auquel aboutit l'une des extrémités du fil induit; l'autre,  $m'$ , par une vis de pression, avec l'arbre  $c$ , auquel aboutit l'autre extrémité de ce fil. Des ressorts  $s, s'$  s'appuient sur ce commutateur, de manière à faire passer le courant dans les plaques  $N, N'$ , quand ces ressorts touchent les plaques  $m, m'$ , et à le renverser quand il change de sens dans le fil induit, au moment où l'électro-aimant passe par la position horizontale.

Si l'on fixe aux plaques  $N, N'$ , deux disques de platine  $d, d'$ , entre lesquels on interpose un morceau de papier de tournesol imbibé d'une solution saline neutre, le sel se décompose, et l'acide colore le papier.

Le commutateur  $mm'$  peut remplacer, pour les commotions, le disjoncteur  $D$ ; quand on ajoute un troisième ressort  $s''$ , qui s'appuie sur l'anneau  $\alpha'$ , de manière que le circuit est fermé par la plaque  $N$  quand le ressort  $s$  touche la plaque  $m'$ , et que le courant ne trouve d'autre passage que par l'arc de dérivation, quand il touche la plaque  $m$ .

#### Manière d'obtenir de l'électricité statique. —

On dispose sur l'arbre  $c$ , le disjoncteur  $D'$  (fig. 1565), et l'on fait communiquer un instant, pendant la rotation, les fils  $f, f'$  avec les armatures d'une bouteille de Leyde, en employant toutes les précautions indiquées ci-dessus (2251).

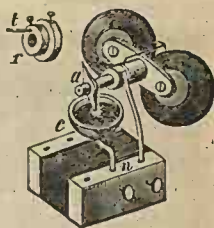


Fig. 1566.

**Étincelle.** — L'électro-aimant à long fil  $aa$  (fig. 1564) qui sert aux effets physiologiques et chimiques, et que l'on nomme *armature d'intensité*, ne convient pas aux effets physiques. On emploie alors l'électro-aimant  $a' a'$  (fig. 1565) nommé *armature de quantité*, dont le noyau est plus gros, et dont le fil moins fin, n'a que 40<sup>m</sup> de longueur. Si l'on fixe à l'arbre  $c'$  de cet électro-aimant, le disjoncteur  $D$ , on distingue de petites étincelles à l'extrémité de la languette  $l$ , au moment où les parties renflées la quittent. Pour en obtenir de plus brillantes, on adapte aux fils  $f, f'$  des pointes en plombagine, qu'on rapproche, et entre lesquelles on voit jaillir deux étincelles à chaque tour. — Il vaut mieux encore enlever le disjoncteur et le remplacer par un système de deux pointes,  $a$  (fig. 1566), dirigées suivant les pôles de l'électro-aimant. Pendant le mouvement de rotation, ces pointes plongent dans du mercure contenu dans une petite coupe métallique  $e$  fixée à la plaque  $n$ , ainsi que le ressort  $r$ . Chaque pointe donne une vive étincelle au moment où, sortant du mercure, le circuit est rompu. Cette étincelle peut enflammer de l'éther versé sur le mercure.

Si l'on remplace les pointes par la virole métallique  $r$ , à laquelle on peut adapter des tiges  $t$  de divers métaux; et la coupe  $e$ , par un ressort terminé par le même métal, et touchant à chaque tour la tige  $t$ , on obtient de petites étincelles dont la couleur dépend de la nature du métal.

**Actions magnétiques.** — Le commutateur  $mm'$  étant adapté à l'arbre  $c$  (fig. 1564), le courant de la machine peut agir sur un rhéomètre, et aimanter un petit électro-aimant.

**Actions calorifiques.** — On fixe aux plaques  $n'$  et  $n$  (fig. 1564) des fils de cuivre, entre lesquels est tendu un fil de platine fin et court; ce fil rougit pendant que l'appareil tourne très-vite, avec ou sans commutateur.

**2267. Influence de la vitesse.** — Quand on augmente la vitesse de rotation de la machine, on modifie l'intensité des effets produits, soit parce que les courants induits sont plus rapprochés, soit parce que chacun d'eux augmente individuellement de tension à cause de la rapidité plus grande avec laquelle l'aimant inducteur s'approche et s'éloigne des bobines d'induction. De La Rive a vu qu'il fallait pour dégager une certaine quantité de gaz, 462 ou 1050 courants indirects, suivant qu'il s'en produisait 28 ou seulement 14 par seconde.

M. Lenz et de La Rive ont constaté aussi qu'il y a un maximum de vitesse au-delà de laquelle les effets diminuent. Ce maximum dépend de la résistance du circuit induit, et diminue rapidement quand elle augmente. La pureté du fer influe aussi sur la vitesse qui correspond au maximum. On conçoit même que, s'il n'est pas parfaitement doux, il y aura une vitesse telle que, n'ayant pas le temps de s'aimanter et de rentrer à l'état neutre pendant chaque demi-tour, il n'y aura pas de courant induit.

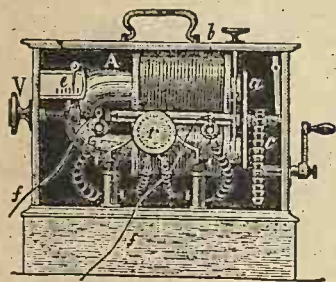


Fig. 1567.

**2268. Appareil de M. Breton, etc.**

— Les courants magnéto-électriques sont très-employés en médecine pour donner des commotions répétées. On a imaginé, pour cet usage spécial, des appareils plus commodes et moins volumineux que la machine de Clarke. La figure 1567 représente celui de M. Breton, dans lequel les courants sont excités par la méthode de Page (2189). Un barreau de fer doux  $a$  tourne rapidement en face des pôles d'un aimant  $A$ . Autour des branches de l'aimant sont enroulés les fils induits. Quand on ne veut employer que les courants d'un même sens, on introduit dans le circuit une roue  $r$  dont le contour est alternativement en bois et en métal, et qui tourne avec le barreau  $a$ . Ce mouvement est tel, que les courants d'un certain sens passent par les parties métalliques, tandis que les courants opposés sont interceptés par du bois. Pour graduer l'intensité des commotions, on éloigne plus ou moins l'aimant du barreau tournant, au moyen d'une vis de rappel  $V$ ; les distances sont indiquées sur l'échelle  $e$ . Une bague de fer doux suspendue au bouton  $b$  peut aussi être appliquée latéralement aux pôles de l'aimant, de manière à amortir, par son magnétisme opposé, l'effet de l'aimant sur le fer tournant. De plus, il y a deux fils enroulés sur les branches

de l'aimant : l'un gros et assez court, l'autre fin et beaucoup plus long, superposé au premier. Ces deux fils reçoivent de l'aimant des courants induits de même sens ; mais ceux du fil court donnent de faibles commotions, tandis que celles du fil fin sont très-énergiques, et d'autant plus que le mouvement de rotation est plus rapide.

Duchenne a construit un appareil électro-médical disposé d'une manière analogue au précédent, et qu'il nomme *appareil magnéto-faradique*. L'aimant en fer à cheval est entouré de deux bobines superposées : l'une formée d'un fil de cuivre de  $\frac{1}{2}$  mm de diamètre et de 24 m de longueur, l'autre d'un fil de  $\frac{1}{3}$  mm et de 600 m. On atténue la force des commotions en éloignant de l'aimant, au moyen d'une vis de rappel à tête divisée, le système du barreau de fer et de la roue qui sert à le faire tourner. On gradue encore les commotions, au moyen de la méthode de Dove (2246), en enveloppant les bobines d'induction de cylindres de cuivre que l'on retire plus ou moins.

MM. Gaiffe et Loiseau remplacent le barreau de fer tournant par un électro-aimant A (fig. 1568), de manière à obtenir des courants induits, dans le fil de ce dernier. Ces courants peuvent être réunis à ceux qui se développent autour de l'aimant.

**2269. Machine d'induction par la terre.** — On a fait beaucoup de tentatives pour obtenir les effets ordinaires de l'électricité dynamique, au moyen des courants induits par la terre. MM. Palmieri et Santi-Linari ont réussi les premiers, au moyen de leur *batterie magnéto-électrotellurique*<sup>1</sup>. Des tubes de fer doux, bouchés avec du fer, sont fixés normalement à un arbre tournant rapidement. Un même fil de cuivre enroulé sur ces tubes passe de l'un à l'autre en formant des hélices de même espèce ; ses extrémités aboutissent à un commutateur. L'axe étant perpendiculaire au méridien magnétique, on obtient des commotions, des étincelles, la décomposition de l'eau.

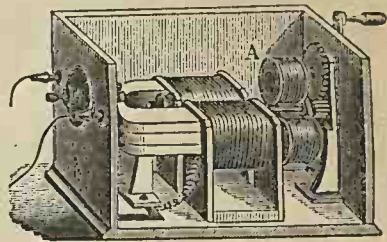


Fig. 1568.

Plus tard, M. Palmieri a obtenu les mêmes résultats sans fer doux, au moyen de larges spirales tournant autour d'un diamètre perpendiculaire au méridien magnétique ; et Delezenne obtenait aussi des commotions et de faibles décompositions chimiques au moyen de son cerceau (2192), muni d'un commutateur convenable.

**2270. MACHINES D'INDUCTION APPLICABLES A L'INDUSTRIE.** — Les machines de Pixii et de Clarke sont des appareils de démonstration ; on leur a apporté de nombreuses modifications, et l'on a imaginé d'autres machines d'induction

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 503, et t. XV, p. 34.

magnéto-électriques fournissant économiquement des quantités prodigieuses d'électricité, aux dépens d'une quantité équivalente de travail mécanique employé à les faire mouvoir. Ces machines sont aujourd'hui d'un usage courant dans la galvanoplastie et pour l'éclairage électrique. M. Page a d'abord eu l'idée de faire tourner les deux bobines, dépourvues de leur culasse, de la machine de

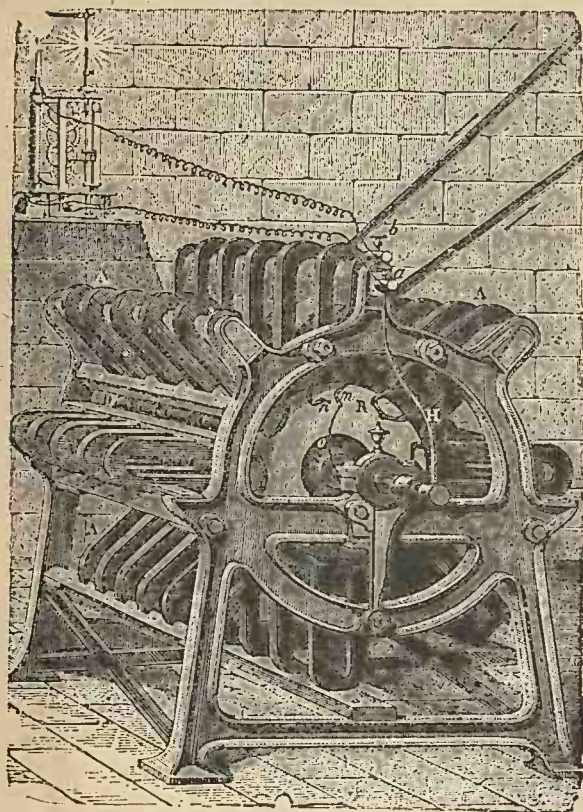


Fig. 1569. —  $\frac{1}{16}$

Clarke entre deux aimants parallèles en fer à cheval, ayant leurs pôles contraires en regard. M. Niaudet, il y a deux ou trois ans, au lieu de deux bobines, en a employé douze parallèles à l'axe de rotation, et a obtenu, sans commutateur, un courant toujours de même sens, par un moyen employé déjà dans la machine de Gramme, décrite plus loin (2275). La machine suivante est une des premières qui aient été employées avec succès dans l'industrie.

**2271. Machine magnéto-électrique de Nollet. —** Cet

appareil, souvent appelé *machine de l'Alliance*, du nom d'une compagnie d'éclairage qui a acquis le brevet de Nollet, professeur à Bruxelles, se compose d'un certain nombre de faisceaux aimantés, en fer à cheval, capables de porter 60 à 70 kil., distribués en 8 rangées de 5 à 7, A, A, A... (fig. 1569), sur un bâti en fonte, de manière que les pôles voisins soient partout de sens contraire. Ces pôles convergent vers un arbre tournant *o*, qui porte des plateaux circulaires de bronze, dont le contour passe entre les pôles des aimants. Ces plateaux

soutiennent 16 électro-aimants droits  $v, x, y, z...$  (fig. 1570), parallèles à l'arbre tournant, rasant les pôles des aimants sans les toucher, et dont un est représenté à part (fig. 1571). Les noyaux sont forés pour diminuer leur poids, et fendus, ainsi que les disques de laiton fixés à leurs extrémités, pour éviter le magnétisme par mouvement. Le fil des bobines, revêtu de coton avec vernis de

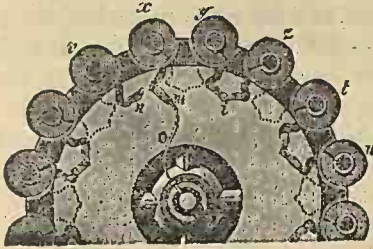


Fig. 1570.



Fig. 1571.

bitume de Judée dissous dans la benzine, est toujours enroulé dans le même sens, en passant d'une bobine à l'autre (fig. 1570), et aboutit à l'arbre, où sont recueillis, à chaque tour, 16 courants alternatifs, le sens changeant pendant le passage des bobines en face des pôles des aimants.

**Commutateur.** — Quand on veut, comme dans les applications à la galvanoplastie, obtenir un courant continu dans le circuit extérieur, on adapte à l'arbre, un commutateur qui renverse le courant 8 fois à chaque tour. Cet appareil consiste en deux roues métalliques isolées  $R, S$  (fig. 1572), présentant 8 dents qui s'engagent latéralement les unes dans les autres sans se toucher. Une de ces roues communique avec l'un des bouts du fil des bobines, et l'autre roue avec l'autre bout. Deux frotteurs  $r, r'$ , auxquels s'attachent les extrémités du circuit extérieur, s'appuient sur des dents voisines des deux roues et changent de roue en même temps, au moment où le courant est renversé dans les bobines, de manière à lui conserver toujours le même sens dans le circuit extérieur.



Fig. 1572.

Les machines Nollet étaient destinées d'abord à la production, par décomposition de l'eau, de grandes quantités d'hydrogène, qu'on carburait ensuite pour l'appliquer à l'éclairage. Notablement perfectionnées par M. Van Malderen, elles sont employées aujourd'hui avec succès à la galvanoplastie, à l'éclairage des phares; elles exigent peu de force motrice et marchent très-régulièrement. La seule chose qu'on peut leur reprocher est leur prix élevé, leur poids et la place relativement grande qu'elles occupent. D'après les expériences de MM. Jamin et Roger<sup>1</sup>, la force

<sup>1</sup> *Les Mondes*, par M. l'abbé Moigno, t. XVII, p. 439.

électromotrice d'une machine de 6 plateaux, faisant 200 tours par minute, et dont les bobines sont réunies en *tension* (fig. 1570), équivaut à celle de 226 couples de Bunsen; et à 38 couples, quand les bobines sont assemblées en *quantité*, c'est-à-dire quand les bouts des fils de chaque bobine sortant d'un même côté sont tous réunis en un seul faisceau formant une des électrodes. Les machines employées à l'éclairage des phares dépensent 11 fois moins qu'une pile de Bunsen donnant les mêmes résultats, et 7 fois moins que les lampes à huile.

**2272. Machine de Siemens.** — MM. Siemens et Halske ont imaginé, en 1854, une bobine d'induction, de forme spéciale, au moyen de laquelle M. Siemens a construit une machine qui, sous un petit volume, donne des résultats très-remarquables. Cette bobine (fig. 1573) consiste en une bande de fer doux, autour de laquelle est enroulé longitudinalement le fil de l'hélice magnétisante. Cette bande de fer est munie de deux rebords que l'on voit en A et B (fig. 1574) dans une coupe faite suivant *mn* (fig. 1573). Ces rebords sont arrondis, de manière que l'ensemble présente la forme d'un cylindre, dont les arêtes *aa'*, *bb'* (fig. 1573) forment des lignes polaires de nom contraire, sous

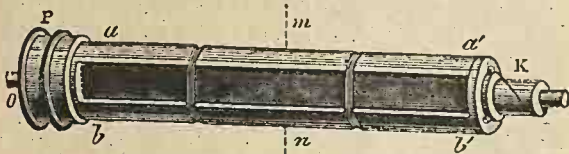


Fig. 1573.



Fig. 1574.

l'influence d'un courant. La bobine peut recevoir un mouvement de rotation autour de l'axe *ok*, d'une courroie sans fin passant sur la poulie P. Les extrémités du fil inducteur aboutissent aux deux plaques, isolées l'une de l'autre et séparées par une fente oblique du commutateur *k*, sur lequel s'appuient deux frotteurs qui recueillent les courants induits.

La machine à laquelle M. Siemens a appliqué cette bobine, est représentée dans la partie supérieure PAP' de la figure 1575. Un faisceau aimanté, composé de nombreuses lames légèrement séparées les unes des autres, porte deux pièces polaires de fer doux dont on voit la coupe, à part, en *a*, *a'*. Ces pièces sont évidées de manière à envelopper la bobine cylindrique, que fait tourner rapidement une courroie sans fin *c*. — Le magnétisme du faisceau A agit sur le fer de la bobine, dont le fil reçoit à chaque tour deux courants induits alternatifs, comme dans la machine de Clarke. Ces courants sont reçus par le commutateur disposé en avant de l'axe de rotation, sur lequel s'appuient des frotteurs communiquant avec les électrodes *e*, *e'*.

M. Siemens a établi, d'après ce principe, des machines puissantes comprenant 28 lames parallèles fortement aimantées et un peu espacées de manière à ne pas se nuire mutuellement. Du reste, les bandes polaires A, B (fig. 1574) de la longue



bobine qui tourne entre les branches de cet ensemble de lames, sont assez larges pour jouer constamment le rôle d'armatures par rapport aux pôles opposés de la série de lames aimantées.

**2273. Machine de Wilde.** — Il est évident qu'on pourrait, dans l'appareil PAP' (fig. 1575), remplacer l'aimant A par un électro-aimant excité par un courant continu. C'est ce qui a lieu dans la machine de M. Wilde. Cet appareil se compose de deux machines superposées ; la première, PAP', fournit, par les fils  $e, e'$ , le courant qui doit aimanter l'électro-aimant BB' de la seconde. Celle-ci est de dimension plus grande, et sa bobine, mue par la courroie  $e'$ , donne un courant puissant qui est recueilli par les frotteurs  $s, s'$ . — On peut de même se servir de ce courant pour animer l'électro-aimant d'un troisième appareil encore plus puissant.... et en continuant ainsi on arriverait à obtenir un dernier courant d'une énergie aussi grande que l'on voudrait, mais toujours en dépensant un travail moteur proportionné.

**2274. Machine dynamo-électrique de Ladd.** — MM. Siemens, Wheatstone, Ladd ont imaginé des machines dans lesquelles ils sont parvenus à supprimer tout aimant permanent, machines qui réalisent à la lettre la transformation du travail dynamique en électricité. L'appareil de M. Ladd consiste en deux électro-aimants plats horizontaux portant à leurs deux extrémités des pièces polaires entre lesquelles tournent des bobines de Siemens. Dans l'une d'elles, plus petite que l'autre,

il se produit des courants induits sous l'influence d'un peu de magnétisme rémanent que conservent les noyaux de fer des électro-aimants, dans le fil desquels on a fait passer une fois pour toutes le courant d'une pile, ou dans lesquels il se développe un peu de magnétisme sous l'influence du globe. Ces courants induits ramenés au même sens par un commutateur, passent dans l'hélice des électro-aimants, qui agissent alors plus fortement sur la bobine tournante ; celle-ci donne alors des courants plus intenses, excitant plus fortement les électro-aimants,.... de manière qu'ils sont bientôt fortement aimantés. Ils développent alors dans l'autre bobine tournante des courants induits très-intenses.

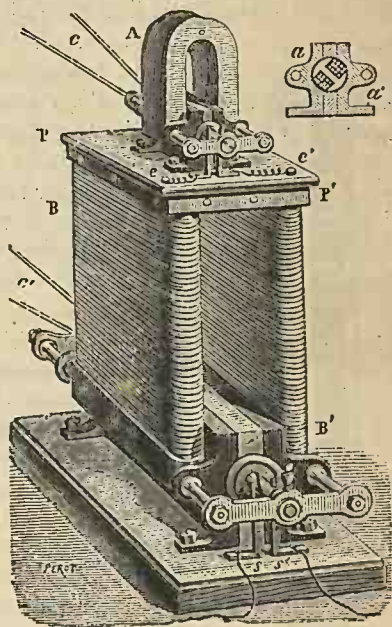


Fig. 1573 — 1/8.

Ruhmkorff a simplifié cet appareil en employant une seule bobine composée de deux parties *ab*, *bd* (fig. 1576) assemblées sur un même axe et tournant entre les pièces polaires des électro-aimants *BB'* de la figure 1565, dont toute la partie supérieure au-dessus de la plaque *PP'*, doit être maintenant supposée enlevée. Le magnétisme rémanent des électro-aimants *BB'*, développe dans la partie *ab* (fig. 1576) des courants qui, redressés par le commutateur *c*, sont conduits par les frotteurs *s*, *s'* et les fils *e*, *e'* dans l'hélice des électro-aimants *B*, *B'* (fig. 1575). Ceux-ci agissent alors sur la partie *bd* (fig. 1576) dont le fil aboutit au commutateur *c'*. Quand les frotteurs sont en *r*, *r'* le courant est continu dans le circuit extérieur, et il est alternatif, quand les frotteurs sont en *o*, *o'*, où ils s'appuient toujours sur la même plaque du commutateur, la fente oblique de séparation n'arrivant pas jusqu'à ses bases.



Fig. 1576.

On reproche aux appareils à bobine de Siemens l'énorme vitesse qu'il faut réaliser pour obtenir de bons résultats. En outre, les changements rapides et répétés de l'état d'aimantation du fer finit par l'échauffer (2139), au point d'altérer les matières qui isolent le fil induit. On a essayé de parer à cet inconvénient, au moyen d'eau circulant à travers le noyau de fer, foré suivant sa longueur; mais il reste toujours la perte énorme de force motrice, qui se transforme en chaleur au lieu de produire de l'électricité.

**Machine de Siemens et Hafner-Alteneck.** — Dans cette machine *dynamo-électrique*, qui donne des courants énergiques, on a évité les inconvénients dont nous venons de parler. La bobine est formée de 4 hélices distinctes, enroulées longitudinalement sur un même cylindre creux horizontal, qui tourne entre 4 électro-aimants, dont les noyaux ont la forme de larges plaques parallèles à l'axe du cylindre. Les électro-aimants sont disposés horizontalement deux à deux de chaque côté de la bobine, les uns au-dessus des autres. Les pôles, de même nom de ceux qui sont en dessus, sont réunis par une plaque courbe en fer doux, qui enveloppe la bobine multiple en dessus, et agit par la polarité qu'elle reçoit de ces pôles. Les pôles en regard des électro-aimants inférieurs, qui sont de nom contraire à ceux des deux supérieurs, sont réunis de même par une plaque courbe qui enveloppe la bobine en dessous et agit sur elle par une polarité opposée à celle de la plaque supérieure. En dedans et tout près de la surface interne du cylindre tournant est disposée, en face de l'arête moyenne de chaque plaque courbe, une armature fixe en fer, qui, recevant de cette plaque une polarité contraire par influence, ajoute son effet sur les bobines. Ces armatures sont soutenues par un arbre fixe autour duquel tournent les tourillons creux du cylindre. Les fils des bobines aboutissent à un distributeur ou commutateur. Les courants, d'abord produits par le magnétisme rémanent des électro-aimants, sont conduits dans leurs hélices de manière à leur communiquer

promptement une puissance capable de produire des courants induits énergiques.

**2275. Machine de Gramme.** — La propriété la plus remarquable de cet appareil est de donner un courant continu sans l'intervention de commutateur, dont la résistance réduit notablement l'intensité du courant induit, et qu'altèrent assez rapidement les étincelles de l'extra-courant. Nous avons vu (2234) comment Faraday a réalisé, le premier, un appareil donnant un courant continu, mais ce courant était très-faible. Voici le principe de la machine de M. Gramme.

Considérons deux aimants courbes  $sm'n$ ,  $s'm'n'$  (fig. 1577) réunies en  $nm'$ ,  $ss'$ , par leurs pôles de même nom, les sections neutres étant en  $m$  et  $m'$ , et supposons une hélice II en relation avec un rhéomètre, glissant sur ces aimants dans le sens de la flèche  $f$ . L'expérience montre qu'en s'éloignant du pôle  $n$ , cette hélice reçoit un courant induit *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire aux courants d'Ampère dans l'aimant  $nm's$ .

Après avoir parcouru l'espace neutre  $m'$ , cette hélice reçoit un courant *direct*, qui prend son maximum quand elle passe par le double pôle  $ss'$ , puis diminue d'intensité sans avoir changé de sens. Quand l'hélice approche de  $n'$ , après avoir parcouru l'espace neutre  $m$ , le courant  $y$  change de sens, et après qu'elle a franchi  $nm'$ , ce courant s'y retrouve, en II, avec le sens qu'il possédait au moment du départ. On voit qu'il n'y a en définitive que deux courants à chaque tour, le changement de sens se faisant dans le passage par les espaces neutres  $m$ ,  $m'$ , et le maximum ayant lieu quand l'hélice franchit les doubles pôles  $nm'$ ,  $ss'$ .

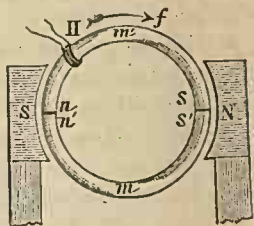


Fig. 1577.

Voici comment M. Gauguain<sup>1</sup> rend compte de ces résultats. Supposons les aimants remplacés par un solénoïde sans fin dont l'enroulement change de sens, en  $nm'$ ,  $ss'$ , de manière à représenter deux aimants réunis par les pôles de même nom, et remplaçons l'hélice II par un simple anneau se déplaçant suivant la flèche  $f$ . Cet anneau ne subira d'action inductrice que des spires du solénoïde les plus rapprochées de lui jusqu'à une certaine distance  $D$ , actions d'autant plus faibles, du reste, que la spire considérée est moins rapprochée. Tant que l'anneau se meut à des distances de  $nm'$  et  $ss'$  plus grandes que  $D$ , il ne reçoit aucun courant induit, les spires vers lesquelles il marche y produisant un courant par approche ou *inverse* (2189) et celles dont il s'éloigne un courant *direct* égal (2200). Mais si l'anneau qui s'éloigne de  $n$ , en est à une distance plus petite que  $D$ , et si l'on ne considère d'abord que les spires qui sont au-dessus de  $n$ , celles qui sont en arrière de l'anneau étant moins nombreuses que celles qui sont en avant dans l'espace  $D$ , celles-ci donneront des induits *inverses* prépondérants et de plus en plus faibles jusqu'à ce que l'anneau soit à une

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 4<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 324.

distance  $D$  du point  $n$ . En même temps les spires de  $n'$  qui sont à une distance de l'anneau plus petite que  $D$ , y produiront des courants par éloignement ou *directs*; mais comme l'enroulement du solénoïde est, en  $n'$ , contraire à ce qu'il est en  $n$ , ces courants seront de même sens que ceux que l'anneau reçoit de  $n$ , et s'ajouteront à ceux-ci. L'anneau continuant sa marche ne recevra plus de courant jusqu'à ce qu'il arrive à une distance de  $s$  plus petite que  $D$ ; alors les spires efficaces dont il s'écarte étant plus nombreuses que celles qui le séparent de  $s$ , les courants induits par écart ou *directs* l'emporteront, et l'action des premières spires situées au-dessous de  $ss'$  produira des courants de même sens, à cause du changement dans l'enroulement du solénoïde, jusqu'à ce que l'anneau soit à une distance de  $s'$  plus grande que  $D$ . Un courant inverse par rapport aux courants en  $m$  se produira dans l'anneau quand il approchera de  $n'$ , et ce courant sera de même sens qu'en  $H$ , à cause du changement dans l'enroulement du solénoïde en  $n'n\dots$  et ainsi de suite, ce qui est d'accord avec les résultats de l'expérience.

M. Gaugain a vérifié ces résultats par l'expérience en remplaçant l'anneau par une hélice plate communiquant avec un rhéomètre, et qu'il déplaçait brusquement de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ . Il a aussi opéré sur un solénoïde droit présentant un point conséquent en son milieu et a construit la courbe des intensités prises pour ordonnées. Cette courbe est symétrique et régulière; mais avec deux aimants opposés par les pôles de même nom, elle présente des irrégularités qui s'expliquent par le défaut d'homogénéité de l'acier, par le défaut de parallélisme des filts magnétiques (2180) et par la position des pôles qui sont plus ou moins éloignés des extrémités. L'aimant peut être alors comparé à un solénoïde dont les spires ne seraient pas partout également serrées. L'ensemble des phénomènes n'en présente pas moins le même aspect, et se rattache toujours à la même théorie.

**Cas d'un anneau de fer doux.** — Les résultats qui précèdent restent les mêmes quand on remplace les aimants  $sm'n$ ,  $s'mn'$  par un anneau de fer doux influencé par les pôles contraires,  $N$  et  $S$ , d'un aimant en fer à cheval produisant des points conséquents  $nn'$ ,  $ss'$ . — On peut aussi supposer que l'hélice est fixée à l'anneau de fer et que celui-ci tourne sur lui-même, les pôles  $mm'$ ,  $ss'$  se déplaçant dans le fer de manière à rester toujours en présence de  $S$  et  $N$ ; l'hélice se trouvera dans le même cas que si l'anneau aimanté était fixe, elle était seule mobile.

**2276. Description de la machine.** — La machine de Gramme consiste essentiellement en un anneau formé d'un faisceau de gros fils de fer doux, autour duquel est enroulée une hélice, dont les deux bouts sont réunis de manière à constituer un circuit fermé. Ce système tournant entre les pôles  $N$ ,  $S$  d'un fort aimant (*fig.* 1578), des courants induits naissent dans chaque spire de l'hélice, dans un certain sens en  $msm'$ , et en sens opposé en  $mmm'$ , et ces courants se neutralisent. Mais, si l'on dispose deux frotteurs, réunis par un fil  $c$ , en  $r$  et  $r'$ , là où les courants contraires se joignent pour se neutraliser, ces courants

sont recueillis par les frotteurs, et l'on a en *c* un courant unique et continu. M. Fontaine compare les deux moitiés de l'hélice à deux piles identiques réunies par les pôles de même nom, au moyen de fils dans lesquels les courants se neutralisent; mais, si l'on réunit ces deux fils par un troisième, celui-ci est parcouru par le courant des deux piles réunies *en quantité* (1824).

Pour recueillir facilement le courant, M. Gramme divise l'hélice en tronçons *a, b, c, d...* (fig. 1579), représentés très-écartés. Le fil, en passant d'un tronçon à l'autre, est mis en communication avec une tige de cuivre coudée, *no*. Toutes les tiges forment d'abord les rayons de l'anneau, puis se dirigent suivant les arêtes d'un cylindre *o*, sur lequel elles sont isolées les unes des autres. Les ressorts collecteurs, en forme de balais, pressent ce cylindre en deux points placés sur un diamètre perpendiculaire à la ligne des pôles. Le courant recueilli est bien continu, car les tiges coudées sont très-rapprochées, de manière que les balais en touchent plusieurs à la fois.

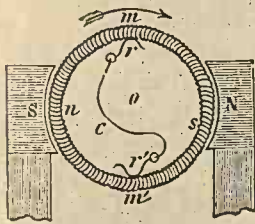


Fig. 1578.

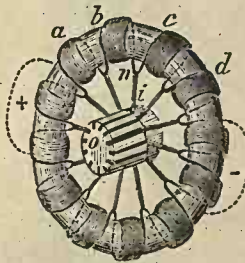


Fig. 1579.

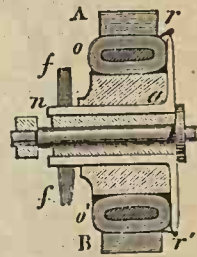


Fig. 1580.

La figure 1580 représente une coupe horizontale de l'appareil, passant par l'axe de rotation. A, B sont les pôles de l'aimant, *o, o'* la section de l'anneau, et *ra* une tige coudée. Les fils des tronçons de l'hélice étant d'abord séparés, on les attache en *r* à la tige *ra*, par laquelle ces fils sont réunis, de manière à ne former qu'une seule hélice. En *ff* sont les balais collecteurs.

La machine de Gramme se construit sous diverses formes; l'aimant, qui d'abord était horizontal, se place maintenant verticalement, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous de l'anneau tournant. La figure 1581 représente un appareil de laboratoire muni d'un aimant feuilleté (1531), et dont l'anneau est mis en mouvement au moyen d'un engrenage à dents hélicoïdales. Les pièces polaires en fer doux enveloppent la plus grande partie de l'anneau à droite et à gauche. Les balais s'appuient sur le cylindre distributeur en dessus et en dessous, et sont fixés au moyen de vis de pression portées par les bornes d'attache des rhéophores. Le modèle représenté équivalait à 8 couples de Bunsen, quand on lui imprime une vitesse de 4 ou 5 tours par seconde.

C'est en 1871 que M. Gramme a présenté sa machine à courant continu à l'Académie des Sciences de Paris. Toujours prête à fonctionner, n'exigeant aucune préparation préalable, cette machine se prête admirablement aux expériences de physique et de chimie, et aux applications médicales de l'électricité. Elle remplace, avec avantage, la pile, si encombrante et d'un entretien si incommode. Elle n'occasionne aucuns frais pendant le repos, et pendant le mouvement, elle ne dépense de travail moteur autre que celui qu'exigent les frottements, qu'autant que, le circuit étant fermé, elle produit un courant. Quand le

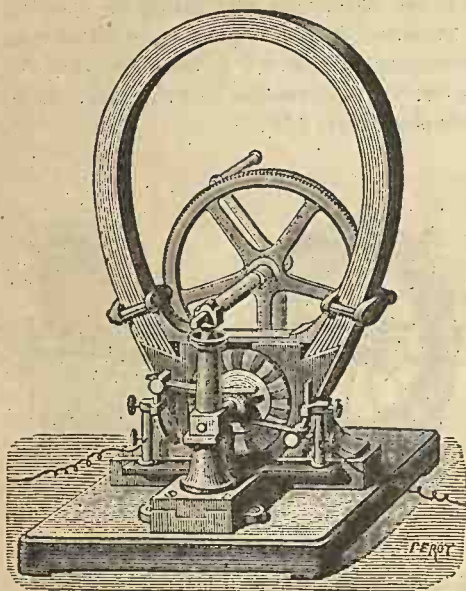


Fig. 1581. — 1/15.

circuit est ouvert, la machine lancée avec une grande vitesse et abandonnée à elle-même continue de tourner pendant longtemps; mais on l'arrête presque instantanément dès qu'on ferme le circuit. Quand on a besoin de courants énergiques, on peut assembler plusieurs machines, soit en tension, soit en quantité, comme on fait pour les piles (1824). On remarque aussi que la quantité d'électricité produite est proportionnelle à la vitesse de rotation, du moins jusqu'à une certaine limite.

**2277. Machines dynamo-électriques de Gramme.** — Les machines qui viennent de nous occuper sont surtout employées pour rem-

placer les piles dans les expériences. M. Gramme a construit d'autres appareils plus puissants, qu'il a perfectionnés successivement en vue d'en réduire le volume et le poids, et de diminuer le travail moteur nécessaire pour les faire mouvoir. Dans ces nouveaux appareils, l'aimant est remplacé par des électro-aimants, disposés tantôt horizontalement, tantôt verticalement. Dans les premiers modèles, il y avait deux anneaux tournants, dont un, amorcé par un peu de magnétisme rémanent, fournissait le courant destiné à animer les électro-aimants, comme dans la machine de Ladd (2274). Mais, plus tard, M. Gramme a simplement fait passer le courant induit dans l'anneau unique, par les hélices des électro-aimants en même temps que dans le circuit extérieur.

La figure 1582 représente un modèle très-simple employé dans une foule d'applications, notamment dans la galvanoplastie. Quatre électro-aimants B, B, B', B'

sont opposés deux à deux par les pôles de même nom, de manière à donner à deux pièces polaires en fer doux des polarités magnétiques contraires. Ces pièces polaires, dont une se voit en K, embrassent latéralement la plus grande partie de l'anneau, qui reçoit d'une courroie passant sur la poulie C un mouvement rapide de rotation autour de l'axe  $oo'$ . Les frotteurs en balai, pressés par des ressorts, sont en  $cc'$ . Un d'eux communique avec un des bouts du fil des électro-aimants, fil dont l'autre bout se continue avec le circuit extérieur, qui vient ensuite aboutir à l'autre frotteur.

**2278. Machines nouvelles à courants alternatifs.** — Il y a avantage dans certains cas à employer des courants alternatifs; par exemple pour la lumière électrique. M. Gramme a appliqué son anneau à la construction d'un nouvel appareil qui offre, en outre, l'avantage de pouvoir donner plusieurs courants, dans des circuits séparés. On voit (*fig. 1583*) une coupe perpendiculaire à l'axe de rotation de l'appareil destiné à l'éclairage électrique. L'anneau induit est fixe, et est actionné en dedans par 8 larges électro-aimants, tournant autour de l'axe et dont l'hélice magnétisante est enroulée parallèlement à cet axe; les plaques qui leur servent de noyau sont épanouies au bord extérieur comme

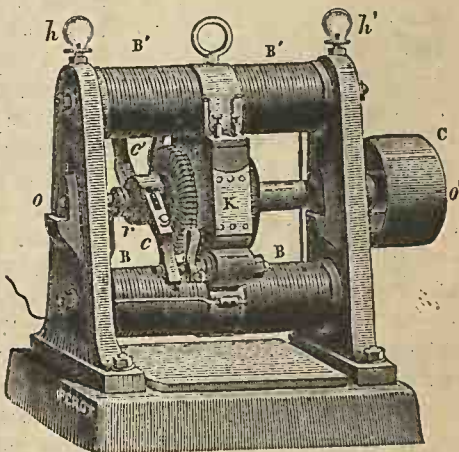


Fig. 1582. — 1/10.

dans la bobine de Siemens (2272), et comme on le voit à part en E, de manière à agir sur une assez grande étendue de l'anneau induit. Ces électro-aimants sont aimantés par le courant d'une machine auxiliaire à courant continu (*fig. 1582*), et leurs pôles extérieurs sont alternativement nord et sud, de manière que chaque demi-spire intérieure de l'anneau est toujours placée entre du fer doux et des pôles nord et sud.

Considérons un seul pôle d'électro-aimant  $n$ ; quand il approche de la spire  $a$ , celle-ci reçoit un courant d'un certain sens, qui est suivi d'un courant de sens opposé lorsque le pôle s'en éloigne, et que le pôle contraire de l'électro-aimant suivant s'en approche. Des effets inverses se produisent en même temps dans la partie  $d$  placée en face de l'électro-aimant précédent. Ces deux régions sont dans la même situation que les parties opposées de l'anneau de la machine (*fig. 1581*); seulement, ici, ces deux parties ne sont pas aux extrémités d'un

même diamètre, et ce sont les pôles magnétiques qui se déplacent. Les courants alternatifs produits en *a* et *d* peuvent être recueillis au moyen de tiges soudées au fil; mais comme l'anneau est fixe, il n'y a pas besoin de frotteurs, et l'on fait simplement communiquer les tiges à des bornes d'attache *e, e'* portées par une enveloppe de bois qui protège l'anneau.

Chaque huitième de cet anneau est ordinairement partagé en 4 sections *a, b, c, d*, dont toutes celles qui sont semblablement placées sont actionnées au même instant de la même manière par les électro-aimants tournants. On réunit à un même rhéophore, les huit sections *a*, les huit *b*, ....., de manière à avoir 4 courants dans autant de circuits séparés.

**Machines Lontin et Méritens.** — Depuis les rapides progrès qu'a faits l'éclairage électrique, on perfectionne chaque jour les machines magnéto-électriques et l'on en invente de nouvelles.

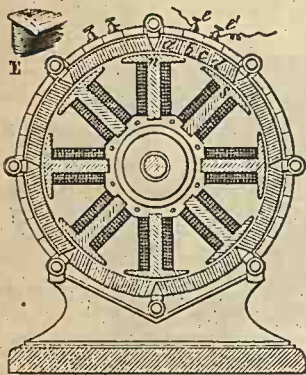


Fig. 1583. — 1/12.

Nous allons encore en citer deux qui sont à courants alternatifs, et peuvent alimenter plusieurs circuits à la fois. Dans celle de M. de Méritens<sup>1</sup>, un anneau de Gramme tourne tout près des pôles de 8 aimants fixes en fer à cheval, perpendiculaires à son plan, et dont les deux branches sont à égale distance de l'axe de rotation. La machine de M. Lontin est fondée sur le même principe que celle de Nollet (2270). Mais les aimants sont remplacés par 24 larges électro-aimants disposés sur un arbre tournant, comme ceux de la machine (fig. 1583), et sont excités par une machine à courant continu.

Leurs pôles extérieurs rasant les extrémités de 24 bobines induites distribuées en couronne sur un châssis fixe, et dirigées vers l'axe de rotation.

**2279. Remarque.** — On voit par ce qui précède que, dans la construction des générateurs magnéto-électriques, on emploie comme inducteurs, tantôt des aimants, tantôt des électro-aimants. On a beaucoup discuté la question de savoir lesquels offrent le plus d'avantages. Quand les aimants sont aussi puissants que les électro-aimants qu'ils remplacent, ils sont généralement préférables, leur puissance se conservant facilement, les bobines à noyau de fer agissant comme armatures pendant le repos et le mouvement. Les électro-aimants peuvent recevoir une puissance magnétique beaucoup plus grande; mais il faut les aimanter au moyen d'un courant. Si l'on emploie pour cela le courant produit, en le faisant passer à travers leur hélice, on introduit dans le circuit une résistance acces-

<sup>1</sup> *L'Électricité*, revue des sciences, 20 août 1878, p. 156.

<sup>2</sup> *Exposé des applications de l'électricité*, t. V (1878), p. 532.



soire, qui affaiblit le courant induit, et, par suite, réagit sur leur propre énergie. C'est pour éviter ce second inconvénient qu'on préfère, surtout quand les résistances extérieures sont variables, animer ces électro-aimants au moyen d'une autre machine à courant continu indépendant de celui que produit la machine principale.

## § 6. — APPLICATIONS DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME

### I. Moteurs électromagnétiques.

**2280.** La propriété de l'électro-aimant de recevoir et de perdre instantanément une énorme force magnétique, fait de cet appareil un organe mécanique d'un usage de plus en plus fréquent dans les applications industrielles, où il est souvent désigné sous le nom d'*électro*, de même qu'on dit *kilo* pour kilogramme. Une particularité précieuse que présente aussi ce genre de force, c'est qu'on peut la faire naître, au moyen de fils conducteurs, à des distances considérables du lieu où l'on opère et à l'instant voulu, grâce à la rapidité de propagation de l'électricité. Nous allons terminer ce chapitre en faisant connaître les principales applications de l'électromagnétisme sous ses différents aspects, en commençant par les appareils moteurs.

**2281. Moteurs électromagnétiques.** — De même qu'on peut obtenir de l'électricité en dépensant du travail mécanique, de même on peut produire du travail moteur au moyen de l'électricité; mais, jusqu'à présent, cette dernière transformation n'a pas donné, au point de vue pratique et économique, les brillants résultats que donnent, comme nous venons de le voir, les machines *magnéto-électriques*.

L'idée d'appliquer les *électro-aimants* à la production d'un travail mécanique a dû s'offrir de bonne heure à la pensée des physiiciens, et le tourniquet électromagnétique (2131) peut être regardé comme la réalisant en petit. Les premières expériences en grand ont été faites presque simultanément en France, en Italie, en Allemagne et en Amérique. Il paraît que M. Jedlick aurait imaginé, dès 1829, un appareil à rotation directe (2282). L'abbé Dal Nègro a construit, en 1831, une machine dans laquelle un aimant oscillait entre les pôles d'un électro-aimant dans lequel le courant était renversé à chaque oscillation.

Les premiers essais suivis et authentiques d'un moteur électromagnétique ont été faits, en 1839, à Saint-Petersbourg, par Jacobi<sup>1</sup>. L'appareil se composait de deux larges disques parallèles, portant chacun 4 *électros* en fer à cheval perpendiculaires à leur plan. Un de ces disques était mobile autour d'un arbre passant par son centre. Quand ses 4 *électros* se trouvaient assez rapprochés de ceux du disque fixe, ces derniers attiraient les premiers, et, au moment où les

<sup>1</sup> Archives de l'électricité de A. de La Rive, t. III, p. 233.

pôles des deux systèmes se trouvaient en présence, des commutateurs adaptés à l'arbre tournant renversaient le courant dans les électros mobiles, qui étaient alors repoussés. Quand ces électros arrivaient au milieu de la distance séparant ceux du disque fixe, l'attraction se manifestait de nouveau, et ainsi de suite. Cette machine, installée sur une chaloupe à roues portant 12 personnes, put lui faire remonter la Néva malgré un vent violent. L'électricité était fournie par une pile de 128 grands couples de Grove. Le travail mécanique n'était cependant que de  $\frac{3}{4}$  de cheval-vapeur.

Depuis ces essais remarquables, on a parlé de tentatives faites sur une

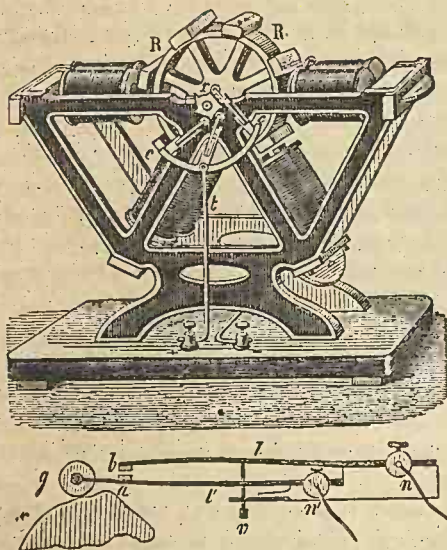


Fig. 1584.

grande échelle au moyen d'appareils puissants, en Amérique par Page, et en Angleterre par M. Davidson, qui aurait fait marcher, sur le chemin de fer d'Édimbourg à Glasgow, une locomotive électromagnétique faisant 2 lieues à l'heure en remorquant une charge de six tonnes. Ces nouvelles expériences ont eu d'abord un grand retentissement, puis on n'en a plus parlé, ce qui porte à croire que les premiers résultats avaient été exagérés, ou que les suivants n'avaient pas répondu aux espérances des inventeurs.

Aujourd'hui, au lieu de faire agir des électro-aimants les uns sur les autres, en renversant les courants pour substituer des répulsions aux attractions, on

trouve de l'avantage à faire agir les électros sur des barreaux de fer doux, qui sont attirés, puis abandonnés à eux-mêmes, le renversement du magnétisme dans le fer ne se faisant pas assez rapidement. En outre, si les électros en présence étaient de force trop inégale, le plus fort pouvait donner au plus faible, malgré l'action de l'hélice de ce dernier, un magnétisme contraire, en vertu duquel il y avait encore attraction, au lieu de répulsion.

On a imaginé un grand nombre de moteurs de différents modèles. Les principales difficultés à vaincre proviennent de la diminution rapide de l'attraction quand la distance augmente, et de la détérioration des commutateurs par l'étincelle provenant de l'extra-courant produit à chaque rupture du circuit. Nous allons décrire les appareils qui ont donné les meilleurs résultats, et dans lesquels on est parvenu à lever en partie ces difficultés.

**2282. I. MOTEURS A ROTATION DIRECTE.** — La figure 1584 représente un des modèles imaginés par Froment. RR est une roue dont le contour porte huit barreaux de fer doux équidistants et parallèles à son axe. Quatre électros fixés à un bâti de fonte agissent sur ces barreaux, qui viennent raser les surfaces polaires sans les toucher. Un *interrupteur* ou *distributeur*, mis en action par une roue à cames, représentée en *r* au bas de la figure, fait passer le courant d'une pile dans les électro-aimants, aux moments convenables. Le courant arrive d'abord par la tige *t*, dans un arc métallique fixe *cc*, et passe de là dans les électros, par l'intermédiaire de trois pièces à galet, dont une se voit à part en *gmn'*. Une de ces pièces correspond aux deux électros inférieurs, et les deux autres aux électros horizontaux. Le courant arrivant dans l'arc *cc* passe par le bouton *n* dans le ressort *l* fixé à une masse d'ivoire *nn'*; puis, par l'intermédiaire des pièces de platine *a*, *b*, quand elles sont en contact, dans le ressort *l'*, qui communique par le bouton *n'* avec le fil de l'électro-aimant. Le circuit est fermé en *ab* par la roue *r*, dont les quatre cames viennent successivement soulever le galet *g*, adapté à l'extrémité du ressort *l'*. La vis *v* permet de régler l'écart des deux ressorts. Les électros n'agissant avec énergie qu'à une faible distance, le courant ne doit passer qu'au moment où le barreau se trouve assez rapproché de l'électro-aimant, et être interrompu dès que la distance est minimum. Afin de régulariser l'action, on fait en sorte que les électros agissent les uns après les autres, les barreaux n'arrivant pas à proximité de chacun d'eux au même instant. Enfin, pour atténuer l'effet nuisible de l'extra-courant et de l'étincelle qu'il produit au moment de la rupture du circuit, le distributeur fonctionne de manière que le courant ne cesse dans un électro-aimant qu'après qu'il est passé dans l'électro-aimant suivant. L'extra-courant trouvant ainsi un écoulement facile dans le fil de ce dernier, l'étincelle d'induction est beaucoup plus faible.

**2283. Machines agissant jusqu'au contact.** — Dans le système qui précède, il reste un petit espace entre les barreaux et les surfaces polaires des électros; or, c'est au contact que ces derniers agissent le plus fortement. Il résulte des expériences de M. Marié-Davy, que lorsqu'un barreau de fer doux est attiré par un électro, les  $\frac{3}{4}$  du travail sont produits dans le dernier millimètre. *p* étant le poids soulevé et *x* la distance, on a  $p = \frac{0^k,36}{(x + 0,32)^2}$ ; formule qui, intégrée convenablement, a donné le résultat précédent.

Pour agir jusqu'au contact, plusieurs constructeurs ont eu l'idée de faire rouler sur un cercle de cuivre dont les faces polaires des électros viennent affleurer la surface intérieure, des cylindres de cuivre portant des échancrures remplies de fer. Ces masses de fer étant attirées, les cylindres roulent sans glisser, de manière que chaque masse vient s'appliquer à son tour sur les faces polaires, qui perdent aussitôt leur aimantation. Les cylindres sont adaptés aux extrémités des bras d'une roue dont l'arbre est au centre du cercle de cuivre, et qui tourne nécessairement pendant que les cylindres roulent. Wheatstone, Froment et M. Marié ont construit des appareils d'après ce principe.

**Moteur de M. Larmenjeat.** — La figure 1585 représente un appareil disposé d'une manière différente, et dans lequel l'attraction s'exerce aussi jusqu'au contact. BA est un électro-aimant circulaire, dans le système de Nicklès (2135); il porte trois disques de fer doux séparés par les deux hélices magnétisantes *cc*, qui tournent, avec l'électro, autour de l'axe *oo'*. Les disques roulent sur six cylindres aussi en fer doux, dont deux se voient en *r, r*. Ces cylindres peuvent tourner autour de tourillons disposés à leurs extrémités, et qui sont engagés dans deux plateaux fixes, dont un se voit de profil en *dd'*, et de face en *DD'*. Les disques de fer portent six échancrures profondes *c, c, ...* remplies de cuivre, de manière que le contour soit divisé en six parties garnies de cuivre, alternant avec six parties de fer. Quand ces dernières sont assez rapprochées des cylindres *r, r, ...*, le courant passe dans l'électro-aimant, l'attraction s'exerce, le système BA tourne, et quand le fer attiré se trouve en contact avec le cylindre *r*, le courant cesse dans l'électro. L'arbre *oo'* porte trois électros semblables à

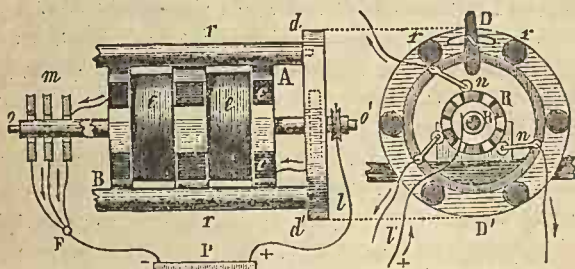


Fig. 1585.

BA; mais les échancrures ne sont pas en face de celles de AB, de manière que les trois électros fonctionnent alternativement. — Le distributeur R, chargé de faire passer le courant successivement dans les trois électros, consiste en une roue dont le contour présente six parties métalliques alternant avec six parties en ivoire, et sur laquelle s'appuient trois leviers à galets *n, n, n*, fixés à un cercle concentrique à *DD'*. Ce cercle, mobile sur lui-même, peut être fixé dans différentes positions, au moyen du levier à vis de pression D, pour régler la position des leviers *n, n, n*. Le courant partant de la pile P arrive à l'arbre *oo'* par le fil *l, l'*, et passe de là, à travers le distributeur R et l'un des leviers *n, n, n*, dans l'électro dont le fil communique avec ce levier. Le courant retourne à la pile par le fil F, qui communique par trois ressorts avec trois roues métalliques isolées *m*, auxquelles aboutissent les fils des trois électros.

**2284. II. MOTEURS A MOUVEMENT ALTERNATIF.** — La figure 1586 représente l'appareil oscillant de M. Bourbouze. *a, a'* sont deux paires d'hélices magnétisantes, dont une est représentée de face à droite en *cc'*, où l'on voit, en *c*, la coupe intérieure d'une des hélices. Dans chaque hélice est un barreau fixe de

fer doux  $i$ , qui n'en occupe que la moitié. D'autres barreaux  $c, c', C, C'$ , articulés à l'extrémité d'un balancier  $BOB'$  peuvent s'enfoncer plus ou moins dans les hélices. Quand un courant passe dans la paire d'hélices  $a$ , les barreaux de fer fixes et mobiles étant aimantés dans le même sens s'attirent mutuellement, et les barreaux mobiles  $C$  s'enfoncent dans les hélices. Quand la distance est minimum, le courant est interrompu en  $a$  et est lancé dans les hélices  $a'$ , où les barreaux  $C'$  s'enfoncent à leur tour en faisant remonter les barreaux  $C$ . Le balancier prend ainsi un mouvement d'oscillation qui est transmis à un volant par l'intermédiaire de la bielle  $b$  et de la manivelle  $m$ . Le distributeur, représenté en  $ox'$ , est conduit, à la manière du tiroir d'une machine à vapeur, par un excentrique  $e$  adapté à l'arbre du volant. La plaque d'ivoire  $oo$  porte en son milieu une lame métallique  $r$  sur laquelle s'appuie un ressort communiquant avec le pôle positif  $n$  de la pile. Des ressorts  $\alpha, \alpha'$ , fixés, l'un au fil des hélices  $a$ , l'autre au fil des hélices  $a'$ , s'appuient sur la plaque  $oo$ . Quand cette plaque

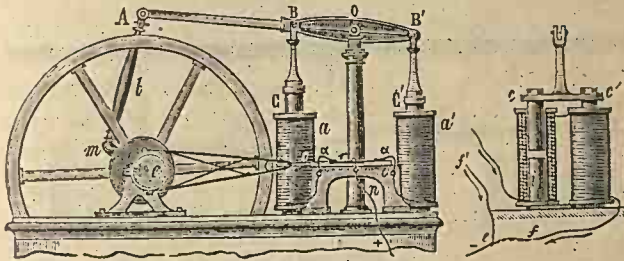


Fig. 1586.

est tirée vers la gauche, comme dans la figure, le courant passe de la lame métallique  $r$  dans le ressort  $\alpha$ , et le courant est interrompu en  $a'$ , le ressort  $\alpha'$  s'appuyant sur l'ivoire. Quand ensuite la plaque  $oo$  est poussée vers la droite, par l'excentrique  $e$ , la lame  $r$  s'engage sous le ressort  $\alpha'$ , et le courant passe en  $a'$ , en même temps qu'il est interrompu en  $a$ .

La course des cylindres mobiles devant être très-petite, parce que les attractions ne se font sentir vivement qu'à une petite distance, le balancier se prolonge en  $BA$ , pour que la manivelle  $m$  puisse avoir une longueur suffisante. Remarquons encore que les courants qui enveloppent les cylindres mobiles agissent aussi pour les faire enfoncer (2136).

L'action des hélices sur des cylindres de fer intérieurs a été employée seule par M. du Moncel, pour produire un mouvement alternatif à grande course. Deux bobines placées sur le prolongement l'une de l'autre, renferment un cylindre de fer doux. Le courant passant successivement dans les deux bobines, ce cylindre est transporté de l'une dans l'autre, son milieu tendant à venir se placer dans la section moyenne de l'hélice en activité. M. Fessel a construit une

machine d'après le même principe, qui a également servi à M. Page dans des expériences faites en Amérique; le cylindre électrodynamique était composé d'une série d'hélices courtes, mises successivement en activité, de manière que la course fût de 0<sup>m</sup>,66.

**2285. Appareil de M. Roux.** — Cet appareil, qui a beaucoup excité l'attention à l'Exposition universelle de Paris en 1867, présente une disposition originale, au moyen de laquelle le fer doux ne s'éloigne que peu de la surface polaire qui l'attire, tout en prenant un mouvement d'oscillation d'amplitude relativement considérable. E (fig. 1587) est un électro-aimant trifurqué (2135), dont les surfaces polaires sont horizontales et tournées vers le haut. Au-dessus, est suspendue, par des leviers articulés *l, l*, une large plaque de fer doux *ab*, qui, s'abaissant quand elle est attirée, s'avance en même temps horizontalement, de manière à amener les leviers *l, l* dans la position verticale: Cette plaque *ab* agit, par l'intermédiaire de la bielle B, sur la manivelle *m* adaptée à l'arbre d'un volant. Quant la plaque *ab* est abaissée, une autre plaque *a'b'*, disposée

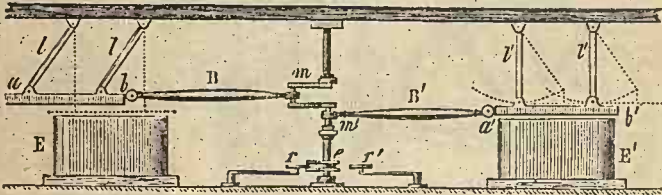


Fig. 1587.

de la même manière au-dessus d'un autre électro E', se trouve soulevée et repoussée vers la droite par la manivelle *m'*. En cet instant, le courant est supprimé en E et dirigé dans E', la plaque *a'b'* s'abaisse, et la plaque *ab* est tirée vers l'arbre tournant, par la manivelle *m*; et ainsi de suite. Pour faire passer le courant alternativement en E et E', l'arbre porte un excentrique métallique *e*, communiquant avec l'un des électrodes de la pile, et va toucher alternativement des galets *r, r'* montés sur des ressorts communiquant avec le fil des électros. Les centres polaires développés sur les plaques *ab, a'b'* changeant de place pendant leur mouvement, ces plaques doivent être en fer bien doux.

**2286. Du travail des moteurs électriques.** — La puissance des moteurs électromagnétiques dépend, pour un même modèle, du nombre et des dimensions des couples de la pile, et de la puissance des électro-aimants. Or, cette puissance est proportionnelle à l'intensité du courant qui les anime, mais seulement jusqu'à une certaine limite, d'autant plus éloignée que le barreau de fer présente une plus grande section (2132). Il faut donc, pour qu'il y ait avantage à employer des courants intenses, que le fer des électros soit très-gros.

**Maximum de travail.** — Une remarque importante, c'est que les électros

n'agissent pas, pendant le mouvement de l'appareil, avec la même énergie que pendant le repos. Jacobi, qui a fait, lors de ses essais (2281), une étude approfondie des conditions des moteurs électriques, a constaté que le courant s'affaiblit notablement dans les électros pendant la marche de l'appareil. L'*extra-courant* qui se produit aux instants où le circuit se ferme (2223) concourt à ce résultat; mais l'effet est dû surtout aux courants induits inverses excités dans les hélices par le rapprochement des barreaux mobiles qu'attirent les électros, et qui sont aimantés par influence. Ces courants induits, d'autant plus intenses que le mouvement est plus rapide, neutralisent en partie le courant de la pile. C'est, du reste, ce que l'on voit directement en faisant passer le courant de la pile à travers une boussole des tangentes, dont la déviation est plus petite pendant la marche, et d'autant plus que la vitesse est plus grande.

Il résulte de là que le *travail* du moteur n'est pas proportionnel à sa vitesse, puisque les électros s'affaiblissent quand elle augmente. Jacobi a trouvé par le calcul, en s'appuyant sur les lois d'Ohm et sur celles des courants d'induction, que le maximum de travail a lieu quand la vitesse est telle, que le courant de la pile est réduit à la moitié de son intensité pendant le repos de l'appareil. Ce résultat reste le même, quel que soit le nombre de spires des hélices, tant que la résistance totale du circuit ne change pas. Dans chaque cas, la valeur absolue du travail maximum dépend de la disposition de l'appareil et de la force électromotrice de la pile. Par exemple, d'après Jacobi, ce travail, étant 1 avec une pile de Daniell, est 1,75 avec une pile de Grove, pour la même quantité de zinc dissous. Du reste, le rapport entre le travail utile et le zinc dépensé reste le même, quel que soit le système de couple employé. Il est important de remarquer aussi que, si le courant de la pile est affaibli par les courants induits, la dépense de zinc dans les couples est diminuée dans le même rapport.

#### 2287. Comparaison du travail des moteurs électriques et à vapeur.

— M. E. Becquerel a fait, en 1855, des expériences comparatives sur le travail fourni par quatre des moteurs électriques figurant alors à l'Exposition universelle de Paris : la machine de M. Larmenjeat, celle de M. Roux, décrites ci-dessus; un appareil de M. Loiseau, analogue à la machine de Jacobi, et un moteur oscillant exposé par MM. Fabre et Kunemann. Le travail était mesuré par le frein dynamométrique (I, 78), et la quantité de zinc dissous dans chaque couple était évaluée au moyen d'un voltamètre à sulfate de cuivre placé dans le circuit (1995). Les appareils de M. Larmenjeat et de M. Roux ont donné les meilleurs résultats, qui dépendent, et suivant des lois différentes pour les deux appareils, du nombre des couples, de leur disposition et de leur arrangement, soit en série, soit en quantité; ils sont consignés dans le tableau suivant. La pile était formée de couples à charbon et à zinc intérieur présentant une surface de 0,85 décimètres carrés. Dans deux expériences, le zinc était extérieur et présentait 2,625 décimètres carrés.

	NOMBRE DE COUPLES	TRAVAIL DU MOTEUR		ZINC DISSOUS PAR HEURE ET	
		sans voltamètre.	avec voltamètre.	par kilogrammèt.	par cheval de 75 kilog <sup>m</sup> .
		kilogrammèt.	kilogrammèt.	grammes.	kilogrammes.
Appareil rotatif de M. Larmenjeat.	20 couples simples.	0,836	0,720	160.	12,000
	10 doubles.....	»	0,484	203	15,200
	10 triples.....	4,028	0,900	60	4,500
	10 quadruples...	1,280	0,960	61	4,575
Appareil oscillant de M. Roux.	10 triples.....	0,829	0,562	174	13,050
	10 simples.....	»	0,450	142	10,680
	10 doubles.....	4,052	0,584	144	10,800
	10 triples.....	4,550	0,850	132	9,900
	10 quadruples...	3,660	1,500	88,7	6,640
	8, zinc extérieur.	4,600	1,330	44,0	3,300
6, id.....	0,600	0,415	28,9	2,200	

On obtenait des couples doubles, triples..., en réunissant 2, 3... couples égaux. On voit que la dépense de zinc par cheval dépend du nombre des couples et de la manière dont ils sont réunis, et que, généralement, il y a avantage à donner une grande surface au zinc. La machine rotative a donné le minimum de dépense de zinc, 4<sup>k</sup>,5, avec 10 couples triples. La machine Roux a dépensé, avec la même pile, en moyenne 6<sup>k</sup>,6; mais, avec des couples dont le zinc avait 2,62 de surface au lieu de 0,85, la dépense s'est abaissée à 2<sup>k</sup>,2. Les fils des électros étaient gros, et leur résistance peu considérable. En adoptant le nombre de 2<sup>k</sup>,2 par cheval et par heure, et prenant pour prix du kilo de zinc 0<sup>c</sup>70, on trouve 1<sup>c</sup>,52 pour prix du cheval par heure, en négligeant la dépense des acides et de l'entretien de la pile. Or, le travail d'un cheval, fourni par une machine à vapeur, n'exige que 3 à 4 kil. de houille par heure; et même que 1<sup>k</sup>,5 avec les machines perfectionnées. La houille ne coûtant, à Paris, que 5 centimes le kil., on voit que le cheval-vapeur n'en dépense que pour 15,20 ou 7,5 centimes par heure, c'est-à-dire, avec cette dernière évaluation, pour une somme vingt fois plus faible que le prix du zinc dans le moteur électrique ayant donné les meilleurs résultats. Il est vrai que, dans les expériences faites avec ces derniers appareils, on ne paraît pas s'être préoccupé d'obtenir la vitesse donnant le maximum de travail, et ces moteurs n'avaient guère que la force de  $\frac{1}{3}$  d'homme. M. Froment a construit une machine à rotation directe de la force d'un cheval, et qui dépensait 1<sup>c</sup>,60 par heure.

MM. Joule et Scoresby ont établi une comparaison entre le travail des moteurs électriques et celui des machines à vapeur, en s'appuyant sur la thermodynamique, et admettant que la partie de la chaleur du couple qui ne produit pas



d'effets calorifiques se transforme en travail mécanique<sup>1</sup>. Soit  $I$  l'intensité du courant quand la machine est en repos, et  $i$  cette intensité pendant la marche; les quantités de chaleur produites sont proportionnelles aux carrés de ces intensités ou à  $I^2$  et  $i^2$  (1935). De plus, avec l'intensité  $i$  du courant, il y a un travail mécanique développé  $x$ ; de sorte que le travail total, tant calorifique que mécanique, est, pendant le mouvement, égal à  $i^2 + x$ . Si l'on admet comme évident que les quantités  $I^2$  et  $i^2 + x$  sont proportionnelles aux intensités  $I$  et  $i$ , ou aux quantités de zinc dissous qui leur correspondent, on a  $i^2 + x : I^2 = i : I$ ; d'où l'on tire, en multipliant les deux derniers termes par  $i$  et *componendo*,  $x : i^2 + x = I - i : I$ , qui donne le rapport entre le travail mécanique  $x$  et l'effet total  $i^2 + x$ , tant mécanique que calorifique. D'après M. Joule, 1 grain de zinc dissous produit une quantité de chaleur représentant 52 kilogrammètres. Remplaçant  $i^2 + x$  par  $52^{km}$ , on tire  $x = 52^{km} \frac{I-i}{I}$ .

Des expériences faites sur un moteur à rotation directe ont donné à MM. Joule et Scoresby un travail moyen de  $22^{km}$  par grain de zinc dissous, tandis que le travail théorique calculé par la formule est de  $26^{km}$ . Le travail effectif n'a donc été, avec leur appareil, que  $\frac{4}{5}$  environ du travail théorique. Les mêmes physiiciens ont calculé ensuite que 1 grain de houille produit, en brûlant, une quantité de chaleur équivalente à  $445^{km}$ . Si l'on suppose qu'une machine à vapeur n'utilise que le dixième de cette chaleur, ou ne produit que  $44,5^{km}$  par grain de houille, elle donnera le double du travail du moteur électrique qui a servi aux expériences; et, comme le zinc coûte à peu près 14 fois plus que la houille, on voit que, d'après ces nouvelles évaluations, le travail du moteur électrique employé serait 28 fois plus coûteux que celui d'une machine à vapeur avant les derniers perfectionnements.

**2288. Conclusion.** — Il résulte de tout ce qui précède que les machines à vapeur présentent, au point de vue de l'économie, une grande supériorité sur les moteurs électriques que nous avons cités. L'espérance, souvent émise, de remplacer la vapeur par l'électricité ne pourra donc être réalisée que si l'on découvre des moyens directs de produire de l'électricité beaucoup moins coûteux que ceux que l'on connaît aujourd'hui. Ajoutons que l'on n'a pu jusqu'à présent atteindre qu'à peine à la force d'un cheval, et que les machines pesaient alors plus de 800 kil.; on est effrayé du poids que devrait avoir un appareil seulement de 100 chevaux, en supposant qu'on puisse jamais obtenir une semblable puissance au moyen de l'électricité. Cependant, les moteurs électromagnétiques peuvent être utiles dans certains cas. Quand on n'a besoin que de petites forces et de très-grandes vitesses, ils sont préférables aux moteurs à vapeur. La régularité de leur mouvement, la facilité de les mettre en marche et de les arrêter instantanément, la possibilité de les faire marcher à une grande distance du lieu où l'on est, les rend précieux dans certaines circonstances, et on les a souvent employés dans

<sup>1</sup> Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences), t. III, p. 36.

les expériences de physique. Froment s'en servait pour faire mouvoir des tours dans ses ateliers. Il en employait aussi à faire marcher des machines à diviser traçant jusqu'à 1000 traits dans un millimètre. Ces appareils étaient tellement délicats, qu'ils ne pouvaient fonctionner régulièrement que pendant le calme de la nuit ; une horloge était chargée de faire partir une détente qui fermait le courant de la pile à l'heure convenable.

**2289. Machines magnéto-électriques comme moteurs.** — La plupart des machines *magnéto-électriques* peuvent fonctionner comme moteurs quand on fait passer un courant dans le circuit d'induction, avec interposition d'un commutateur. Le courant fait alors mouvoir l'appareil dans un sens indiqué par la loi de Lenz (2194). La machine de Gramme se prête surtout facilement à cette expérience réciproque, et l'on peut dire qu'elle constitue le moteur électromagnétique le plus avantageux, donnant un rendement bien supérieur à celui des moteurs qui ont été jusqu'à présent comparés aux machines à vapeur. Il résulte des lois de la thermo-dynamique, que le rendement d'une machine comme moteur est d'autant plus grand que cette machine donne des courants plus intenses quand elle est mue par une force extérieure. — L'expérience suivante montre bien la réciprocité entre les deux effets de l'appareil fonctionnant alternativement comme générateur d'électricité et comme moteur : on charge une pile secondaire Planté (1866) au moyen de la machine de Gramme ; puis, sans rien changer aux communications, on arrête la machine et on l'abandonne à elle-même. Aussitôt, on la voit se mettre en mouvement rapide, sous l'influence du courant de la pile secondaire, qui lui restitue, par l'intermédiaire de l'électricité, le travail mécanique dépensé pour la charger.

On peut dire que l'avenir des moteurs électromagnétiques réside dans l'emploi de la machine de Gramme ou des appareils fondés sur le même principe. On pourrait s'en servir à transmettre au loin le travail d'une force motrice. Une de ces machines, mue par une chute d'eau, fournirait un courant qu'on amènerait par de longs fils dans une seconde machine qu'il mettrait en mouvement. Dans une expérience de M. Gramme, un travail de  $75^{\text{km}}$  ayant été dépensé dans la première machine, la seconde a fourni, dans le même temps,  $39^{\text{km}}$ . Le rendement était donc d'environ 0,50.

## II. Télégraphes électriques.

**2290. Historique.** — Dès qu'on eut remarqué la grande rapidité de propagation de l'électricité, on songea à en tirer parti pour transmettre des signaux. Franklin paraît avoir conçu le premier cette idée, sans qu'il l'ait cependant précisément formulée. Vers la même époque, la télégraphie ordinaire commençait à sortir de l'enfance. Aux feux qui, dans l'antiquité la plus reculée, étaient allumés sur les hauteurs pour correspondre, en temps de guerre, aux pavillons que les marins emploient depuis un temps immémorial pour communiquer

à de grandes distances, Amontons, profitant de l'invention alors récente du télescope, proposa de substituer des signaux faits au moyen de leviers articulés, et transmis entre plusieurs stations établies de distance en distance, comme cela avait, du reste, déjà été fait au troisième siècle avant notre ère, par Philippe V, père de Persée, au moyen d'un système de fanaux. Plus tard vinrent les essais de l'abbé Chappe, auquel on doit l'établissement des télégraphes aériens adoptés en 1793 par la Convention, et l'invention du système de signaux qui a été en usage jusqu'au milieu du siècle actuel.

Pendant ce temps-là, les essais de télégraphie électrique se poursuivaient laborieusement, faisant un pas de plus à chaque découverte capitale en électricité. La première expérience fut faite à Genève, en 1774, par Lesage, au moyen de 24 fils métalliques noyés dans la résine d'une auge de bois, et portant à leurs extrémités des électroscopes à pendules correspondant aux lettres de l'alphabet. Quand on voulait désigner une lettre, on faisait communiquer l'extrémité opposée du fil correspondant, avec une machine électrique. Ce système fut appliqué, en 1797, entre Madrid et Aranjuez, par M. de Bétancourt; seulement, l'électricité était lancée dans les fils au moyen d'une bouteille de Leyde. La même année, un physicien français, Lomond, installa dans ses appartements un appareil analogue, qui excita l'admiration d'Arthur Young. En 1794, Reiser désignait des lettres métalliques fixées à un plateau de verre, et communiquant avec le sol, au moyen d'étincelles électriques provoquées par les extrémités arrondies de fils métalliques. Le docteur Salva construisit, en Espagne, un télégraphe semblable, avec lequel une nouvelle put être transmise à une grande distance à l'infant don Antonio.

La pile n'était pas alors connue. Onze ans après la découverte de Volta, Sœmmering, à Munich, employa la décomposition de l'eau pour faire des signaux : 36 fils métalliques isolés étaient tendus entre les deux stations. Des aiguilles d'or soudées à l'extrémité de chacun d'eux plongeaient dans une auge pleine d'eau acidulée. Un des fils était mis en communication, par son extrémité opposée, avec le pôle positif d'une pile, et un autre fil, avec le pôle négatif. L'aiguille d'or du premier laissait dégager un petit nuage de bulles d'oxygène, et l'aiguille du second, un nuage plus abondant de bulles d'hydrogène, de manière à désigner deux fils, et par conséquent deux signes à la fois. Déjà, dans ce système, l'isolement des fils était facile, ce qui levait ainsi une difficulté insurmontable avec l'électricité statique, pour les grandes distances. Dans l'appareil de Sœmmering, auquel M. Schweger avait apporté divers perfectionnements, on remarquait un *avertisseur* : le gaz hydrogène dégagé sur un des fils se rendait dans une petite cloche suspendue à un levier horizontal en équilibre, dans le bras opposé duquel était engagé un anneau. Le gaz soulevait la cloche, et l'anneau, glissant sur le levier, tombait dans un bassin de métal en produisant un bruit qui appelait l'attention.

Aussitôt après la découverte d'Ersted, en 1820, Ampère montra le parti qu'on en pouvait tirer pour faire des signaux; mais ce ne fut que treize ans après

que Schilling appliqua cette idée sur une petite échelle, à Saint-Pétersbourg. Cinq fils de platine renfermés dans un câble de soie, communiquaient par une extrémité avec un multiplicateur, et aboutissaient par l'autre, à des touches disposées comme celles d'un piano. On lançait un courant dans un de ces fils en abaissant une touche. Suivant le sens du courant, l'aiguille était déviée d'un côté ou de l'autre; ce qui formait, avec les 5 aiguilles, 10 signes différents. MM. Ritchie et Alexander construisirent, en 1837, à Édimbourg, un appareil semblable. Il y avait 30 fils et 30 aiguilles formant autant de signes. MM. Gauss et Weber employèrent aussi ce genre d'appareil, pour faire communiquer le cabinet de physique et l'observatoire de Göttingue.

Quelques années plus tard, la facilité de mettre les fils télégraphiques à l'abri de la malveillance, derrière les clôtures des chemins de fer, qui venaient de prendre un rapide essor, fit disparaître une des grandes préoccupations des inventeurs. La télégraphie électrique ne s'en tint plus, dès lors, à de simples essais, et se développa rapidement. C'est en 1837 que Wheatstone, en Angleterre, et Stenheil, en Allemagne, construisirent les premiers télégraphes qui aient fonctionné régulièrement sur de grandes distances.

Le télégraphe de Wheatstone était installé le long du chemin de fer de Londres à Birmingham sur une longueur de 1 mille et demi. Il se composait de 5 multiplicateurs, dont on pouvait faire osciller les aiguilles deux par deux, et de 6 fils de communication, dont un pour le retour des courants. On remarquait, dans cet appareil, un *avertisseur à carillon*, dont le jeu était produit par un *électro-aimant* qui, en attirant une pièce de fer, dégagait un mouvement d'horlogerie qui faisait battre un marteau sur un timbre. Nous trouvons là la première application de l'*électro-aimant* à la télégraphie, application dont on a tiré depuis un si merveilleux parti.

Avec l'appareil de Stenheil, il suffisait de *deux* fils pour former un grand nombre de signes différents. Deux aimants, mobiles dans un même multiplicateur, étaient déviés en sens contraire par le passage d'un courant, et ils venaient l'un ou l'autre marquer, au moyen d'un crayon, des points plus ou moins rapprochés sur le contour d'une roue tournant uniformément. De plus, le courant était produit par un appareil d'induction magnéto-électrique. On doit donc à Stenheil d'avoir, le premier, produit un grand nombre de signes avec deux fils seulement; d'avoir réalisé le premier télégraphe écrivant, et enfin de s'être servi de courants magnéto-électriques, ce qui, du reste, avait déjà été indiqué par Gauss et Weber.

Vers la même époque, Morse indiquait le principe du télégraphe enregistreur, que nous décrirons plus loin (2300). Il dispute à Wheatstone la priorité relativement à l'emploi de l'électro-aimant, et à Stenheil celle de l'invention du premier télégraphe écrivant.

L'année 1838 fut témoin d'un nouveau progrès : on reconnut qu'on pouvait remplacer le fil de retour du courant par le sol, et l'on put correspondre avec un seul fil, ce qui réduisit considérablement les frais d'établissement. La télégra-

phie électrique se trouva, dès lors, en possession des éléments d'un rapide progrès. Les avantages qu'elle présente, la rapidité de la transmission, la facilité d'opérer la nuit, par la pluie, par le brouillard, la possibilité de franchir d'immenses distances, de vastes mers sans postes intermédiaires, et sans être astreint à choisir les stations élevées, frappèrent tous les esprits. Aussi, une foule de physiciens et d'artistes travaillèrent-ils à perfectionner les appareils et les modes de communication, et, au bout d'un petit nombre d'années, l'Europe, les deux Amériques, les Indes, la Chine et le Japon, l'Océanie se couvraient rapidement d'un réseau de fils électriques. Des lignes furent établies au nord, et à travers le centre de l'Afrique, et bientôt les mers ne furent plus un obstacle à ce genre de communication.

**2290.** Nous allons décrire les systèmes les plus importants, principalement ceux qui ont été adoptés dans divers pays, ou qui présentent des dispositions originales. Nous les classerons en 5 groupes principaux : *télégraphes à aiguilles*, *télégraphes à cadran*, *télégraphes écrivants* ou *enregistreurs*, *télégraphes autographiques* et *télégraphes imprimants*. Dans tous, on distingue quatre parties principales : 1<sup>o</sup> la communication entre les stations, formée en partie par des fils métalliques isolés, en partie par la terre ; 2<sup>o</sup> le *manipulateur* ou *transmetteur*, au moyen duquel on lance l'électricité dans les fils de communication, pour produire les signaux à la station opposée ; 3<sup>o</sup> le *récepteur* placé à cette station, sur lequel les signes se manifestent ; 4<sup>o</sup> l'appareil qui fournit l'électricité. Cet appareil est souvent une pile de Daniell à longue durée (1856). En Angleterre, on se sert surtout d'auges divisées par des plaques d'ardoise, en compartiments remplis de sable mouillé avec de l'eau faiblement acidulée. Dans les compartiments, plongent des lames de cuivre et de zinc disposées comme celles des piles à couronne (1824). On a remplacé aussi la pile par des générateurs magnéto-électriques. Nous allons d'abord nous occuper des différents systèmes de *récepteurs* et de *manipulateurs* ; nous parlerons ensuite de ce qui concerne la communication entre les stations.

**2291. I. TÉLÉGRAPHES A AIGUILLES.** — Un des plus anciens systèmes de télégraphe est l'appareil à deux aiguilles de Wheatstone et Cooke, généralement connu sous le nom de *télégraphe anglais*.

**Récepteur.** — Le *récepteur* est composé de deux multiplicateurs verticaux agissant chacun sur une aiguille indicatrice. On voit en B, A (*fig. 1589*) un de ces multiplicateurs, portant un système d'aiguilles compensées E, E' équilibré de manière à se placer de lui-même verticalement. La figure 1588 représente l'ensemble de l'appareil. e, e' sont les aiguilles extérieures. Les signaux se font

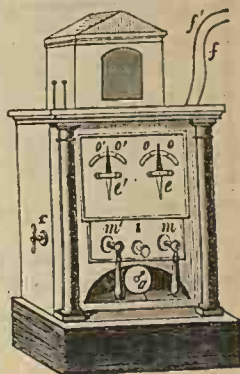


Fig. 1588.

en lançant le courant dans un sens ou dans l'autre pendant un temps très-court, de manière à faire battre les aiguilles à droite ou à gauche sur des arêtes  $o, o, o', o'$ . En faisant faire à chaque aiguille 1, 2 ou 3 mouvements, soit à gauche, soit à droite, on obtient d'abord une quinzaine de signes. En combinant ces signes deux à deux, on en formerait un grand nombre d'autres, mais on n'utilise, comme étant les plus faciles à saisir, que ceux dans lesquels les deux aiguilles se meuvent parallèlement. Voici les signes représentatifs des lettres de l'alphabet adoptés en Belgique; les plus simples ont été naturellement appliqués aux lettres qui reviennent le plus souvent dans les mots. Dans le tableau, la lettre  $g$  indique un mouvement à gauche, de l'extrémité inférieure de l'aiguille, et la lettre  $d$ , un mouvement à droite.

UNE SEULE AIGUILLE EN MOUVEMENT				MOUVEMENTS DES DEUX AIGUILLES oscillant parallèlement.	
AIGUILLE DE GAUCHE		AIGUILLE DE DROITE			
$+ = g$	$d = gd$	$h = g$	$m = gd'$	$r = g$	$v = gd$
$a = gg$	$e = d$	$i = gg$	$n = d$	$s, z = gg$	$w = d$
$b = ggg$	$f = dd$	$k, q = ggg$	$o = dd$	$t = ggg$	$x = dd$
$c = dg$	$g, j = ddd$	$l = dg$	$p = ddd$	$u = dg$	$y = ddd$

Le signe  $+$ , nommé *final* ou *signe de repos*, sert à marquer la fin des mots. Il y a des signes pour la ponctuation, pour les chiffres, pour indiquer certaines phrases ou certains mots destinés à simplifier la correspondance, etc.

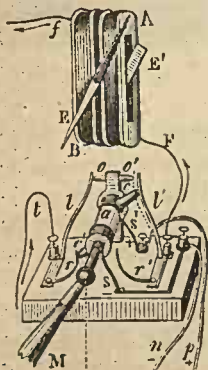


Fig. 1589.

**Manipulateur.** — Pour lancer à volonté le courant dans un sens ou dans l'autre, on emploie le *commutateur*  $oo'$  M (fig. 1589): Un cylindre d'ivoire  $a$ , manœuvré au moyen du levier ou *manette* M, porte deux chevilles de cuivre  $c, c'$ , parallèles à la manette, et implantées dans des viroles de cuivre garnissant les extrémités du cylindre d'ivoire. Ces viroles communiquent par des ressorts  $s, s'$  avec les rhéophores  $p$  et  $n$  de la pile; de manière que les chevilles  $c, c'$  peuvent être considérées comme les pôles de cette dernière. Deux ressorts  $r, r'$ , peuvent être pressés par l'une de ces chevilles, et deux autres ressorts  $l, l'$ , auxquels aboutissent les extrémités du fil de ligne  $t, F$ , peuvent être pressés par l'autre, et être mis en communication l'un avec l'autre par une pièce de cuivre  $oo'$ . Enfin, les ressorts  $l, r$  et  $l', r'$ , sont réunis deux à deux par une lame métallique. Cela posé, si l'on incline la manette M vers la gauche, comme dans la figure, les chevilles  $c, c'$  pressent les ressorts  $l'$  et  $r$ , et le premier est écarté

de la pièce  $o'$ ; alors, le courant de la pile passe, par le ressort  $s'$  et la cheville  $c$ , dans le ressort  $v$ , puis dans le fil  $F$ , circule dans le récepteur BA de la station où l'on opère, parcourt le *fil de ligne*  $f$ , circule autour du récepteur de la station opposée, et passe dans son manipulateur. Ce dernier est au repos avec la manette verticale, de manière que les ressorts semblables à  $l, v$  s'appuyant en  $o, o'$ , le courant passe directement de l'un à l'autre. Ce courant va ensuite dans la terre, et revient à la pile qui est au point de départ, par le *fil de terre*  $t$ , le ressort  $r$ , la cheville  $c'$  et le ressort  $s$ . — Si l'on incline la manette M vers la droite, il est facile de voir que le courant circule en sens contraire. On voit en  $m, m'$  (fig. 1588) les deux manettes qui correspondent aux deux aiguilles. — Remarquons que le courant passant par le récepteur de la station, celui qui opère voit, sur les aiguilles qu'il a sous les yeux, les effets qui se produisent à la station opposée, et peut reconnaître ainsi si le courant passe bien, et s'apercevoir des erreurs qu'il pourrait commettre. Quand on attend une réponse, on place la manette M verticalement, le circuit est fermé en  $oo'$  et les courants arrivant de la station opposée passent par le récepteur AB.

L'index  $a$  (fig. 1588) appartient à un interrupteur, dit appareil silencieux, dû à M. Walker, qui permet de faire communiquer entre elles les deux stations de droite et de gauche, de manière que l'appareil soit en dehors du circuit.

Le télégraphe à deux aiguilles exige deux fils de communication; mais c'est un de ceux qui permettent la correspondance la plus rapide: il peut transmettre de 12 à 15 mots par minute, et même 20, dans les circonstances favorables. De plus, le mécanisme, simple et facile à manœuvrer, n'exige, en outre, qu'un faible courant. On pourrait, du reste, se contenter d'une seule aiguille et d'un seul fil de ligne; mais alors les signes ne seraient plus aussi rapides, parce qu'il faudrait employer un plus grand nombre de battements.

**2292. Avertisseur.** — Dans la partie supérieure de l'appareil, est logée l'alarme ou sonnerie d'appel, nommée encore avertisseur. Cet appareil, qu'on peut séparer du circuit en tournant la clef  $r$ , consiste en un mouvement d'horlogerie qui fait battre un marteau sur un timbre. Une des roues porte un arrêt qui vient butter contre un levier de fer doux qui s'écarte par l'action d'un électro-aimant, quand on fait passer pendant un instant, un courant dans ce dernier, et l'appareil se met à carillonner jusqu'à ce que, la roue ayant fait un tour entier, l'arrêt vient de nouveau butter contre le levier qu'un ressort a ramené à sa première position.

La figure 1590 représente le système de sonnerie, de M. Mirand, souvent employé dans les sonneries électriques d'appartements. C'est un *trembleur* de

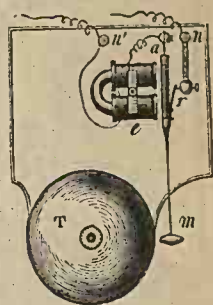


Fig. 1590.

forme particulière : le courant de la ligne passe, par les boutons  $n, n'$ , dans l'électro  $e$ , en parcourant la partie  $ar$  du manche de fer du marteau  $m$ , qui est attiré. Le courant est alors interrompu en  $r$ , le marteau revient sur ses pas sous l'action du ressort  $a$  auquel il est fixé, et le circuit est fermé en  $r$ ; le marteau est donc de nouveau attiré, et ainsi de suite. Dans ces mouvements rapides le marteau frappe sur le timbre  $T$ , à coups répétés.

**2293. Télégraphe électro-magnétique à aiguilles.** — Au lieu de produire avec une pile, les courants destinés à faire osciller les aiguilles, on s'est aussi servi d'une machine d'induction magnéto-électrique, qui alors remplace le manipulateur. Tantôt, comme dans le télégraphe de M. Henley, un électro-aimant fait un quart de tour devant les pôles d'un aimant, soit pour s'en approcher et recevoir un courant induit inverse, soit pour s'en éloigner et en recevoir un direct; tantôt on éloigne ou on approche directement cet électro-aimant des pôles de l'aimant, au moyen d'un levier, et l'aiguille du récepteur est mise en mouvement par un électro-aimant, dans lequel circulent les courants induits instantanés.

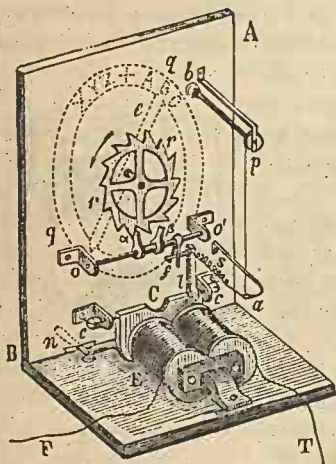


Fig. 1591.

**2294. II. TÉLÉGRAPHES A CADRAN.** —

Dès 1840 Wheatstone construisit un télégraphe qui, au moyen d'un seul fil de communication, permettait de désigner sur un cadran les signes qui y étaient gravés. Cet appareil a reçu depuis un grand nombre de modifications. Le système le plus employé, en France, est celui de M. Breguet.

**Télégraphe Breguet.** — Les figures

1591 et 1592 représentent le récepteur et le manipulateur de ce télégraphe, dont tout le monde peut comprendre les signes et manœuvrer le manipulateur, ce qui présente de grands avantages dans le service des chemins de fer, où il est très-important que chacun puisse, à l'occasion, lancer ou recevoir une dépêche.

**Récepteur.** — Le récepteur (fig. 1591) est représenté vu par derrière, la plaque  $BA$  formant le devant de l'appareil.  $rr$  est une roue qui tend toujours à tourner sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie constamment monté et non représenté sur la figure. L'arbre de cette roue porte, du côté opposé de la plaque  $AB$ , une aiguille  $e$  destinée à indiquer successivement les signes tracés sur un cadran vertical  $qq$ . La roue  $rr$  porte des dents obliques, et elle est arrêtée par une palette  $\alpha$  affermie sur l'axe  $oo'$ . Une autre palette  $\beta$ , est fixée sur le même axe, à une distance de la première égale à la moitié de l'intervalle de deux dents, et dans un plan passant par l'axe, différent; de manière que, si l'on fait avancer la palette  $\beta$  vers la roue  $rr$ , la palette  $\alpha$  abandonne la dent



qu'elle retenait, la roue se met en mouvement, mais elle est arrêtée au bout d'un instant par la palette  $\beta$ , sur laquelle vient s'appuyer la dent suivante, et la roue s'est déplacée de la moitié de la largeur d'une dent. Si les palettes reviennent en arrière, un nouveau déplacement de la roue a lieu, et la palette  $\alpha$  vient de nouveau l'arrêter. Comme il y a un nombre de dents égal à la moitié du nombre des signes, à chaque mouvement de va-et-vient des palettes, la roue avance d'une dent, et l'aiguille passe sur deux signes.

Les mouvements de va-et-vient des palettes sont produits par ceux du contact, C, d'un électro-aimant E. Ce contact oscille autour de l'axe  $ce$ , et porte un levier  $l$  qui agit sur la fourchette  $f$ , de manière à faire osciller les palettes  $\alpha\beta$  autour de l'axe  $oo'$ . Si donc on lance, de la station opposée, un courant dans l'électro, par le fil de ligne F, courant qui retourne ensuite à la pile par le fil T qui communique avec le sol, le contact C est attiré, la palette  $\beta$  quitte la dent qu'elle retenait, la palette  $\alpha$  arrête aussitôt la dent suivante qui vient la frapper, et l'aiguille  $e$  est passée d'un signe au suivant. Si l'on supprime le courant, le contact s'écarte en obéissant au ressort de rappel  $s$ , et l'aiguille marche encore d'un signe.

Pour que l'appareil fonctionne régulièrement, et que les signes puissent se succéder rapidement, il faut que la masse du contact, l'amplitude de ses oscillations, et la force du mouvement d'horlogerie soient dans des rapports convenables. Il faut aussi que le ressort de rappel  $s$  ait une tension en rapport avec la puissance de l'électro-aimant, laquelle change avec les pertes d'électricité dépendant de l'état de l'atmosphère. Un rhéomètre fait connaître l'intensité du courant, et l'on ajoute ou retranche quelques couples à la pile, et l'on modifie la tension du ressort  $s$  en faisant tourner le bouton  $b$ ; le fil  $ap$ , qui passe dans un anneau  $a$ , s'enroule sur le cylindre  $p$  et tend plus ou moins ce ressort.

**Manipulateur.** — Le manipulateur (fig. 1592) consiste en un disque métallique, sur lequel sont gravés les mêmes signes que sur le récepteur; il est fixé par trois colonnes sur une table horizontale. Une manette,  $m$ , adaptée à charnière sur un arbre mobile placé au centre, peut être soulevée et portée successivement sur les différentes lettres, et y être arrêtée au moyen d'un talon qui s'enfonce dans des crans. Elle entraîne dans son mouvement l'arbre central, auquel est fixée une roue métallique  $rr$ , dans l'épaisseur de laquelle est creusée une rainure présentant des sinuosités régulières, dont les parties convexes sont en nombre égal à la moitié des signes. Le disque est représenté déchiré pour laisser voir une partie de la rainure, dans laquelle s'enfonce une cheville adaptée à l'extrémité d'un levier métallique L, qui reçoit un mouvement d'oscillation autour du point  $o$ , quand la roue  $rr$  tourne sur elle-même. En même temps, l'extrémité de ce levier vient toucher alternativement des arrêts à ressorts  $a'$ ,  $a$ , dont un  $a'$ , communique en P avec l'un des pôles de la pile, et l'autre, par la borne R, avec le fil du récepteur de la station, fil dont l'autre extrémité va dans le sol.

Quand on fait tourner la roue, en faisant franchir à la manette  $m$ , par



passé pas par le récepteur de la station, mais il continue sa route et va faire jouer le récepteur d'une station plus éloignée, les gouttes *e*, *e'* communiquant avec la continuation du fil de la ligne.

**2295. Appareil de démonstration.** — Dans le principe, on faisait mouvoir l'aiguille *i* (fig. 1593) au moyen de l'électro-aimant *e*, faisant osciller une ancre *aa*, dont les crochets, en pressant sur le milieu de la partie oblique d'une dent de la roue, la font glisser et s'avancer d'une quantité égale à la moitié de sa largeur; comme on le voit à part, en *R'*, où la dent *a*, pressée par le crochet *a'*, vient en *a'*. En *sr* est un manipulateur dans lequel les interruptions du courant sont produites par les crans remplis de bois de la roue *r*, sur le contour de laquelle s'appuie un ressort *s* communiquant avec le fil de ligne. — Cet appareil ne peut fonctionner qu'à courte distance, le courant, affaibli par un long parcours, ne pouvant faire mouvoir la roue *R*. Wheatstone a donc renoncé à faire agir l'électro-aimant comme moteur, chargeant de ce rôle un mouvement d'horlogerie toujours monté, et l'électro-aimant n'ayant plus qu'à fournir le faible travail nécessaire pour déplacer un arrêt.

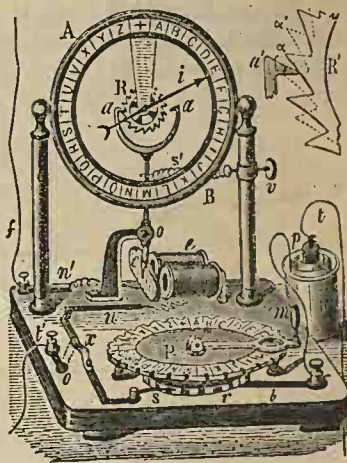


Fig. 1593.

**2296. Télégraphe à clavier et cadran de M. Froment.** — On reproche aux télégraphes à cadran la lenteur avec laquelle se succèdent les signes, la manette devant parcourir une partie d'autant plus grande de la circonférence, que la lettre à signaler est plus éloignée de celle que l'on vient d'indiquer. On ne dépasse guère, en moyenne, une lettre par seconde. De plus, si le récepteur et le manipulateur cessent d'être d'accord, l'erreur se perpétue dans les signaux qui suivent. Mais la facilité avec laquelle chacun peut en comprendre le jeu rend ce système précieux dans beaucoup de cas. Plusieurs physiciens se sont donc appliqués à en simplifier la manipulation, à en rendre le jeu plus sûr, et à augmenter la rapidité des signaux.

L'appareil suivant présente, à ces divers égards, de notables perfectionnements. C'est principalement par le manipulateur que cet appareil diffère des autres télégraphes à cadran. On y distingue un clavier de 28 touches portant les lettres de l'alphabet (fig. 1594), et il suffit d'abaisser une de ces touches pour que le signe qu'elle porte soit indiqué sur le récepteur de la station opposée. Pour cela, il y a au-dessous du clavier un arbre d'acier, figuré à part en *ab*, à l'extrémité duquel est fixée la roue à interruptions, présentant 14 dents et 14 inter-

valles. Cet arbre porte des chevilles formant une spire d'hélice, et en nombre égal à celui des touches, et un mouvement d'horlogerie le fait tourner, avec une vitesse de 2 à 3 tours par seconde, dès qu'en abaissant une touche on déplace un cliquet engagé dans les dents d'une roue. Chaque touche porte en dessous un mentonnet qui arrête la cheville qui lui correspond, de manière que la roue d'interruption s'arrête après que le courant a passé un certain nombre de fois qui dépend de la touche abaissée, et que, par conséquent, l'aiguille du récepteur a franchi un nombre égal de signes. Dès que la touche est abandonnée à elle-même, un ressort la relève, et le cliquet, en retombant, arrête le mouvement d'horlogerie. Le plus souvent, les touches sont disposées en deux rangées; les chevilles de la première moitié de l'hélice sont arrêtées par la première rangée, et celles de l'autre moitié, par la seconde rangée. — Malgré la rapidité du mouvement de l'arbre, cet appareil est construit avec tant de perfection, qu'on peut faire glisser le doigt

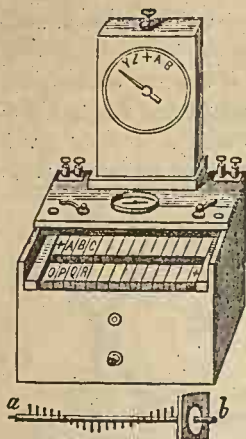


Fig. 1594.

au hasard sur le clavier, sans que le récepteur et le transmetteur cessent d'être d'accord.

**2297. Télégraphe à signaux de Chappe.** — Dans ce système, d'abord adopté en France jusqu'en 1855, on s'était proposé de reproduire les signaux des anciens télégraphes aériens. Les appareils, construits par M. Breguet, consistaient en deux télégraphes à cadran (2295) fonctionnant simultanément, afin de combiner les mouvements de deux ailes mobiles; ce qui exigeait deux fils de ligne; tandis que d'autres télégraphes, ayant reçu la sanction d'une pratique de plusieurs années, n'en exigeaient qu'un seul. L'adoption des anciens signaux était donc un pas fait en arrière; aussi, n'a-t-on pas tardé à les abandonner.

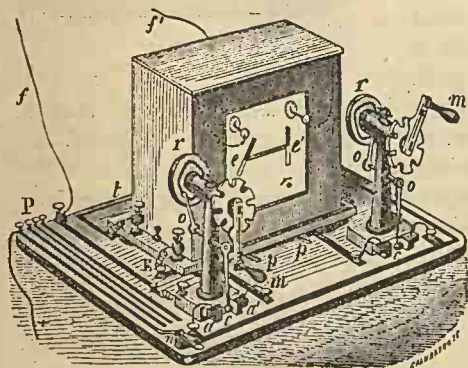


Fig. 1595.

La figure 1595 représente l'ensemble de l'appareil. Chaque récepteur est muni de son mouvement d'horlogerie et de son fil de ligne *f*, *f'*. Les ailettes *e*, *e'* ne prenant que 8 positions différentes, les roues d'échappement n'ont que

4 dents, comme on le voit en  $r, r'$  (fig. 1596). Les manipulateurs sont verticaux,  $om, om$  (fig. 1595), et les rainures des roues métalliques  $r, r'$  ne présentent que 4 parties saillantes. On voit en AB (fig. 1596) les 8 signes correspondant à une des positions verticales de l'aillette de gauche.

**2298. Télégraphe synchronique de MM. Siemens et Halske.** —

Dans les télégraphes à cadran ordinaires, celui qui reçoit une dépêche doit attendre, avant de répondre, que son correspondant cesse d'envoyer des signaux. Avec le système suivant, les deux stationnaires peuvent s'interrompre mutuellement, et converser absolument comme ils le feraient de vive voix<sup>1</sup>. Dans ce système, le récepteur et le manipulateur de chaque station sont remplacés par un appareil unique à deux fins, qui fonctionne de la même manière pour recevoir et pour envoyer une dépêche. Cet

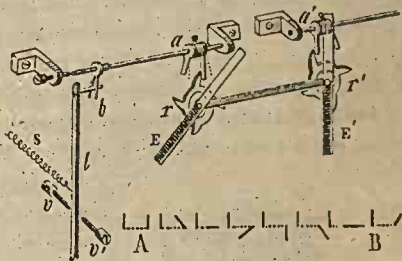


Fig. 1596.

appareil n'est autre chose qu'un *trembleur* de forme particulière, dont l'armature mobile pousse à chaque oscillation, par le moyen d'un cliquet, une roue à dents portant l'aiguille indicatrice. Une même pile fournissant un courant continu au circuit, les armatures oscillent synchroniquement aux deux stations, et les aiguilles tournent par saccades, en passant aux mêmes instants par les mêmes lettres. Si maintenant on arrête une des aiguilles sur une lettre, ce qui interrompt les mouvements de l'armature, et si cela a lieu quand celle-ci est au milieu de son excursion, le courant est supprimé dans tout le circuit, et l'aiguille de la station opposée s'arrête sur la même lettre, avec son armature écartée de l'électro-aimant. Si l'aiguille de la première station est abandonnée à elle-même, les deux aiguilles se remettent à tourner jusqu'à ce que l'on arrête l'une d'elles sur une autre lettre. Pour arrêter les aiguilles, il y a autour du cadran des touches que l'on peut abaisser, et qui arrêtent un levier placé en dessous, parallèle à l'aiguille et tournant avec elle.

La figure 1597 représente les principales pièces de l'appareil de M. Siemens. EE sont les extrémités des branches de l'électro-aimant, munies de pièces

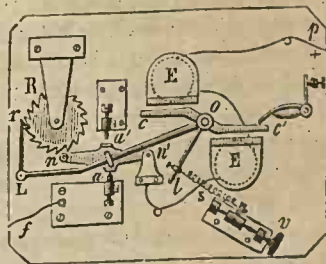


Fig. 1597.

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XVII. p. 402.

polaires entre lesquelles oscille autour du point *o*, le double contact *cc'*. Ce contact entraîne dans ses mouvements le levier *oL*, qui pousse le cliquet à ressort *r*, agissant sur la roue à rochet *R* qui porte l'aiguille indicatrice. Le système est ramené en arrière par le bras *ol* et le ressort *s*. Le levier *oL* transmet ses oscillations à une pièce *nn'*, mobile autour du point *n'*, en poussant les oreilles *a*, *a'* quand il s'approche des limites de ses excursions. La pièce *nn'* vient alors toucher alternativement des vis qui l'arrêtent. Le courant de la pile venant de *p* parcourt l'électro-aimant *EE*, passe en *n'*, de là dans l'arrêt *a*, quand le levier *oL* est abaissé, puis dans le fil de ligne *f*, arrive à l'autre station, y traverse le second appareil et revient à la pile par le sol. Ce télégraphe marche avec une grande régularité et une grande sûreté.

**2299. Télégraphe magnéto-électrique à cadran.** — On a imaginé un grand nombre de télégraphes à cadran<sup>1</sup>. Wheatstone en a construit plusieurs dans lesquels la pile est remplacée par une machine magnéto-électrique, servant de manipulateur. Le premier qu'il ait publié (*fig. 1598*) est une espèce de machine de Clarke, dans laquelle l'électro-aimant *E* reçoit son mouvement de rotation d'une roue dentée *r* et d'un pignon *p*. Les lettres sont gravées sur un plateau *A*, et à chacune d'elles correspond un manche, que l'on amène et que l'on arrête en face d'un repère *II*. Le nombre des dents de la roue *r* est tel que l'électro-aimant fait un demi-tour quand on

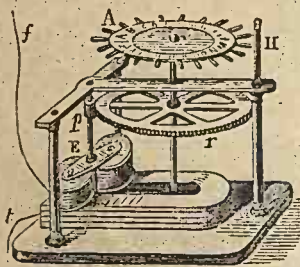


Fig. 1598.

remplace, devant le repère *II*, une lettre par la lettre suivante, et, si les pôles de l'électro-aimant étaient d'abord en présence de ceux de l'aimant, il se forme deux courants consécutifs de même sens, qui se confondent en un seul. Si l'on fait faire un tour entier à l'électro-aimant, il se produit deux courants induits consécutifs de sens contraire (2265); de manière qu'il passe deux signes par tour sur le récepteur à cadran, de même qu'il en passe deux du plateau *A* devant le repère *II*. — Le récepteur est disposé comme celui des autres télégraphes à cadran; seulement, l'aiguille est remplacée par un disque de carton portant les lettres, et caché par un écran percé vers le haut d'une fenêtre qui permet de voir passer les lettres, et de distinguer celles qui s'arrêtent pendant un instant. — Cet appareil ne peut servir que pour de courtes distances, les courants induits n'étant pas assez brusques pour agir au loin. Wheatstone a levé cette difficulté dans des appareils perfectionnés qui sont employés à Londres.

**2300. III. TÉLÉGRAPHES ENREGISTREURS.** — Les télégraphes enregistreurs offrent l'avantage précieux de conserver les signaux transmis, ce qui met à l'abri des erreurs de lecture et de transcription. De plus, les erreurs restent

<sup>1</sup> V. *Exposé des applications de l'électricité*, par le comte du Moncel, 3<sup>e</sup> éd., t. III, p. 24.

isolées et n'ont pas d'influence sur les signes suivants. Pendant que Stenheil écrivait des signaux au moyen de l'électricité (2290), Morse, professeur à New-York, travaillait au télégraphe enregistreur qui porte son nom, et dont il dit avoir conçu l'idée dès l'année 1832.

**Télégraphe de Morse.** — Cet appareil, très-simple, nommé aussi *télégraphe américain*, a reçu successivement divers perfectionnements. La figure 1599 représente un modèle de *récepteur* de MM. Digney et Beaudoin. L'L est un levier pouvant osciller autour de l'axe *o*, sous l'influence de l'électro-aimant *E* et du ressort de rappel *s*, et dont les oscillations sont limitées par les têtes de vis *v, v*. Ce levier porte en *L'* une pointe émoussée en acier, ou *style*, qui s'appuie sur un ruban de papier *mn*, enroulé sur le dévidoir *D*, et constamment entraîné par deux rouleaux tournants *r, r'*, entre lesquels il est pressé comme entre les cylindres d'un laminoir. Un de ces rouleaux, *r*, est mu par un mouvement d'horlogerie caché derrière la plaque *AB*, et qui se monte au moyen de la clef *C*.

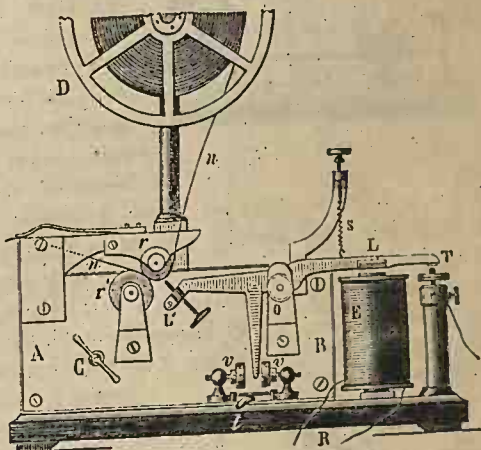


Fig. 1599. — 1/1

Quand le levier s'élève en *L'*, la pointe fait, par pression, sur le papier, un trait plus ou moins long. Une rainure pratiquée circulairement sur le cylindre *r*, au-dessous du style, facilite le refoulement du papier. Si le courant ne passe dans l'électro que pendant un instant, le style trace un point un peu allongé; si le courant passe pendant un temps plus long, le style marque un trait. C'est par la combinaison des points et des traits que l'on forme les différents signaux. Voici le tableau des combinaisons adoptées en France :

---	---	---	---	.	....	---	....	---	---
a	b	c	d	e	é	f	g	h	ch
..	---	---	....	---	---	---	---	---	---
i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
...	-	....	---	....	---	---	---	---	---
s	t	u	ñ	v	w	x	y	z	
---	---	---	....	....	....	---	---	---	---
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

Le mouvement d'horlogerie ne doit être en marche que pendant la transmission des signaux; dans certains appareils, la première oscillation du levier L'L déplace un arrêt qui fait partir l'horloge; mais on préfère généralement confier ce soin au stationnaire, qui met les rouages en mouvement, en poussant la tige *l* dès qu'il entend le bruit que fait le levier oscillant, bruit qui est même assez fort pour dispenser d'avoir une sonnerie d'appel. Avec l'appareil de Morse, on peut généralement écrire de 10 à 14 mots par minute, et en déchiffrer un nombre double sur le ruban de papier.

**Manipulateur.** — Ce petit appareil, désigné sous le nom de *clef* ou *levier-clef*,

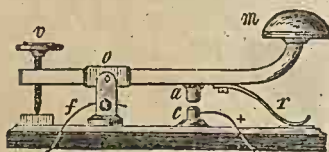


Fig. 1600. —  $\frac{1}{3}$

consiste en un levier métallique *om* (fig. 1600), mobile autour de l'axe *o* qui communique avec le fil de ligne *f*. La borne ou *enclume* *c* communique avec l'un des pôles de la pile. Si l'on abaisse le levier, en appuyant sur la tête *m*, le marteau *a* vient toucher l'enclume *c*, et le circuit est fermé. Quand on cesse d'appuyer, le levier se relève par l'action du ressort *r*, et le circuit est ouvert.

Il suffit donc, pour produire à la station opposée, des points ou des traits, d'appuyer sur la tête *m* pendant un temps très-court, ou pendant un temps double ou triple du premier. La vis *v* sert à régler l'amplitude des oscillations du levier. Les employés ont bientôt acquis l'habitude d'opérer avec une rapidité et une sûreté merveilleuses, et même de connaître la dépêche, soit à l'inspection des mouvements du style, soit au son qu'il produit en formant les points et les traits; les premiers sont accompagnés du bruit que l'on produit en prononçant *di*, et les seconds, en prononçant *do-o*.

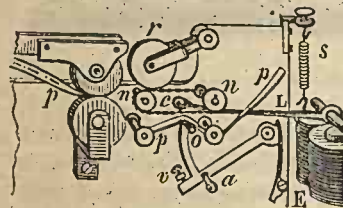


Fig. 1601.

La lecture de la bande écrite est pénible, surtout à la lumière de la lampe. Morse a essayé successivement différentes sortes de crayons, des styles forés remplis d'encre; mais il en est revenu à la pointe d'acier. M. Thomas John a levé la difficulté en armant le style d'une petite molette plongeant dans l'encre par sa partie inférieure. — La figure 1601 représente une autre disposition due à MM. Vinay et Gaussin. Le ruban de papier *ppp* glisse sur un cylindre *o*, qui lui fait faire le genou, et au-dessus duquel passe une chaîne sans fin, enduite d'encre grasse par le rouleau *r*, et entraînée par les poulies *n, n*. Quand le levier *Lc* s'abaisse, en obéissant à l'électro *E*, il appuie, au moyen d'un couteau *c*, la chaîne sur le papier, qui reçoit l'empreinte d'un point ou d'un trait, suivant la durée du contact. — Si l'on suppose que la chaîne sans fin soit supprimée, et que le couteau *o* appuie directement la bande de papier par dessous sur une molette placée en *n* et prenant l'encre sur



le rouleau tournant *n*, on aura le système de MM. Digney frères, généralement adopté aujourd'hui.

**2301. Translateur.** — M. Stenheil a ajouté au télégraphe de Morse un *translateur*, au moyen duquel un message reçu à une station peut être transmis automatiquement à la suivante. Le levier *L* (fig. 1599) porte un prolongement *T*, qui vient s'appuyer, à chaque oscillation, sur un bouton, de manière à fermer le circuit de la pile principale de la station, circuit dont fait partie le *récepteur* de la station suivante. On peut aussi laisser passer la dépêche par les stations intermédiaires sans qu'elle s'y inscrive. Pour cela, la station à laquelle est destinée la dépêche ayant été désignée, les employés des stations intermédiaires tournent un *conjoncteur* de manière que le relai lance vers les stations suivantes le courant de la pile principale, la pile locale qui fait jouer le récepteur étant alors séparée du relai. Il existe beaucoup d'espèces de translateurs.

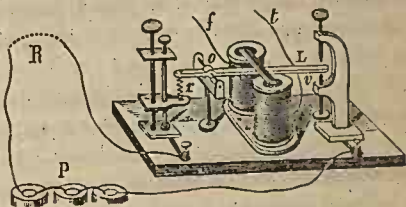


Fig. 1602. — 1/6

les le courant de la pile principale, la pile locale qui fait jouer le récepteur étant alors séparée du relai. Il existe beaucoup d'espèces de translateurs.

**2302. Relais.** — Quand le télégraphe de Morse était armé d'un style produisant une empreinte, il exigeait un courant intense; de sorte que, pour les longs circuits, qui affaiblissent le courant, il lui fallait le secours d'un *relai*. Les relais, imaginés par Wheatstone, ont pour objet de lancer dans le récepteur, le courant d'une *pile locale* de 3 ou 4 couples, précisément à l'instant où le courant de la station opposée est lui-même lancé dans la ligne. Il existe beaucoup d'espèces de relais : la figure 1602 en représente un modèle. Le courant de la ligne, *st*, excite un électro-aimant; celui-ci abaisse le levier *L* mobile autour de l'axe *o*, et lui fait toucher une vis *v* qui communique avec l'un des pôles de la *pile locale* *P*, de manière à fermer le circuit de celle-ci, dont l'autre pôle communique, par le ressort de rappel *r*, avec le levier *L*. En *R*, est placé le *récepteur*, qui est ainsi actionné par la pile locale.

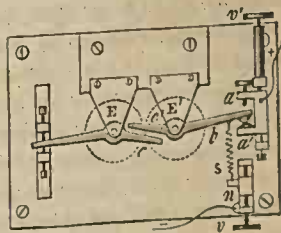


Fig. 1603.

M. Siemens a imaginé un *relai* (fig. 1603) qui marche sous l'influence d'une très-faible force. *E, E'* sont les pôles opposés de deux électro-aimants simples parcourus par le courant de la ligne. Aux deux bases des barreaux sont fixées des pièces de fer doux, *c, c'*. Le barreau qui porte la pièce *c'* peut tourner, dans sa bobine, sur deux pointes s'enfonçant au centre de ses bases, tandis que la pièce *c* est fixe. Quand le courant de la ligne passe dans les électros *E, E'*, la pièce *c'* est attirée par *c*, et le bras de cuivre *b* vient toucher l'arrêt *a*, qui communique avec l'un des pôles de la pile

locale, dont l'autre pôle  $n$  communique avec le bras  $b$ , par le ressort de rappel  $s$ . Quand le courant cesse de passer en  $E, E'$ , le bras  $b$  vient buter contre un arrêt isolé  $a'$ . La vis  $v'$  sert à régler la position d'une plaque qui porte les arrêts  $a, a'$ , et la vis  $v$ , à régler la tension du ressort de rappel  $s$ .

Il est difficile, dans la construction des relais, d'obtenir un rappel suffisamment prompt de l'armature mobile, tout en donnant au ressort assez peu de force pour qu'il cède quand on emploie un faible courant. M. Hipp a imaginé de remplacer le faible ressort de rappel par deux forts ressorts antagonistes, en leur laissant une différence de force très-petite. Le rappel du levier est alors beaucoup plus rapide.

M. Hipp a aussi apporté au télégraphe de Morse une modification au moyen de laquelle on peut se passer du relai et de la pile locale : il charge le mouvement d'horlogerie d'imprimer au levier écrivant les mouvements par lesquels sont tracés les points et les traits. L'électro-aimant ne fait plus alors que mettre ce levier en rapport avec les rouages quand le courant de la pile passe. Le levier s'écarte ensuite dès que le courant est interrompu.

Les relais sont employés dans un grand nombre de systèmes télégraphiques ; avec leur secours, il n'y a pas de limites dans les distances auxquelles peuvent agir des courants lancés par une même pile.

**2303.** Le télégraphe Morse, à cause de sa simplicité, a été généralement adopté. Mais il n'est arrivé à l'état où nous le voyons aujourd'hui qu'après avoir été successivement perfectionné par divers inventeurs. A l'époque où Morse en indiquait le principe, il n'était pas réalisable ; et même on ne croyait pas alors à la possibilité d'exciter un électro à une grande distance, les lois des électro-aimants n'étant pas encore connues. Dans ses premiers essais, Morse employait un électro dont l'hélice était formée du même fil que la ligne, et il n'obtenait quelques résultats qu'en lui donnant des dimensions telles que deux hommes avaient de la peine à le soulever. Ce n'est qu'après que Wheatstone eut montré l'avantage, surtout pour les courants faibles, d'employer de petits électros à fil très-fin faisant un grand nombre de tours, et qu'on eut reconnu qu'ils possèdent leur maximum de puissance quand la résistance de l'hélice magnétisante est égale à celle de la pile, ou mieux à celle du circuit (2132), que Morse, s'emparant de ce résultat, put obtenir des effets satisfaisants. On peut donc dire qu'une grande part à l'invention du télégraphe américain est due à Wheatstone<sup>1</sup>.

On reproche à ce télégraphe d'être un peu lent. La nécessité de laisser un intervalle distinct entre les groupes de traits ou points qui représentent les lettres, fait surtout perdre du temps. Aussi, une foule d'inventeurs se sont-ils appliqués à en rendre la manœuvre plus rapide. On a fait des appareils à deux styles, à manipulateurs mécaniques, à transmission automatique, la dépêche préparée d'avance étant confiée à un appareil qui se charge de la transmettre, comme nous allons le voir.

<sup>1</sup> V. *Exposé des appl. de l'électricité*, par le comte du Menecl (3<sup>e</sup> édition), t. III, p. 85.

**2304. Transmetteurs automatiques.** — Morse paraît avoir, le premier, employé la transmission automatique, et il a imaginé pour cela diverses dispositions. Par exemple, on découpe les extrémités de bandes de cuivre, de manière à y laisser des saillies rectangulaires plus ou moins longues représentant des traits et des points, et formant les divers signes; puis, on dispose ces bandes les unes à la suite des autres dans le même plan, de manière à former les mots de la dépêche, comme dans une composition d'imprimerie. On fait ensuite passer ce système sous un ressort, qui est soulevé par les parties saillantes de manière à fermer le circuit, et qui retombe en l'ouvrant, pendant le passage des parties basses. D'autres fois, ces bandes de cuivre sont arrangées en hélice autour d'un cylindre qui tourne au-dessous du ressort.

M. Bain, dans son télégraphe électrochimique (2307), remplaçait le levier-clef de Morse par le système qui suit : La dépêche est préparée d'avance en traits et points percés à jour dans un ruban de papier, au moyen d'une petite machine spéciale. Elle est ensuite engagée dans le transmetteur, où elle passe sur un cylindre métallique communiquant avec la pile et mu par un mouvement d'horlogerie. Un style émoussé communiquant avec le fil de ligne s'appuie sur le cylindre, et en est séparé par le papier de manière à intercepter le courant. Mais quand un point ou un trait à jour passe sur le style, il touche le cylindre, et le circuit est fermé momentanément. M. Bain pouvait ainsi enregistrer jusqu'à 1,500 points ou traits par minute.

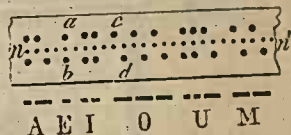


Fig. 1604.

**2305. Télégraphe rapide de Wheatstone.** — La transmission automatique se prête à une plus grande rapidité dans la succession des signaux, que la transmission à la main; mais sur les longs circuits, il y a une limite à cette rapidité, à cause de l'état variable des courants émis, et surtout du temps nécessaire à la décharge, temps à peu près double de celui qu'exige l'établissement de la charge. Si l'on veut aller trop vite, les émissions successives se mêlent, et l'on n'obtient que des résultats confus. Wheatstone est parvenu à combiner des appareils qui permettent d'enregistrer jusqu'à 110 dépêches par heure, et dont nous allons chercher à donner une idée.

La dépêche est d'abord préparée sur un ruban de papier. Au milieu du ruban (fig. 1604) est une série de petits trous équidistants *nn'* servant à guider et à entraîner régulièrement le ruban sur le transmetteur; de chaque côté de cette série, sont des trous plus gros représentant les signes. Deux trous droits *a, b*, placés sur la même perpendiculaire au ruban, correspondent au point du système de signaux de Morse, et deux trous placés obliquement *c, d*, correspondent à un trait. Une petite machine à 3 touches, sur lesquelles on frappe dans l'ordre convenable, sert à former les trous de manière à traduire la dépêche, et cela se fait si rapidement qu'on ne pourrait la copier plus vite à la

plume. La partie la plus remarquable de l'appareil de Wheatstone est le transmetteur.

**Transmetteur.** — Les pièces proprement dites de cet appareil (fig. 1605) sont appliquées sur une platine verticale EE, derrière laquelle est un mouvement d'horlogerie mu par un poids. Le ruban de papier marche sur une plate-forme  $\pi\pi'$ , où il est entraîné par une molette  $m$ , sur laquelle il est pressé par le rouleau T, et dont les dents s'engagent dans les petits trous de la série  $mn$  (fig. 1604).

Le mouvement d'horlogerie fait osciller vivement un balancier en ébonite  $ab$  (fig. 1605) portant deux goupilles, dont une,  $a$ , communique directement avec le fil de ligne, et l'autre,  $b$ , avec la règle métallique E', qui communique auss

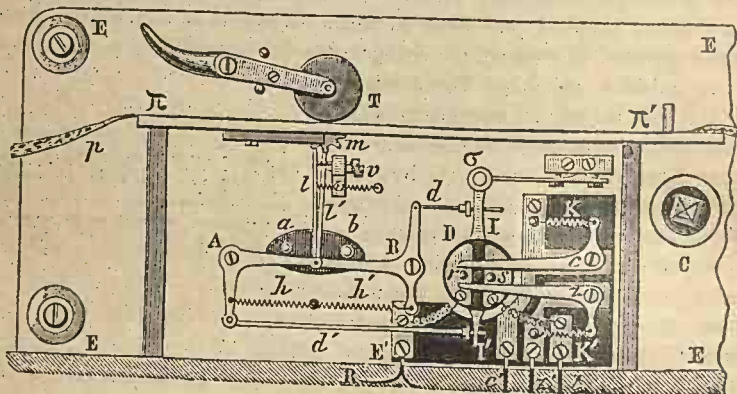


Fig. 1605. — 1/2.

avec la ligne, mais par l'intermédiaire d'une caisse de résistance (2082). Sur ces goupilles, s'appuient deux leviers coudés, A, B, tirés par les ressorts  $h, h'$ , et dont les bras horizontaux, qui ne se touchent pas, font osciller verticalement deux broches  $l, l'$  traversant la plate-forme  $\pi\pi'$  par des trous qui leur servent de guides, pendant que des ressorts les tiennent appuyées sur les vis de réglage  $v$ .

Les leviers A, B font osciller sur son centre un disque d'ébonite D, au moyen des tringles  $d, d'$ , dont les extrémités traversent les bras I, I', de manière à ne les déplacer qu'en poussant, ces bras restant en place pendant le recul des tringles. Un galet à ressort  $c$  les maintient dans la position où ils ont été laissés.

Le disque D porte deux goupilles  $r, s$ , portées par deux secteurs de cuivre, et qui viennent pendant les oscillations toucher alternativement les leviers coudés  $c, z$ . Le levier  $c$  communique en  $c'$  avec le pôle positif de la pile, et le levier  $z$  avec le pôle négatif. Ces deux leviers, tirés par les ressorts K, K', sont maintenus écartés par une vis à pointe isolée, non représentée.

Voyons maintenant ce qui se passe pendant les oscillations du balancier  $ab$ , et admettons d'abord que le récepteur soit assez rapproché pour qu'il n'y ait pas à considérer l'état variable des courants.

1° Supposons que, le ruban de papier présentant au-dessus de  $m$  deux trous droits, le balancier s'abaisse à gauche; la goupille  $b$  s'élève ainsi que le levier  $B$ , et la broche postérieure  $V'$  est soulevée et passe par le trou du bord postérieur du ruban. En même temps le bras  $I$  est poussé à droite, et la goupille  $r$  du disque  $D$  soulève le levier  $c$ , et  $s$  abaisse le levier  $z$ . Le courant positif passe donc par  $c'erE'$ , va dans la goupille  $b$ , puis par  $Bh'hA$  dans la goupille  $a$  et le fil de ligne. En même temps le pôle négatif de la pile communique avec la terre par  $z'st$ . Le courant lancé dans la ligne commence alors un point sur le récepteur enregistreur placé à la station opposée.

2° Le balancier s'inclinant en sens contraire, la goupille  $b$  abaisse le levier  $B$ , qui laisse en place le bras  $I$ ; et le levier  $A$ , montant avec la goupille  $a$ , la broche  $l$  est soulevée; et comme elle est un peu à gauche de  $V'$ , elle rencontre le trou antérieur, le papier ayant marché de la distance des trous de la série  $mn$  (fig. 1604). Le levier  $A$  pousse la tringle  $d'$  (fig. 1605), et la goupille  $r$  presse le levier  $z$ , et  $s$ , le levier  $c$ . Le courant positif va dans la terre par  $c'est$ ; et la ligne communique avec le pôle négatif de la pile par  $z'zrE'$ , et  $h'hAa$ . Le courant de la ligne est donc négatif, et il se produit un blanc sur le récepteur. Ainsi les deux demi-oscillations, quand les broches rencontrent deux trous droits, produisent, la première un point, et la seconde un blanc. En l'absence du ruban de papier, on aurait donc au récepteur, si le balancier continuait à osciller régulièrement, une série de points égaux séparés par des blancs.

3° Supposons que le trou antérieur du ruban soit en arrière de celui du bord postérieur; dans la seconde demi-oscillation du balancier, quand la goupille  $a$  s'élèvera, la broche  $l$ , rencontrant le papier, sera arrêtée, le levier  $A$  ne pourra pas monter, le bras  $I'$  restera en place ainsi que le disque  $D$ , et le courant positif continuera de se rendre en  $E'$ , comme pendant la première demi-oscillation. Mais la goupille  $a$  ne touchant pas le levier  $A$ , ce courant ne pourra passer par cette goupille, et il sera forcé, pour se rendre dans la ligne, de passer par la caisse de résistance qui se trouve sur un des fils partant de  $E'$  et communiquant avec le fil de ligne. Le courant étant ainsi maintenu, le point s'allongera en un trait sur le récepteur.

Dans la troisième demi-oscillation, la goupille  $a$  abaisse le levier  $A$ , dont la tringle  $d'$  en se retirant laisse le bras  $I'$  en place; mais le levier  $B$  ne s'élève pas, la broche  $l$  étant arrêtée par le papier qui n'est pas troué sur le bord postérieur du ruban. Les bras  $I$ ,  $I'$  ne changent donc pas de position et le courant positif passe encore dans la ligne à travers la boîte de résistance, ne pouvant passer par la goupille  $b$ , qui ne touche pas le levier  $B$ . Le trait sera donc encore prolongé.

Enfin, pendant la quatrième demi-oscillation, la broche  $l$  rencontrera le trou antérieur qui est en arrière de l'autre, et il y aura un blanc comme dans la

seconde demi-oscillation. On voit que le trait, se produisant pendant 3 demi-oscillations, sera 3 fois plus long que le point.

**Récepteur.** — Les signes devant s'inscrire très-rapidement, il fallait que les pièces mobiles de l'enregistreur fussent très-légères. Voici le principe du récepteur de Wheatstone. Deux palettes de fer fixées à un arbre de cuivre *o'o* (fig. 1606), dont celle d'en haut se voit en *f*, peuvent osciller entre les pièces polaires *a, b*, de deux électros, et les oscillations sont transmises dans un sens horizontal, par le bras *n*, à l'arbre *c* de la molette *m*, sur le côté de laquelle passe un ruban de papier mu par un mouvement d'horlogerie. Les palettes de fer reçoivent la polarité magnétique des pôles d'un aimant en fer à cheval *M*, à branches horizontales très écartées et échancrées à leur extrémité pour laisser passer l'arbre *o'o*. Il n'y a pas de ressort de rappel, et les oscillations en sens opposé se produisent par la succession dans l'électro, de courants de sens alternatifs.

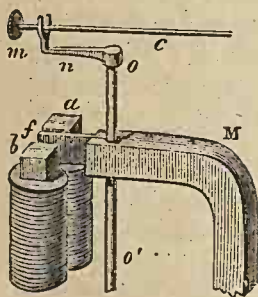


Fig. 1606.

**Compensation.** — Nous avons, dans ce qui précède, fait abstraction de l'état variable dans les émissions et décharges du fil de ligne. Wheatstone a combattu cette influence nuisible, au moyen de dispositions très-ingénieuses. Des commutateurs spéciaux, placés dans le socle de l'appareil, servent au renversement des émissions, et à l'accélération de la décharge; l'interposition d'une caisse de résistance affaiblit le courant quand il doit se prolonger un peu plus pour la formation d'un trait; mais la description de toutes ces pièces nous entraînerait trop loin<sup>1</sup>.

Disons seulement que le merveilleux appareil de Wheatstone, employé sur plusieurs lignes françaises, donne les résultats les plus satisfaisants. Il est en même temps disposé de manière que les dépêches peuvent passer simultanément en sens inverse sur le même fil, ce qui augmente encore la rapidité avec laquelle elles peuvent être débitées. Nous allons donner le principe de ce mode simultané de transmission.

### 2306. Transmission simultanée et en sens inverse par un même fil.

— Ce problème a été résolu par M. Gintl, en 1853, puis par MM. Siemens, Halske, Edlund, Wartmann. Pour arriver au résultat, il suffit de pouvoir faire fonctionner simultanément les relais placés aux deux stations (2302).

La figure 1601 donnera une idée du principe commun adopté par la plupart des inventeurs. Les deux stations sont disposées de la même manière, et les mêmes lettres sont attribuées aux mêmes objets. *EE* est l'électro-aimant du relai, *P* la pile principale. Le fil positif se bifurque en *o*, et ses deux moitiés, parfaitement égales, s'enroulent en sens contraire en faisant le même nombre de tours sur

<sup>1</sup> V. *Étude du télégraphe de Wheatstone*, par A. Letual, Paris, 1876.

l'électro, en formant ainsi un *électro-aimant différentiel*; puis ces deux moitiés passent sur un *rhéomètre différentiel*  $r$ . Les deux branches se séparent ensuite; l'une forme le fil de ligne  $f$ , et l'autre, représentée en ligne ponctuée  $t$ , communique avec le sol en  $T$ , après avoir passé par un *rhéostat*  $R$ . Le fil négatif de la pile vient en  $c$ , où se trouve un *levier-clef*, au moyen duquel on peut le faire communiquer avec le sol. On commence par régler le rhéostat  $R$  de manière que les deux courants qui partent du point  $o$  soient de même intensité, ce qu'indique le rhéomètre  $r$ ; alors l'électro-aimant qu'ils parcourent en sens contraire est à l'état neutre. Cela posé, si l'on fait jouer la clef  $c$ , le courant de la pile  $P$ , qui ne produit aucun effet en  $EE$ , fera fonctionner le relai  $E'E'$  de la station opposée; car le fil  $f'$  communique avec le sol par le point de jonction  $o'$  et le fil  $t'$ ; et, de plus, ce courant aimante l'électro  $E'E'$ , car il passe en  $o'$  de l'une à l'autre des deux parties de fil enroulées en sens contraire. Si en même temps un courant est lancé de la pile  $P'$  dans le relai  $EE$ , on voit que ce dernier fonctionnera, puisqu'il y aura autour de l'électro  $EE$ , indépendamment

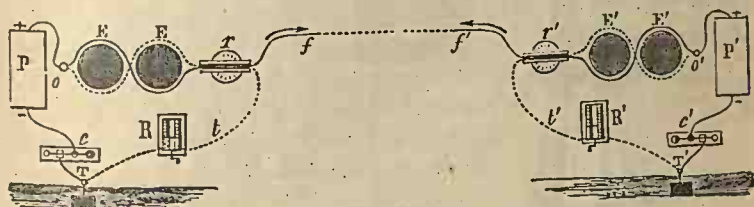


Fig. 1607.

des courants contraires venant de  $P$ , le courant arrivant de  $P'$ , qui rompra l'équilibre magnétique.

**2307. Télégraphes électro-chimiques écrivant.** — En 1839, E. Davy construisit un télégraphe écrivant des signes au moyen de la décomposition de l'iodure de potassium, appareil compliqué, qui exigeait trois fils de ligne. Plus tard, M. Bain appliqua une feuille de papier humide imprégnée de cyanure de potassium, sur un plateau circulaire de métal tournant sur lui-même. Un style d'acier constamment appuyé sur le papier, communique avec le pôle positif de la pile placée à la station opposée, pendant que le plateau est uni au pôle négatif. Quand le courant passe, il traverse le papier humide et décompose le sel; le cyanogène produit avec le fer du style, du bleu de Prusse, formant des points ou des traits, suivant la durée du courant. Le style est porté par un bras à vis qui s'allonge peu à peu et lui fait décrire une spirale sur laquelle sont distribués les signes. Dans cet appareil, il n'y a plus d'électro-aimant, le style restant toujours appuyé sur le papier.

M. Moulleron a perfectionné cet appareil, en faisant passer un ruban de papier, comme dans l'appareil de Morse, entre deux rouleaux, puis sur un cylindre de métal communiquant avec le pôle négatif de la pile. Le style

s'appuie sur le papier, qui est imbibé d'une dissolution inventée par M. Pouget-Maisonneuve, et contenant 5 parties de cyanure de potassium et 150 d'azotate d'ammoniaque, qui entretient l'humidité du papier par son action hygrométrique.

**2308. III. TÉLÉGRAPHES AUTOGRAPHIQUES.** — Les télégraphes *autographiques* reproduisent le *fac-simile* d'une écriture, d'une signature, d'un dessin tracés à la plume. M. Blackwel

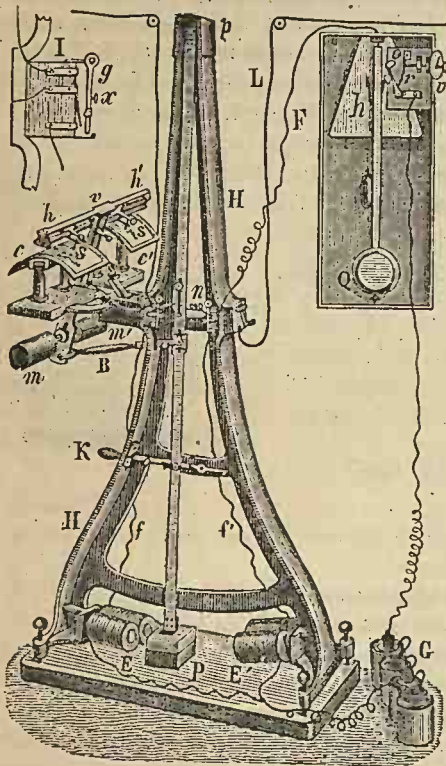


Fig. 1608.

a, le premier, obtenu ce résultat en 1849. Imaginons, à chacune des stations, un cylindre métallique tournant, sur lequel s'appuie un style d'acier ayant un mouvement continu de va-et-vient, suivant les arêtes du cylindre. La dépêche est écrite avec une encre un peu épaisse, sur du papier d'étain appliqué sur le cylindre du *transmetteur*. Ce cylindre est en relation avec un des pôles d'une pile, et le style avec le fil de ligne. Le récepteur est disposé de la même manière; mais le cylindre est garni d'une feuille de papier imbibée de *cyanure de potassium*, sur laquelle le style forme des traits bleus. Quand le style du transmetteur porte sur un trait à l'encre, le courant est intercepté et le trait bleu est interrompu par un espace blanc de longueur égale à l'épaisseur du trait à l'encre. On voit donc que le *fac-simile* sera reproduit par des blancs, réservés sur un fond de hachures bleues.

**2309. Pantélégraphe Caselli.** — Dans l'appareil précédent, les points blancs réservés sont souvent remplis, à cause des perturbations atmosphériques, ou parce que le fil de ligne ne se décharge pas instantanément. Dans le système de M. Caselli, les traces bleues se produisent quand le courant est interrompu, et le *fac-simile* de la dépêche est tracé en lignes bleues sur fond blanc.

Le *transmetteur* de cet appareil (*fig. 1608*) consiste en un pendule *pP* de 2<sup>m</sup> de longueur, suspendu à un bâti en fonte IIII, et dont la lentille, pesant



8 kil., est formée d'une pièce de fer P, lestée par du plomb. Les oscillations de ce pendule sont entretenues par les actions alternatives des électros E, E', et sont *synchrones* avec celles du pendule d'un appareil identique placé à l'autre station. Pour établir ce synchronisme, un *chronomètre régulateur*, hQ, représenté à droite; dont le pendule Q oscille *deux fois plus vite* que le pendule pP, est traversé par le courant d'une pile locale G, toutes les fois que le pendule Q vient presser la pièce o, soutenue par le ressort r. Le courant suit alors le fil F, se bifurque en n, et se rend dans l'un ou l'autre électro-aimant, par les fils f ou f', en traversant des interrupteurs n, m', dont un est représenté à gauche, en I. Quand le pendule pP approche de l'électro-aimant E, il pousse le bouton x de la lame g, et le circuit est fermé en m'. Alors, le pendule est attiré par l'électro; mais, avant qu'il ne le touche, le pendule Q a ouvert le circuit en or, et la masse P est libre de revenir sur ses pas. Quand elle arrive près de l'électro E', le pendule Q, qui oscille deux fois plus vite, ferme le circuit en or, le bouton, x, le ferme en n, et la masse P subit une attraction, qui cesse bientôt par le retour du pendule Q, qui ouvre le circuit en or.

— On obtient le synchronisme des appareils des deux stations, en faisant tourner la *vis micrométrique* v, qui, tendant plus ou moins le ressort r, fait varier l'amplitude et, par suite, la durée des oscillations du pendule Q.

**Enregistreur.** — Le mécanisme, au moyen duquel le style se promène sur la surface écrite, se voit en mBh' (fig. 1608). Le pendule pP, que l'on peut retenir au repos au moyen d'un arrêt k, transmet ses oscillations, par la bielle B, à un levier mv, soutenant une barre horizontale hvh', équilibrée par les masses m, m'. Cette barre entraîne deux styles métalliques très-fins s, s, dont les pointes glissent sur deux portions de cylindres métalliques e, e', sur lesquelles sont appliquées deux dépêches écrites, avec une encre un peu épaisse, sur du papier argenté. A chaque oscillation, chacun de ces styles se déplace de  $\frac{1}{8}$  mm parallèlement à hh', de manière à balayer peu à peu toute la surface cylindrique.

Voici (fig. 1609) comment se fait le déplacement latéral du style. LV est le levier, oscillant autour de l'axe o, et V la section d'une longue vis, qui se voit au-dessous de hh' (fig. 1608) et qui mène un écrou vu à part en u (fig. 1609). Cet écrou est guidé par une règle fixe e, et pousse le style s le long d'une autre règle r, qui peut légèrement basculer autour d'une de ses arêtes. A la fin de chaque oscillation, un cliquet à fourchette ec', mobile autour du point c, est frappé par un arrêt a, a, et pousse alors une roue à rochet fixée à la vis. Celle-ci tourne de  $\frac{1}{24}$  de tour et fait avancer l'écrou u, de  $\frac{1}{8}$  de millimètre.

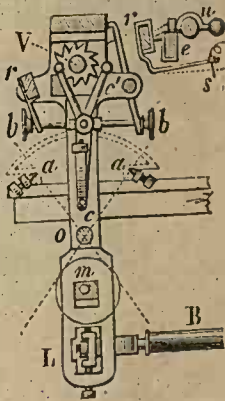


Fig. 1609.

En même temps, la fourchette entraîne les boutons  $b$ ,  $b'$ , et la règle  $r$ ,  $r'$  bascule autour d'une de ses arêtes, en relevant le style  $s$  pendant une des demi-oscillations, et l'abaissant sur la surface cylindrique, pendant l'autre. L'expérience ayant montré que les traces ne sont nettes que pendant le mouvement dans un sens seulement, c'est pour utiliser le mouvement de retour qu'on expédie deux dépêches à la fois, sur deux surfaces cylindriques  $c$ ,  $c'$  (fig. 1608).

Le récepteur est fait comme le transmetteur, seulement le papier argenté est remplacé par du papier imbibé de cyanure de potassium, et le style est en fer. Toutes les fois que le style du transmetteur passe sur un trait à l'encre, qui rompt le circuit, un courant passe par le style du récepteur et trace un trait bleu de longueur égale à la largeur du trait d'encre à l'endroit traversé; de manière que les traits tracés sur le papier argenté sont reproduits en hachures parallèles très-serrées, comme on le voit dans le mot *Caselli* (fig. 1610).

Voici comment est établie la communication entre le transmetteur et le récepteur. P (fig. 1610) est une pile, autre que celle qui fait mouvoir les pen-



Fig. 1610.

dules, et dont le courant se rend par le fil B dans le fil de ligne L, en traversant une petite pile locale  $p$ , donnant un courant de même sens. En  $p'$ , le premier courant traverse une autre pile locale *symétrique* de  $p$ , passe par le récepteur électrochimique R, et retourne à la pile P par la terre. Le courant de P peut aussi passer par le circuit BTa, et le transmetteur T. — Quand le style du transmetteur repose sur un trait d'encre, le courant de P passe par la ligne L, en s'ajoutant à celui de  $p$ , qui, affaibli par les pertes, ne détruit qu'en partie celui de  $p'$ ; et une trace bleue se forme en R. Quand, au contraire, le style s'appuie en T sur le métal, la pile P se décharge par BTa, et la ligne, plus résistante, ne reçoit rien. Le courant de  $p$  est détruit par celui de  $p'$ , qui même l'emporte en R à cause des pertes de la ligne, et qui, étant inverse du courant de P, détruit en R le reste de ce courant, sans décharger la ligne L; et c'est là la destination des petites piles  $p$ ,  $p'$ .

Les télégraphes autographiques n'ont pas été généralement adoptés; le synchronisme des deux appareils est difficile à maintenir, et le public n'a pas souvent besoin d'obtenir aussi rapidement un *fac-simile*, qui peut lui être envoyé par la poste dans un délai très-rapproché. Cependant, ce système est seul praticable pour les nouvelles, dans les pays, comme la Chine, où l'écriture n'est pas

alphabétique, et dans ce cas l'appareil de M. Caselli, surtout après les divers perfectionnements qu'il a reçus, est réellement précieux.

**2310. IV. TÉLÉGRAPHES IMPRIMEURS.** — Aussitôt après avoir inventé le télégraphe à cadran, Wheatstone eut l'idée d'imprimer, au moyen d'actions électromagnétiques, les lettres gravées en relief sur le contour d'un disque tournant. Depuis, une foule de physiciens et d'artistes sont arrivés, à force d'habileté et de sagacité, à construire des télégraphes imprimants. Il en existe un grand nombre; mais, en général, les appareils sont compliqués et lents, principalement à cause de la nécessité d'arrêter la roue des types pour frapper la lettre, puis de revenir chaque fois au *final*, pour éviter l'accumulation des erreurs. On pouvait douter qu'on pût arriver à obtenir un appareil prompt et véritablement pratique, lorsque M. Hughes résolut complètement le problème, en imprimant la lettre sans s'arrêter, à la volée; en n'employant qu'une seule émission de

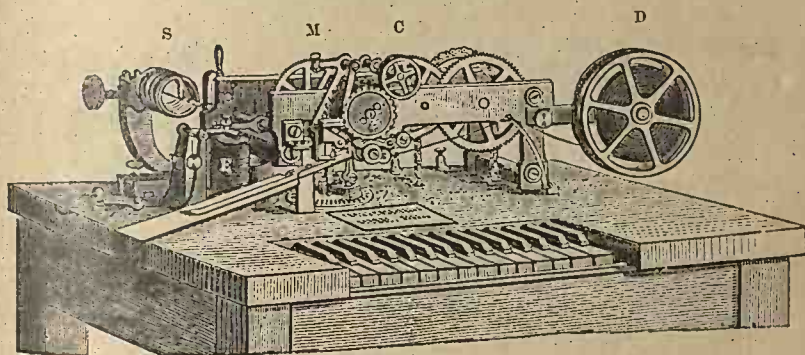


Fig. 1611. —  $\frac{1}{10}$ .

courant pour chaque lettre, quel que soit son rang; et enfin en employant un système de correction qui ramène constamment la roue des types à sa position normale.

**2311. Télégraphe Hughes.** — Aux deux stations sont des appareils identiques comprenant un transmetteur et un récepteur. Ces deux appareils doivent marcher synchroniquement, et nous verrons par quel moyen ingénieux on remplit cette condition. On voit (fig. 1611) l'ensemble d'un appareil construit par MM. Digney. Un poids de 50 kil., que l'on remonte de temps en temps au moyen d'une pédale, fait mouvoir une roue M, par l'intermédiaire d'engrenages, avec une vitesse de 2 tours par seconde. Sur le même axe se trouve la roue des types *t*, garnie de 28 dents, portant en relief des lettres et autres signes. L'arbre de cette roue *t*, est creux et traversé par l'arbre de la roue M, de manière que celle-ci peut continuer à tourner quand la roue *t* est arrêtée. A l'arbre creux de celle-ci est fixée une roue à dents dite *correctrice*, représentée en C (fig. 1614), derrière laquelle est appliquée une roue à rochet, par laquelle le système des

roues corréctrices et des types est entraîné avec la roue M au moyen d'un cliquet, qui peut être soulevé pour la mise au repère (2312). Le ruban de papier venant du dévidoir D passe sous la roue des types, et au moment où le signe à imprimer est en bas, le rouleau imprimeur *r* frappe brusquement de bas en haut, le signe est imprimé et le ruban avance un peu. Ce mouvement du rouleau imprimeur est produit par une émission de courant lancée de l'autre station par le jeu du manipulateur. La roue des types reçoit continuellement l'encre d'un cylindre C, sur lequel on en dépose de temps en temps au moyen d'un pinceau.

**Manipulateur.** — Cette partie de l'appareil (fig. 1611) se compose d'une série de touches disposées comme celles d'un piano, sur lesquelles sont gravés les signes à transmettre, et d'un système *v*, représenté à part (fig. 1612). On y distingue un arbre vertical A, qui reçoit de l'arbre de la roue M, au moyen

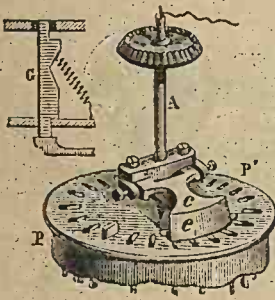


Fig. 1612.

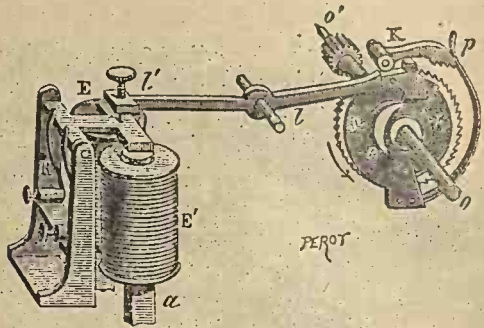


Fig. 1613.

d'un engrenage conique, une vitesse de 2 tours par seconde, égale à celle de la roue des types des deux stations. Cet arbre entraîne un chariot *e* dont l'extrémité *e* rase sans le toucher un plateau fixe PP', portant une couronne de 28 trous, dans lesquels s'engagent les extrémités d'autant de petits barreaux verticaux ou *goujons*, soutenus par des leviers sur lesquels agissent les touches. On voit en G la disposition d'un des goujons. Quand on abaisse une touche, le goujon correspondant est soulevé, dépasse un peu la surface du plateau PP', et le chariot le rencontrant en passant, ferme le courant de la pile. Ce courant passe par les goujons, le chariot et l'arbre A, avant de s'élancer vers la station opposée, où le rouleau imprimeur agit alors et imprime la lettre qui correspond à la touche abaissée, cette lettre arrivant en bas de la roue des types au moment où le chariot touche le goujon, à cause du synchronisme des deux appareils.

**Récepteur.** — Voici comment l'émission du courant fait donner le coup de marteau. La roue M (fig. 1611) fait tourner, avec une vitesse de 20 tours par seconde, un arbre *oo'* (fig. 1613), composé de deux parties indépendantes l'une de l'autre. La première, *o'*, qui tourne constamment, porte une roue à rochet *r*.

L'autre, *o*, tourne seulement quand le cliquet *k* fixé au secteur *s* accroche les dents de la roue à rochet, qui alors l'entraîne avec elle. Le cliquet *k* est habituellement soulevé par le bras *l* du levier *ll*, maintenu par l'attraction d'un contact, par les électros *E*, *E'*, qui sont constamment aimantés par l'influence d'un aimant en fer à cheval *a* placé sous leurs bases inférieures. Quand un courant est lancé dans les hélices, il agit de manière à désaimanter les noyaux, et le contact s'écarte par l'effet d'un ressort antagoniste *R*. Ce système d'électro, qui est susceptible de nombreuses applications, présente cet avantage que le mouvement par écart commence quand le ressort possède son maximum de tension; tandis que si l'action avait lieu par attraction, le mouvement commençant quand la distance est maximum, serait moins brusque. On voit donc que, au moment où le courant est lancé de la station opposée, en passant par le goujon soulevé dans son transmetteur, l'électro abandonne le levier *ll*, et le ressort *p* pousse le cliquet *k* sur la roue à rochet *r*, qui fait faire un tour au secteur *s* et à l'arbre *o*. A la fin du tour, l'excentrique *c* soulève le levier *l*, et ramène le contact sur les pôles de l'électro dont l'aimantation n'est plus neutralisée, le courant instantané ayant cessé. En même temps, le cliquet *k* est soulevé, et la roue *r* tourne en laissant en repos le secteur *s* et l'arbre *o* jusqu'au moment d'une nouvelle émission de courant.

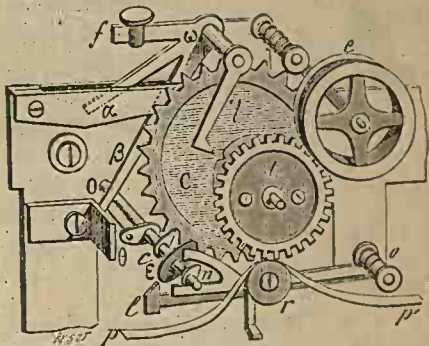


Fig. 1614.

C'est la rotation rapide de l'arbre *o*, dit *arbre à cames*, qui produit le coup de marteau du rouleau imprimeur. L'extrémité antérieure de cet arbre est représentée à part en *Oc* (fig. 1614) où *t* est la roue des types. Le rouleau imprimeur *r* est porté par un levier *no*, terminé par une fourchette, dans l'intérieur de laquelle une came, *n*, fixée à l'arbre *O*, soulève brusquement la fourchette quand l'arbre fait rapidement un tour sur lui-même, et la rabat aussitôt avant de s'arrêter, en poussant la branche inférieure de la fourchette. La lettre qui se trouvait en bas sur la roue des types, est ainsi imprimée sur la bande de papier *pp'* en moins de  $\frac{1}{260}$  de seconde. En même temps, la bande a été un peu déplacée par un cliquet, qui, abaissé par un excentrique *z* agissant sur le levier *lo*, accroche une roue à rochet appliquée contre le rouleau *r*. Celui-ci est garni de fines dents qui entraînent le ruban. — On peut faire passer le courant à travers le récepteur de l'appareil qui envoie, de manière que la dépêche expédiée soit reproduite sous les yeux de l'expéditeur.

**2312. Roue correctrice, etc.** — La roue des types pouvant être un peu

déplacée pendant le coup de marteau, elle est ramenée à chaque fois à sa position régulière, au moyen de la *roue correctrice* C (fig. 1614), qu'une came spéciale *c* déplace légèrement à chaque tour, en s'engageant comme un coin entre deux de ses dents, de manière à la ramener, avec la roue des types qui en est solidaire, à sa position normale.

**Mise au repère.** — Pour mettre les appareils des deux stations d'accord ou au repère, on appuie sur la poucette *f* appartenant au système des trois bras  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  liés entre eux et pivotant en  $\omega$ . Le bras  $\gamma$  porte un crochet qui glisse sur une roue d'acier présentant une coche dans laquelle il s'enfonce, au moment où un blanc de la roue des types arrive au bas. Alors le bras  $\alpha$ , en s'abaissant, déplace un levier par lequel est soulevé le cliquet qui rend solidaire de M (fig. 1611) les roues C et *t* (fig. 1614) dont le mouvement s'arrête aussitôt. Mais dès qu'un courant est lancé de l'autre station, l'arbre des comes Oc fait rapidement un tour, et la came  $\theta$  écartant le bras  $\beta$ , le levier  $\alpha$  abandonne le cliquet, qui retombe sur la roue à rochet, et le système C, *t* obéit au mouvement de la roue M (fig. 1611).

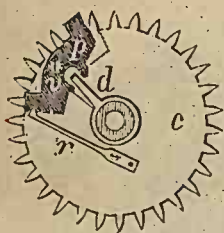


Fig. 1615.

**Roue de permutation.** — Chacune des 28 dents de la roue des types porte à côté d'une lettre un chiffre ou un autre signe qui sont également marqués sur les touches du manipulateur. Quand les lettres viennent exactement sur la verticale qui passe par le centre de la roue, ces lettres sont seules imprimées. Pour que les chiffres le soient à leur tour, il suffirait de déplacer un peu la roue des types sur l'arbre de la roue M (fig. 1611), en la tournant de l'intervalle d'un signe, c'est-à-dire de  $\frac{1}{28}$  de tour, puisqu'il y a deux signes sur chacune des 28 dents. On obtient ce résultat au moyen d'une nouvelle pièce *v* (fig. 1615) placée derrière la roue correctrice *c*, qui est fixée à un tube enveloppant à frottement sur l'arbre creux de la roue des types. Celle-ci porte un doigt, *d*, qui s'enfonce dans un cran de la pièce *p* pouvant basculer autour du pivot *v*. Quand, à la station de départ, on abaisse une touche blanche spéciale, le coup de marteau se donne sur un blanc de la roue des types, et la came correctrice *o* appuyant sur un bout de la pièce *bb'* l'incline ainsi que le doigt *d*, et par suite la roue des types est déplacée de  $\frac{1}{28}$  de tour; dès lors, ce sont les chiffres, qui sont imprimés. Si l'on abaisse une autre touche blanche, la came appuie sur l'autre extrémité de la pièce *p*, qui bascule et ramène le doigt *d* dans la première position, et la roue des types présente ses lettres au choc du rouleau imprimeur. La pièce *p* est maintenue dans la position qu'elle vient de recevoir de la came, par un ressort de retient *r* dont l'extrémité s'engage dans des crans.

**2313. Régulateur du synchronisme.** — Il nous reste à expliquer par quel moyen s'obtient le synchronisme des deux appareils. Sur le prolongement de l'arbre des comes Oc (fig. 1614) se trouve un régulateur de forme particulière, dont on voit une partie en S (fig. 1611), et qui est représenté à part (fig. 1616),

En *O* est l'arbre des cames, portant un volant qui tend à conserver la vitesse, et sur lequel on peut appuyer sur un frein, en *f*, quand on veut arrêter l'appareil. Le régulateur se compose d'une verge d'acier *v* fixée en *c*, et traversée par une boule de cuivre *B*. L'extrémité *n* est articulée par l'intermédiaire d'un levier *l*, à un bras *b* porté par l'arbre des cames, de manière que cette extrémité peut s'écarter de l'axe de rotation. C'est ce qui a lieu par l'effet de la force centrifuge sur la boule *B*, et l'angle au sommet du cône alors décrit augmente avec la vitesse, qui se trouve alors restreinte; et qu'on fait varier en éloignant plus ou moins la boule de l'extrémité *n*, au moyen d'un fil d'acier que l'on tire ou qu'on lâche au moyen d'une crémaillère et d'un pignon, *p*. En s'éloignant de l'axe, la verge déplace le point d'articulation *l* dans l'anneau tournant *a*; ce point pousse un ressort courbe de manière à faire appuyer un tampon sur le contour du cylindre, et à limiter ainsi l'ouverture du cône, qui, si elle était trop grande, pourrait amener la rupture de la verge au point d'attache *c*, où elle

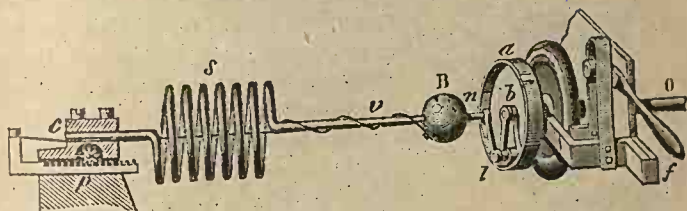


Fig. 1616.

éprouve des flexions et torsions continuelles. C'est pour empêcher cet accident qu'on lui a donné la forme d'une hélice *s*.

Pour reconnaître si les appareils sont d'accord aux deux stations, on met d'abord ces appareils au repère (2312), puis un des employés appuie sur une touche convenue, à chaque tour du chariot transmetteur, et, si les appareils sont synchrones, la lettre correspondante doit se reproduire à chaque fois à la station opposée. Si les lettres changent et se succèdent dans l'ordre A, B, C... c'est que l'appareil qui reçoit va trop vite, et l'on en ralentit le mouvement en rapprochant la boule de l'extrémité *n*.

Le télégraphe Hughes a été adopté d'abord en France, où il a reçu de nombreux perfectionnements. Il présente le grand avantage de donner la dépêche imprimée en caractères ordinaires sur un ruban de papier, qu'il n'y a qu'à couper en fragments, que l'on colle les uns au-dessus des autres pour former des lignes. Ce télégraphe, qui n'a pas besoin de relai, est un des plus expéditifs; il peut imprimer plus de 50 dépêches de 20 mots par heure. C'est plus que ne fait le télégraphe Caselli, et deux fois plus que l'appareil de Morse.

**2314. Télégraphe Meyer.** — Ce télégraphe autographique (2308) tient

à la fois des appareils écrivants et des appareils imprimants. Le transmetteur, analogue à celui de M. Caselli, se compose d'un cylindre métallique sur lequel est appliquée la dépêche tracée à l'encre sur du papier de plomb. Un chariot, que traverse une longue vis parallèle au cylindre, et tournant rapidement, transporte une pointe, d'une des extrémités de ce cylindre à l'autre; alors le cylindre tourne d'une fraction de millimètre, et la vis tournant en sens inverse, par un mécanisme spécial, la pointe revient sur ses pas, ... et ainsi de suite. Toutes les fois qu'elle rencontre un trait à l'encre, le courant est interrompu.

Le récepteur contient un électro-aimant, et les traits de la dépêche sont produits par dépôt d'encre et non par action électrochimique. L'appareil consiste en un cylindre CC, mu par un mouvement d'horlogerie, et faisant exactement un tour pendant que la pointe du transmetteur fait une de ses excursions. Ce cylindre porte une spire d'hélice saillante *mn*, garnie d'encre par le rouleau R. Une bande de papier ayant une largeur égale à la longueur du cylindre, touche l'hélice en

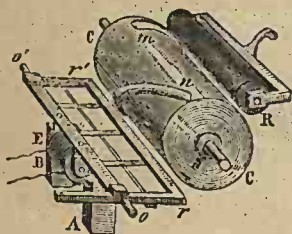


Fig. 1617.

son point le plus rapproché, quand une règle *rr'*, parallèle à l'axe du cylindre, est soulevée en pivotant autour de l'axe *oo'*. Ce mouvement est produit par l'électro-aimant E placé entre les branches de l'aimant AB, qui le soulève par répulsion quand passe un courant, et l'attire quand le courant est interrompu, et alors un point est marqué sur le papier. Si le courant était interrompu par intermittences régulières, le papier recevrait pendant un tour du cylindre une ligne de points équidistants parallèle à l'axe de ce

cylindre. Si les intermittences sont inégales, les points sont irrégulièrement espacés, et sont distribués comme ceux que rencontre sur le dessin du transmetteur, la pointe faisant une de ses excursions. De plus, ces points ont une longueur en rapport avec la largeur du trait coupé par la pointe. La spire et la règle présentent l'une à l'autre une arête vive afin que les marques soient bien nettes. Une fois un tour accompli, le papier avance d'une fraction de millimètre, et une nouvelle série de points se dessine, correspondant à la seconde excursion de la pointe du récepteur, ... et ainsi de suite, de manière que la feuille de papier se trouve bientôt couverte de points formant par leur ensemble la reproduction du dessin confié au transmetteur.

Chaque appareil est double, possédant un récepteur et un transmetteur mus par le même mouvement d'horlogerie. Les moteurs des deux stations sont amenés à marcher d'accord, au moyen d'un pendule conique muni d'une grosse boule, au-dessus de laquelle en est une plus petite qu'on peut faire glisser sur la tige, ce qui fait varier la vitesse.

Le télégraphe Meyer, simple et relativement peu coûteux, est employé sur les lignes françaises. Trois fois plus expéditif que celui de M. Caselli, il pré-



sente, en outre, cet avantage que, si l'on reçoit la dépêche sur une feuille de papier de plomb, on peut appliquer cette feuille sur un transmetteur, pour envoyer directement dans une autre ligne la dépêche reçue.

M. Meyer a appliqué son récepteur à hélice au système de *transmission multiple alternée* imaginé par M. Rouvier, dans lequel plusieurs employés envoient en même temps des dépêches différentes par le même fil, en utilisant les intervalles qui séparent les émissions faites par chacun d'eux. Un mouvement d'horlogerie met *successivement* en rapport avec la ligne, les divers appareils, qui ne doivent jamais fonctionner au même instant. Chaque émission de courant demandant, avec la clef de Morse, environ  $\frac{1}{2}$  de seconde, on peut adapter au même fil de ligne 6 appareils, et par conséquent transmettre 6 fois plus de dépêches pendant le même temps.

#### 2345. De quelques autres systèmes de télégraphes électriques. —

Nous avons vu qu'on a employé, pour faire des signaux télégraphiques, la répulsion électrique, l'étincelle, la décomposition de l'eau, l'électro-magnétisme, et enfin la décomposition de sels. Il nous reste, pour compléter cette énumération, à dire un mot de quelques autres systèmes. Nous citerons d'abord, à cause de sa singularité, celui qu'a proposé, en 1839, M. Worselman de Heer. Ayant remarqué que les actions physiologiques se manifestent à une plus grande distance que les actions physiques et chimiques, il dispose un clavier de 10 touches métalliques, sur lesquelles on appuie les 10 doigts, et une commotion excitée dans un des doigts par l'électricité partie de la station opposée, indique un signe. On est frappé d'une vive surprise en éprouvant ainsi une sensation provoquée par un correspondant placé à une immense distance; on croirait communiquer avec lui directement par le toucher.

**Télégraphes acoustiques.** — Stenheil faisait frapper les aimants de son télégraphe enregistreur (2290) sur deux timbres rendant des sons différents. On a plus tard employé les vibrations de lames, disposées comme celles de l'appareil électromusical de Froment (2131). M. Mirand a appliqué sa sonnerie (2292) au même usage; en pressant un bouton pendant un temps très-court on ferme le circuit, et l'on n'a qu'un simple coup de marteau sur le timbre; si l'on maintient la pression pendant un peu plus de temps, on obtient un roulement. En combinant des coups simples avec des roulements, on produit divers signaux, comme dans le télégraphe de Morse, en combinant des points et des traits. M. Mirand a appliqué avec succès ce système télégraphique, qui exigerait un relai pour les longs circuits, aux grands établissements, hôtels, bains publics, manufactures, etc., où il remplace avec avantage les sonnettes, et se prête à une multitude d'applications variées.

M. Cowper vient d'inventer une *plume télégraphique*, au moyen de laquelle ce que l'on écrit à la manière ordinaire, se reproduit au fur et à mesure sur une feuille de papier, à une station éloignée. Le manche isolant de la plume avec laquelle on écrit porte à sa partie supérieure deux bras légers, perpendiculaires l'un à l'autre, et communiquant chacun avec une pile. Pendant le

mouvement, chaque bras frotte perpendiculairement sur les plis d'un zigzag serré, aux angles duquel sont des bobines de résistance, et qui communique avec un fil télégraphique; de manière que la résistance du circuit varie et est d'autant plus grande que le bras touche un moins grand nombre de ces plis. On voit qu'il y a deux fils de ligne; ces deux fils s'enroulent, à l'autre station, sur deux rhéomètres à longues aiguilles perpendiculaires l'une à l'autre dans l'état de repos. Ces aiguilles se croisent sur une plume verticale très-légère et très-mobile, appuyée sur une feuille de papier. Suivant l'intensité des courants, elles sont plus ou moins déviées, et la plume reçoit un déplacement qui est l'effet résultant des déplacements que chaque aiguille lui a communiqué à elle seule, et ce déplacement est le même que celui de la plume écrivant la dépêche à transmettre. Il paraît que des expériences faites sur un circuit de 60 kilomètres ont donné des résultats très-satisfaisants.

Divers inventeurs ont cherché des moyens de communiquer au loin sans fil intermédiaire. M. Bourbouze y est parvenu dans les conditions suivantes : Les bouts du fil d'un rhéomètre sont soudés à des lames de cuivre, l'une enfoncée dans la terre, l'autre plongée dans l'eau d'un puits ou d'une rivière. Un aimant convenablement disposé maintient l'aiguille au zéro malgré le courant que donne la polarisation des plaques. Une forte pile placée au loin a ses électrodes soudées à des plaques disposées de la même manière. Quand on établit la communication des pôles de la pile avec ces deux plaques, au moyen d'un commutateur, l'aiguille du rhéomètre de l'autre station est déviée dans un sens qui dépend de la position du commutateur, et ces déviations servent à former des signes. M. Bourbouze a fait ainsi de nombreuses expériences pendant le siège de Paris, entre le sud-est de Paris et Saint-Denis, expériences qui ont donné des résultats très-nets. Il est probable que le cours de la Seine ou les tuyaux de conduite des eaux et du gaz jouaient le rôle du fil de ligne. Il serait intéressant de renouveler ces expériences en rase campagne et loin de toute espèce de cours d'eau ou de canaux.

On a imaginé un grand nombre de systèmes de télégraphes électriques, et l'on en invente chaque jour de nouveaux. Il faudrait des volumes pour en expliquer seulement le principe, et la simple énumération de ces systèmes, avec la liste des physiciens et des artistes qui les ont imaginés, occuperait plusieurs pages<sup>1</sup>. On s'applique principalement, aujourd'hui, à augmenter la rapidité des signes, la plupart des lignes télégraphiques ne pouvant fournir en temps voulu à l'expédition des dépêches qui leur sont confiées. Nous avons vu comment les résultats donnés par les télégraphes de Wheatstone, Hughes, Meyer, et par les systèmes de *transmissions multiples alternatives* ont répondu à ce desideratum, et il semble peu probable qu'on puisse les dépasser.

**2316. CIRCUITS DE TRANSMISSION.** — Le système de circuits au moyen desquels on fait communiquer les postes télégraphiques sont formés, suivant les cas, de *fils aériens*, de *fils souterrains* ou de *câbles sous-marins*.

<sup>1</sup> V. *Exposé des appl. de l'électricité*, par le comte du Moncel, 3<sup>e</sup> édition, t. III.

**Fils aériens.** — En France, on avait d'abord employé des fils de cuivre; mais le prix élevé de ce métal, son défaut d'élasticité, et sa grande dilatabilité par la chaleur, lui ont fait préférer le fer, quoiqu'il conduise environ 7 fois moins. Pour compenser, on donne aux fils une grande section, 4<sup>mm</sup> de diamètre, et environ 5<sup>mm</sup> pour les longues lignes, et ces fils sont galvanisés pour les préserver de l'oxydation (2022). Ils sont soutenus de distance en distance par des poteaux de bois de pin, injectés de sulfate de cuivre ou de pyrolignite de fer, par le procédé de M. Boucherie. Les fils sont isolés par des pièces de porcelaine, de verre ou de faïence fixées aux poteaux (*fig. 1618*). En France on se sert d'espèces de cloches en porcelaine vernie *a*, sous lesquelles est scellé au soufre, un crochet de fer dans lequel passe le fil. En Angleterre, on dispose, à travers les poteaux, des tubes de faïence dans lesquels passent les fils; d'autres fois, ces tubes sont fixés sur une planche séparée du poteau par une plaque de faïence, *b*. En Suisse et en Allemagne, le fil fait un ou deux tours sur une espèce de champignon en verre de bouteille, *c*, *c'*. Tous ces systèmes sont remplacés généralement, aujourd'hui, par une double cloche en porcelaine, dont

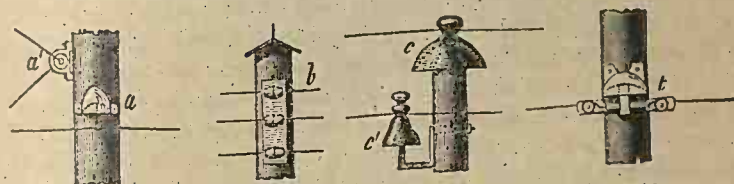


Fig. 1618.

Fig. 1619.

l'intérieure est abritée de la pluie par celle qui l'enveloppe. De distance en distance sont des *poteaux de traction* ou *tendeurs*, auxquels est adapté un système de deux petits treuils à encliquetage en fer galvanisé *t* (*fig. 1619*) soutenus par un chapeau en porcelaine, et autour desquels s'enroulent les extrémités des fils, pour les tendre plus ou moins; mais on commence à renoncer à ces tendeurs, et l'on se contente de lier le fil aux isolateurs par une ligature en fil fin. Le long des édifices, les fils sont soutenus sur des barres de bois verticales, nommées *potelets*, fixées au mur. On commence à employer des poteaux en fer creux; les isolateurs sont alors fixés à des traverses horizontales en bois, placées au haut de ces poteaux. Sous les tunnels, le fil est ordinairement recouvert de gutta-percha, à cause de l'humidité; mais on préfère le plus souvent le faire passer en dehors, par dessus la montagne.

Quand il y a plusieurs fils, on les suspend aux mêmes poteaux. Dans certains pays, on dirige ceux qui joignent deux stations principales, par des lignes de poteaux différentes, ou en polygone, ce qui présente l'avantage de desservir un plus grand nombre de stations secondaires; et, si un accident arrive à un des circuits, les communications entre les deux stations principales ne sont pas interrompues.

Par les temps de pluie ou de brouillard, une partie de l'électricité se perd dans le sol par les poteaux, ce qu'on reconnaît au moyen d'une boussole à sinus qui sert à éprouver le courant dans chaque station, et alors on ajoute quelques couples. En même temps, on détend le ressort de rappel du récepteur pour mettre sa force en rapport avec celle de l'électro-aimant. La pile est ordinairement composée de 28 couples, dont la moitié environ ne sert pas habituellement.

**2317. Introduction de la terre dans le circuit.** — Nous avons vu (2047) que Watson déchargea des bouteilles de Leyde, au moyen de longs circuits dont le sol faisait partie, et que divers physiciens purent donner la communication au moyen d'une pile isolée dont les pôles étaient réunis de la même manière. Plus tard, Feschner songea à utiliser la conductibilité du sol, dans la télégraphie électrique, dont les premiers essais venaient d'être faits, et, en 1838, Stenheil remplaça par la terre, le fil de retour de son télégraphe écrivant. Jacobi, Bain, Wheatstone et Cooke reconnurent, en outre, que la résistance du circuit total est alors considérablement diminuée. Il résulterait même d'expériences de Matteucci, en 1844, et de celles de M. Breguet sur la ligne de Paris à Rouen, que la terre n'opposerait pas de résistance sensible au courant. Mais M. du Moncel a reconnu, par de nombreuses expériences, que cette résistance existe et qu'elle est due en partie à la polarisation des lames plongées dans le sol inégalement humide près de chacune d'elles. Cette résistance est même telle qu'il n'y a pas d'avantage à employer la terre, quand la distance ne dépasse pas 4 à 5 kilomètres, la résistance étant alors plus grande que celle du fil remplacé. M. Kirchhoff et Smaasen, en 1845, dans un travail mathématique sur la propagation de l'électricité dans un solide à 3 dimensions, ont appliqué leurs formules à la terre, et ont trouvé que sa résistance est indépendante de la distance des plaques de communication avec le sol, et ne dépend que de l'étendue de leurs surfaces<sup>1</sup>.

**Du rôle de la terre dans la transmission.** — Un fait important, c'est que, si plusieurs circuits sont fermés par la terre, les appareils qu'ils contiennent fonctionnent tous régulièrement. Mais on n'est pas d'accord sur le rôle que joue la terre dans cette circonstance. Les uns admettent que le courant circule dans le sol, et que, s'il y a peu de résistance, c'est que la section est indéfinie. Cette manière de voir semble confirmée par les expériences de Matteucci<sup>2</sup> qui a vu que le courant s'affaiblit quand la distance des électrodes augmente, si elle est moindre que 50 mètres. De 60 à 100 mètres, l'intensité du courant cesse de diminuer; au-delà elle augmente, et la résistance de la terre finit par devenir nulle, l'étendue transversale dans laquelle se dissémine l'électricité devenant considérable. D'autres physiciens, parmi lesquels de La Rivé, pensent que la terre joue simplement le rôle de *réservoir commun* absorbant les électricités.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XL, p. 246.

<sup>2</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXI, p. 221.

A l'appui de cette explication, on a fait remarquer qu'un courant peut avoir lieu avec une seule électricité, quand elle est absorbée à l'extrémité d'un fil conducteur ; par exemple, quand elle est condensée dans une batterie à grande surface ; quand on fait écouler dans le sol l'électricité empruntée à l'armature extérieure d'une batterie isolée dont l'intérieur se décharge dans l'air par des pointes. Dans les expériences de Faraday et de Wheatstone sur des fils télégraphiques enveloppés de gutta-percha (2044), des courants ont aussi été obtenus au moyen d'une seule électricité. L'opinion que la terre se comporte comme un réservoir absorbant est donc très-soutenable ; et elle est confirmée par les expériences suivantes : 1<sup>o</sup> Wheatstone ayant disposé dans un circuit de 177 kilomètres formé d'un fil bien isolé, plusieurs rhéomètres, dont deux à égale distance des deux pôles de la pile, vit ces deux derniers dévier les premiers ; mais si le fil était interrompu près du pôle négatif de la pile, et la partie supprimée remplacée par la terre, les rhéomètres déviaient, sur le fil, les uns après les autres, à partir du plus rapproché du pôle positif ; la terre ne se comportait donc pas comme un simple conducteur ; 2<sup>o</sup> M. Caselli ayant réuni les deux pôles d'une pile par un long fil électrique coupé vers le milieu, vit deux galvanomètres très-sensibles placés dans le circuit près du pôle de la pile, dévier par l'effet de courants provenant des pertes par les poteaux et par l'humidité de l'air. Mais ayant remplacé par la terre, une partie du fil comprise entre la pile et l'un des rhéomètres, celui-ci ne fut plus dévié ; la terre avait donc absorbé l'électricité du pôle de la pile communiquant avec elle.

Quoi qu'il en soit, l'introduction de la terre dans le circuit a permis de réaliser une grande économie, en supprimant un des fils. La communication avec le sol s'établit au moyen de puits, dans lesquels on plonge l'extrémité du fil terminée par une large lame métallique, ou au moyen d'un vieux rail qu'on enfonce profondément dans le sol humide. Quand le sol est sec on entoure le rail de coke en fragments, sur lequel on dirige les eaux pluviales. Dans les villes, on unit le fil aux tuyaux de conduite des eaux ou du gaz.

**2318. Effets de l'électricité atmosphérique.** — Les fils aériens sont exposés de plusieurs manières aux actions de l'électricité de l'atmosphère. Par les temps sereins, et quand le vent déplace des masses d'air électrisées, il se développe dans les fils, par induction, des courants qui font jouer les appareils et viennent brouiller les signaux. Ces effets se manifestent encore sous l'influence des nuages orageux. Les *aurores boréales* surtout troublent fortement les transmissions télégraphiques. Par exemple, le 29 août 1859, pendant un de ces phénomènes, les sonneries des stations, en France et en Belgique, furent plusieurs fois et longtemps en mouvement, et les dépêches furent interrompues par des courants intermittents. Ces courants changèrent plusieurs fois de sens ; ils se manifestèrent surtout dans les lignes dirigées du nord au sud, et sur les plus longues. Des employés reçurent des commotions, et virent des étincelles s'échapper des fils. — Enfin, il peut arriver que la foudre frappe les poteaux, et les brise, ou qu'en parcourant la ligne, le fluide vienne fondre les fils des

électro-aimants et produire dans les stations, des décharges dangereuses. Dans certains pays, en Angleterre, on arme chaque poteau d'un petit paratonnerre, et quand le temps est orageux, on fait communiquer le fil de ligne avec le sol dans toutes les stations. Mais alors le télégraphe ne peut fonctionner. On évite cet inconvénient au moyen des *parafoudres*, imaginés par Stenheil.

**Parafoudres.** — Le système (fig. 1620) est une combinaison de deux autres dus à M. Walker et à Stenheil. Une table verticale de bois porte un conjoncteur *bp*, à l'axe duquel aboutit un fil de ligne *f*. Ce conjoncteur est à trois branches qui peuvent être appuyées sur des boutons de cuivre ou *gouttes de suif* *a*, *b*, *t*, *r*. Le ressort moyen communique seul par l'axe, avec le fil de ligne ; les deux autres sont séparés de l'axe par une virole d'ivoire, mais communiquent entre eux par un anneau métallique enveloppant cette virole. Deux plaques de laiton *D*, *D'*



Fig. 1620.

garnies de pointes opposées constituent le *déchargeur*. Deux boutons à vis *A* et *B* sont réunis par un fil de fer très-fin protégé par un tube ou par deux lames de verre. Les gouttes de suif *b*, *t* communiquent avec *D*, *D'* et avec les bornes *T* et *R*, par des bandes de cuivre appliquées derrière la table, et dirigées comme l'indiquent les lignes ponctuées. La borne *T* communique avec la terre ; et la borne *R* avec le récepteur de la station. Cela posé, si le conjoncteur est placé comme dans la figure, son manche au-dessus de la plaque *p* sur laquelle est écrit le mot *parafoudre*, le courant de la ligne passe en *b* par le ressort moyen, vient en *B* après avoir traversé la plaque *D*, parcourt le fil de fer *BA*, remonte en *a*, franchit l'arc *ar*, et va dans le récepteur par la borne *R*. Si la foudre frappe le fil de ligne *f*, le fil fin *AB* est brûlé, ce qui sépare le récepteur de la ligne, et l'électricité passant de *D* en *D'* par les pointes opposées, va se perdre dans le sol en passant par *D'T*. Le déchargeur *DD'* sert aussi, pendant que l'appareil fonctionne, à enlever l'excédant d'électricité que le fil de ligne peut recevoir de l'atmosphère, et à atténuer ainsi les perturbations qu'elle produit dans les signaux. — Si l'on tourne le conjoncteur de manière que le ressort du milieu vienne en *r*, la ligne communique directement avec le récepteur ; c'est ce que l'on fait quand il n'y a pas à craindre l'électricité atmosphérique, ou quand le fil *AB* a été brisé. Un anneau passé dans ce fil et attaché à la chaînette *c* permet de reconnaître si ce fil est intact. Quand l'appareil est au repos, on a toujours soin de placer le conjoncteur verticalement, le manche sur la plaque *t'* qui porte le mot *terre*, et alors le fil de ligne est en communication directe avec le sol par *tD'T*.

La figure 1621 représente un parafoudre de M. Bianchi. Le courant de la ligne *f'* traverse une boule de métal fixée au centre d'un globe de verre composé de deux parties réunies par un anneau de métal garni, en dedans, de longues pointes s'approchant très-près de la boule, et communiquant avec le sol

par la tige *t*. Un robinet *r* permet d'y faire le vide. Le courant de la pile ne se porte pas sur les pointes ; tandis que l'électricité de tension fournie par l'atmosphère se porte sur elles à travers le vide, et passe dans le sol.

Au lieu de faire le vide, Masson avait pensé à entourer les pointes, d'alcool à 40°, qui isole les courants des piles. Cette idée a été appliquée avec succès par M. Pouget-Maisonneuve.

**2319. Fils souterrains.** — Dans le principe, on avait adopté, notamment en Russie et en Prusse, des fils enveloppés d'une matière isolante, et enfouis dans la terre. Ce système a été expérimenté d'abord, à Saint-Petersbourg, par Jacobi, qui renfermait les fils dans des tubes de verre, et plus tard les isola par du caoutchouc. En Angleterre, en Amérique, on les recouvrit de coton imbibé d'un vernis isolant, et enveloppé d'un tube de plomb. Ces divers moyens étaient imparfaits et dispendieux. L'introduction en Europe de la gutta-percha en 1844 par le Dr Montgomery, à la suite de la mission envoyée en Chine par le gouvernement français, vint simplifier la question. Siemens employa alors des fils recouverts de gutta-percha. Mais à la longue, cette matière s'altère, l'humidité pénètre, oxyde le fil métallique et le rompt. Siemens, en s'appuyant sur les lois d'Ohm, a trouvé moyen de reconnaître, en faisant quelques coupures, en quel point se trouve la rupture ; des regards ménagés de distance en distance facilitent l'opération. Mais malgré ces perfectionnements, la fréquence des avaries et la difficulté d'y remédier, ont fait renoncer généralement à l'emploi des fils souterrains, dont l'établissement est, du reste, bien plus coûteux que celui des fils aériens. Cependant, les premiers sont employés dans les villes, notamment à Paris. On les a d'abord étendus dans des auges de bois, où ils étaient noyés dans du bitume, puis on les a construits comme les câbles sous-marins dont nous allons parler.



Fig. 1621.

**2320. TÉLÉGRAPHES SOUS-MARINS.** — L'idée de communiquer à travers la mer au moyen de l'électricité, a été conçue par Wheatstone, dès l'année 1840. La difficulté était d'isoler les fils dans un milieu conducteur comme l'est l'eau de mer. L'importation de la gutta-percha vint encore, ici, à point, et M. Walker, en janvier 1849, fit avec succès une première expérience entre la côte et un navire amarré dans le port de Folkstone, au moyen d'un fil de cuivre de 2 milles de long, recouvert de gutta-percha. Une Compagnie se forma aussitôt pour réunir la France à l'Angleterre, par un fil sous-marin entre Calais et Douvres. L'opération, conduite par M. de Brett, réussit parfaitement et pendant plusieurs jours on put échanger des signaux. Mais le frottement du câble sur les rochers de la côte de France, déchira l'enveloppe de plomb qui protégeait le fil, et les communications furent interrompues. Une nouvelle Compagnie se forma ; elle eut soin de faire arriver le fil près d'une côte sablonneuse, et lui donna une enveloppe très-résistante. L'entreprise fut dirigée par Wheatstone et Stephen-

son. — Le câble, enroulé sur un treuil, formait un cylindre de 10 mètres de diamètre installé sur le pont d'un navire à vapeur, le *Glazer*, qui, tout en marchant, le déroulait et le déposait au fond de la mer. Des freins puissants empêchaient le poids du câble de faire tourner trop rapidement l'immense bobine. Des appareils télégraphiques, sur la côte et à bord du navire, étaient en communication permanente avec les extrémités du câble, et servaient à vérifier à chaque moment le bon état des fils. L'inauguration de la ligne eut lieu le 13 novembre 1850, et le canon de Douvres tonna, allumé par l'électricité lancée des côtes de France. — Depuis, on a établi un grand nombre de communications sous-marines entre diverses côtes voisines, et enfin on a réussi à faire communiquer l'Europe avec l'Amérique, à travers l'Atlantique. Après de longues études et des sondages multipliés, exécutés principalement par Maury, on a choisi pour points de départ Valentia, sur la côte d'Irlande, et Saint-Jean-de-Terre-Neuve, sur la côte américaine. La distance est de 2640<sup>km</sup>, et la



Fig. 1622.  $\frac{1}{3}$

profondeur croit de 2740<sup>m</sup>, en partant de Terre-Neuve, jusqu'à 3660<sup>m</sup>, dans le voisinage de la côte d'Irlande. Le fond forme une surface assez unie, couverte de coquilles fossiles très-déli-cates et bien conservées, ce qui indique qu'il y règne le calme le plus complet. Le câble, à cause des courbures du fond, a une longueur de 4105<sup>km</sup>. L'opération difficile de la pose réussit parfaitement, et l'on put faire la conversation par-dessous les flots, d'une côte à l'autre, malgré les tempêtes et les orages, impuis-sants à empêcher les communications entre les deux continents. Malheureusement, après un aussi brillant succès, les dépêches commencèrent bientôt à présenter des irrégularités, puis cessè-  
rent complètement. On pense que le fil de cuivre intérieur s'était rompu pendant la pose, l'enveloppe extérieure ayant cédé à la tension. Pendant quelque temps la couche métallique adhérente à l'intérieur de la gutta-percha avait suffi à établir la continuité, mais elle avait été bientôt détruite par le pas-sage même du courant.

Malgré cet insuccès, 7 ans après, en 1865, on procéda, au moyen de machi-nes perfectionnées, à l'immersion d'un nouveau câble ayant 4400 kilomètres de longueur et pesant 2400 tonnes. On l'enroula dans les cales du *Great-Eastern*, colossal navire, que sa stabilité rendait spécialement propre à la délicate opéra-tion de la pose. Mais après qu'on eut franchi, au milieu de nombreuses péripéties, à peu près les deux tiers de la distance, le câble se rompit.

Ce nouveau mécompte ne découragea pas, et un nouveau câble fut immergé dès 1866, cette fois avec une complète réussite. Pendant cette grandiose opéra-tion, qui dura une quinzaine de jours, le *Great-Eastern* ne cessa d'être en communication électrique avec la terre, et reçut chaque jour des nouvelles de l'Europe, qui était alors le théâtre d'événements importants. En outre, on par-vint à relever et compléter le câble de 1865. Maintenant les deux continents sont réunis par 7 câbles, dont un aboutit au Brésil.



**2321. Structure des câbles sous-marins.** — Le figure 1622 représente un tronçon *aa'* et une coupe transversale A du premier câble jeté entre la France et l'Angleterre. Ce câble contient 4 fils de cuivre, recouverts de gutta-percha en deux couches superposées, puis d'étoupes goudronnées; le tout est préservé par une armature formée de 10 gros fils de fer galvanisés tordus ensemble, et pèse 60,000 kil. par kilomètre. Depuis, on a fait les câbles moins lourds; par exemple celui d'Irlande, B (fig. 1622), ne pèse que 610 kil. par kilomètre. De plus, on ne les préserve par une enveloppe de fils de fer, que dans le voisinage des côtes, et sur les hauts fonds rocailloux. — Le premier câble transatlantique se composait d'un faisceau de 7 fils de cuivre, recouvert de gutta-percha, puis enveloppé de fil de coton imbibé d'un mélange de poix, goudron, huile et suif. L'armature consistait en 18 faisceaux de fils de fer, chacun de 16 brins, tordus ensemble. Tous ces brins réunis bout à bout auraient donné une longueur de 496,000 kilomètres, ou environ 1 fois et  $\frac{4}{5}$  la distance de la lune à la terre.

Le câble transatlantique de 1866 se compose d'un fil de cuivre autour duquel 6 autres sont enroulés, de manière que la continuité reste maintenue en cas de rupture du fil central. Ce système est enduit de *mastic Chatterton* (gutta-percha rendue visqueuse par un mélange de goudron), puis enveloppé de quatre couches de gutta-percha alternant avec autant de couches de mastic. Garni de son armature, formée de 10 fils de fer de 2<sup>mm</sup>,5 de diamètre, ce câble peut résister à une tension de 8250 kilogrammes.

**2322. Ralentissement de la propagation dans les fils sous-marins.**

— Les fils sous-marins présentent le grave inconvénient du ralentissement de la propagation électrique, parce qu'ils forment avec le milieu ambiant un véritable condensateur, dans lequel l'électricité s'accumule en grande quantité avant de parvenir à l'extrémité opposée (2045). On est donc forcé de mettre un temps assez long entre les différents signes, pour que le fil ait le temps de revenir à l'état neutre, et que les signaux n'empiètent pas les uns sur les autres. M. Varley a reconnu qu'il faut 7 secondes pour qu'un courant acquière son maximum d'intensité à l'extrémité d'un câble de 24000 kilomètres, et autant pour décharger ce câble, et il faudrait 7 minutes en moyenne pour un mot. M. C. Varley a mis en évidence les effets de la condensation, au moyen d'un circuit formé de tubes de verre en U remplis d'eau contenant un peu de sulfate de zinc, et réunis par des arcs métalliques terminés par des lames en zinc amalgamé. Chaque arc contient un rhéomètre, et communique avec l'intérieur d'un condensateur dont l'armature extérieure est unie au sol. Ce circuit communique par un bout avec le sol et peut être mis, par l'autre, en rapport avec l'un des pôles d'une pile dont l'autre pôle est uni à la terre. Son imparfaite conductibilité et la présence des condensateurs le mettent dans les mêmes conditions qu'un long câble sous-marin; de sorte qu'on peut s'en servir pour étudier les effets de la condensation et chercher les moyens de les combattre. Quand on fait communiquer ce circuit avec la pile, on voit les rhéomètres dévier les uns après les autres, et le plus éloigné de la pile

n'indiquer l'arrivée du courant, qu'après plusieurs secondes. Ce temps n'est plus que d'une fraction de seconde quand on supprime les condensateurs.

Afin d'abrégier le temps nécessaire pour produire un signe, on a d'abord employé des récepteurs assez sensibles pour se mouvoir sous l'influence de la petite quantité d'électricité qui arrive au premier moment où le flux commence à parvenir à ce récepteur, et déchargeant aussitôt le câble. Au lieu d'effectuer la décharge en le faisant communiquer avec le sol, M. Varley, M. V. Thomson, M. Witchouse y lancent un courant contraire, fourni par une pile spéciale plus faible que celle qui sert aux signaux. Ce flux inverse détruit ce qui restait du premier, en beaucoup moins de temps qu'il n'en aurait mis à s'écouler dans le sol, et le câble est prêt à transmettre un nouveau signal. On a imaginé plusieurs transmetteurs disposés de manière à introduire ainsi un courant de décharge avant de faire une nouvelle émission.

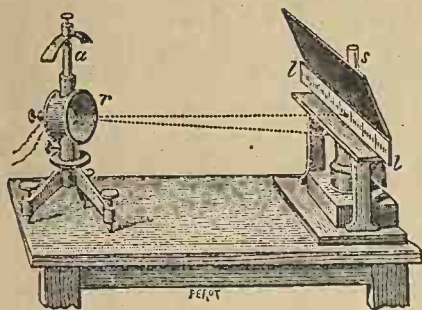


Fig. 1623.

#### Récepteur Thomson. —

Ce récepteur, très-sensible, adopté particulièrement pour les longues lignes, n'est autre chose qu'un rhéomètre extrêmement mobile. Il se compose d'un multiplicateur (fig. 1623), formé d'un fil très-long et très-fin, dans l'intérieur duquel est suspendu, par un fil de cocon, un petit miroir légèrement concave. Derrière ce miroir est collé un aimant très-léger formé d'un morceau de ressort de montre ;

le tout ne pèse pas un décigramme. Un aimant *a* peut se placer de manière à donner au système mobile une position déterminée. Une lampe *s* à flamme très-brillante placée derrière un écran, envoie par une fente, un faisceau de rayons lumineux sur le miroir, qui les réfléchit sur une échelle divisée *II* placée à 60<sup>cm</sup> du rhéomètre, et indique ainsi les plus faibles déviations. Celles qui se font à droite représentent les traits, et celles de gauche les points de l'alphabet de Morse.

Sur les navires, le système mobile du rhéomètre employé pendant la pose des câbles, est suspendu par un fil de cocon, fixé par ses deux bouts, au haut et au bas de la bobine, afin d'empêcher les déplacements par le roulis et le tangage. La bobine est placée entre les branches d'un aimant en fer à cheval, qui donne une direction d'équilibre au système mobile. L'appareil est tellement sensible, qu'il suffit de 15 couples de Daniell pour faire des signaux à travers l'Atlantique ; mais aussi il est facilement influencé par les variations des courants terrestres. M. Varley a eu, le premier, l'idée de combattre cette influence au moyen d'un immense condensateur, d'environ 5,000 mètres carrés de surface, installé à chaque station. On le place soit entre le câble et le transmetteur, soit,

le plus souvent, entre le récepteur et le câble ou la terre. Suivant la manière dont sont établies les communications, ce condensateur détruit l'effet de condensation dans le câble, et permet de diminuer la durée de l'état variable. Mais l'explication de son mode d'action dans les divers cas est encore obscure en plus d'un point.

**2323. APPLICATIONS DE LA TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.** — Le télégraphe électrique, qui rend de si nombreux services aux diverses administrations et aux relations commerciales, en rend aussi de très-grands à la science. La météorologie en a déjà tiré plus d'un parti, comme nous l'avons vu (II, 1437, 1483). On en fait usage pour transmettre dans les ports l'heure exacte du méridien principal; de manière que les capitaines de navire puissent régler leurs chronomètres sans quitter le port.

Les astronomes ont utilisé le télégraphe pour la détermination des longitudes. Cette importante application, d'abord faite en Amérique, a été répétée en Europe par MM. Airy et Quételet, pour évaluer la différence de longitude des observatoires de Greenwich et de Bruxelles. La méthode consiste à lancer de l'un des observatoires, à une heure bien déterminée, un courant vers l'observatoire opposé, où il fait dévier une aiguille aimantée, et où l'on observe, au même instant, l'heure exacte. Si l'électricité se transmettait instantanément, la différence des heures donnerait celle des longitudes; mais, comme il n'en est pas ainsi, on répète les expériences en faisant passer le courant en sens inverse. De cette manière, l'erreur disparaît quand on prend la moyenne des différences d'heures, car cette erreur porte alternativement sur la plus forte et la plus faible des heures, qui sont, l'une comme l'autre, augmentées du temps que met l'électricité à franchir la distance. Après un grand nombre d'observations, la différence de longitude entre les observatoires de Londres et de Bruxelles a été trouvée de  $17^{\circ} 28''$ , 9, valeur identique à celle que l'on a déduite des observations de l'éclipse de soleil du 15 mai 1856. Des expériences nombreuses ont été faites depuis, avec un appareil télégraphique spécial, pour déterminer la différence de longitude des observatoires de Greenwich et de Paris.

**2324. Application aux chemins de fer.** — Le télégraphe électrique rend d'immenses services dans l'exploitation des chemins de fer : par exemple, en annonçant l'arrivée des trains qui sont engagés sur la voie, particulièrement des trains spéciaux, qui circulent à des heures imprévues. Cependant, il paraît que, sur la plupart des chemins américains, on n'en use pas habituellement; mais aussi il n'est pas de pays où l'on prenne aussi peu souci de la vie des hommes. Indépendamment de cet usage journalier, les chemins de fer empruntent aux télégraphes électriques divers systèmes de signaux destinés à augmenter la sécurité; nous allons en mentionner quelques-uns.

**Télégraphes portatifs.** — Citons d'abord les télégraphes placés sur chaque train avec une pile, et au moyen desquels le conducteur peut communiquer, en cas d'accident, avec les deux stations entre lesquelles il se trouve. Pour cela, le train étant arrêté, il accroche l'un des bouts du fil de l'appareil, à un fil aérien

destiné à cet usage, et il fait communiquer l'autre extrémité avec le sol par les roues de fer du wagon. Le courant se bifurque et fait jouer les appareils des deux stations les plus rapprochées. M. Breguet a construit pour cet usage un télégraphe à cadran renfermé dans une boîte qui contient aussi 18 couples de Daniell, et n'a que 47<sup>cm</sup> de longueur, 37 de hauteur et 27 de largeur. M. Hipp, allant encore plus loin, a construit un petit appareil de Morse qui, avec sa pile, est contenu dans une boîte de 25 centimètres de longueur, sur 10 de hauteur et 15 de largeur.

**Disques à signaux.** — M. Tyer a imaginé, pour remplacer les disques qui précèdent les stations, un système de signaux électriques placés sur le train même, employé avec succès depuis 1853 sur le chemin de fer de Londres à Douvres. A une distance de 500 à 1000 mètres de la station, sont établies entre les rails, deux bandes de fer *isolées*, qui forment les extrémités d'un circuit passant par la station. Deux ressorts suspendus sous la locomotive, et réunis par le fil du récepteur qu'elle porte, viennent s'appuyer, en passant, sur ces bandes, et ferment le circuit. Alors, le récepteur de la locomotive indique si la voie est libre ou non. Ce récepteur contient un aimant, qui s'incline de manière à indiquer le signal *de marche* ou le signal *d'arrêt*, suivant le sens que l'on donne au courant, au moyen d'un commutateur placé à la station. Un cliquet à ressort fait persister le signal après que la locomotive a dépassé les bandes. En même temps, un récepteur placé à la station, fonctionne au moment de la fermeture du circuit, et indique l'arrivée du train. Ce récepteur porte aussi un encliquetage qui fait que le signal persiste quand le circuit est ouvert. Cet ingénieux système a été perfectionné par plusieurs inventeurs. — L'idée de fermer des circuits au moyen de bandes de fer placées de distance en distance, a été aussi appliquée par M. du Moncel à un système automatique de signaux, c'est-à-dire fonctionnant sans l'intervention des employés.

Marqfoy, au lieu de faire jouer les disques à signaux qui précèdent les gares, au moyen de longs fils de fer, fait usage d'un courant électrique, qui, lancé de la station, dégage, au moyen d'un électro-aimant, un mouvement d'horlogerie qui fait tourner le disque, de 180°. En même temps, un excentrique adapté à l'arbre du disque, ferme un circuit, et une aiguille placée à la station s'incline, de manière à prouver que le signal a été fait.

Sur beaucoup de lignes, on établit un fil télégraphique allant du disque à la station où il passe par un trembleur de M. Mirand (2292), qui sonne continuellement quand le disque étant tourné de manière à faire le signal d'arrêt, ferme le circuit.

**Sifflet électro-automoteur.** — Les précautions, au moyen desquelles on acquiert la certitude de la bonne disposition d'un disque seraient inutiles, si les hommes qui montent la locomotive ne pouvaient l'apercevoir, comme cela peut arriver par le brouillard, la neige, les bourrasques. C'est alors que le sifflet automoteur de MM. Lartigue, Forest et Digney frères devient précieux. Cet appareil, qui se fixe sur la locomotive, porte un sifflet à vapeur V (*fig.* 1624),

qui résonne quand la soupape *s* s'ouvre par l'abaissement du levier *en*. Ce levier est habituellement soulevé par le levier *Ot* qui est maintenu par l'attraction de l'électro-aimant Hughes EA (2311). Le fil de l'électro-aimant communique par un bout avec le sol, et par l'autre avec une brosse métallique placée sous la locomotive. Cette brosse rencontre à une certaine distance du disque, une pièce de bois de 2<sup>m</sup> de longueur, fixée longitudinalement entre les rails. Cette pièce dite crocodile, à cause de sa forme, est recouverte d'une plaque de cuivre isolée du sol, et communiquant avec le pôle positif d'une pile,

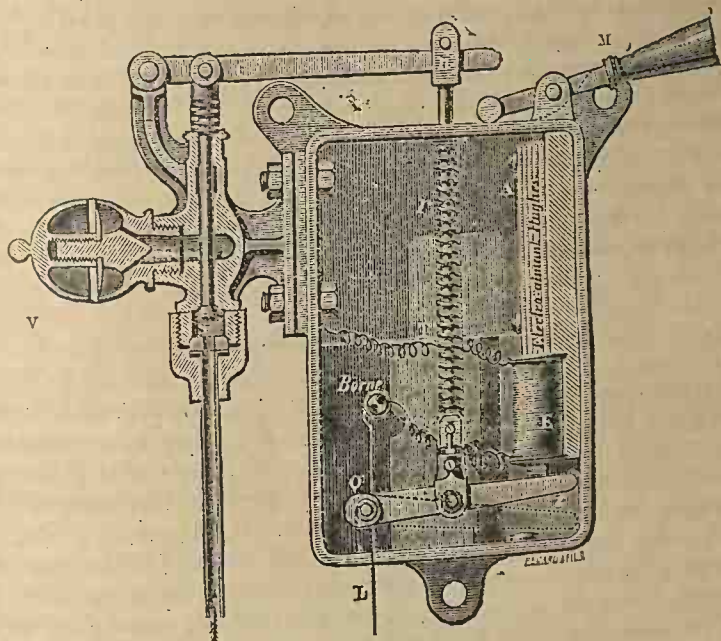


Fig. 1624. — 1/3.

quand le disque indique le signal d'arrêt. Alors le courant passe dans le fil de l'électro *E*, l'action de l'aimant *A* est neutralisée, le ressort à boudin *r* abaisse les leviers *Ot* et *en*, la soupape *s* s'ouvre et le sifflet se fait entendre, indiquant qu'il faut s'arrêter. En appuyant sur la manette *M*, on relève le levier *en*, on ferme la soupape *s* et l'on remet le contact *t* en prise avec l'électro-aimant. Ce système fonctionne avec succès sur le réseau du Nord. Quand le disque communique avec la station au moyen du fil d'un trembleur, on se sert de ce fil et de la pile de la station pour faire jouer l'appareil. Dans le cas contraire, on dispose une pile spéciale au pied du disque.

Le sifflet automoteur se prête à une foule d'autres applications. Il peut être employé toutes les fois qu'on veut produire de loin un signal au moyen de l'action de la vapeur.

**2325. Application aux opérations militaires.** — La télégraphie électrique a été appliquée pour transmettre des ordres sur le terrain, pour établir des communications entre différents corps d'armée, et les rattacher au centre du commandement. C'est à la guerre d'Italie, en 1859, que les premiers essais ont été faits. Les fils étaient installés sur des poteaux plantés à la hâte, et les appareils renfermés dans des boîtes faciles à transporter. M. Trouvé a simplifié l'installation rapide des communications, en employant un double fil enroulé sur une bobine portée à dos d'hommes avec une pile, et se déroulant à mesure que marche le porteur. Ce double fil est enveloppé de gutta-percha, et simplement étendu sur le sol, qui ne fait pas partie du circuit, à cause de la difficulté de trouver toujours un terrain assez humide pour recevoir les plaques de communication. On emploie quelquefois pour récepteur un *parleur*, système très-simple consistant en un électro renfermé dans une boîte de quelques centimètres de diamètre, sur lequel le passage du courant fait battre un contact. Des chocs simples ou doubles, combinés, représentent les signaux de Morse.

### III. Téléphone, microphone, phonographe.

**2326.** Nous avons vu comment on peut, en employant l'électricité, transmettre au loin des signaux consistant en mouvements divers ou en empreintes permanentes. Depuis, on est parvenu à transmettre la parole même par l'intermédiaire de courants. — On savait depuis longtemps se faire entendre à de grandes distances au moyen des tubes acoustiques (I, 617), de fils propageant des ondes sonores par leur élasticité (I, 567), lorsque l'établissement des lignes télégraphiques a conduit à tenter de transmettre des sons musicaux au moyen de courants. M. Ch. Bourseul, en 1854, indiquait comment, au moyen d'une plaque mince dont les vibrations fermaient et ouvraient alternativement le circuit d'une pile, on pouvait faire vibrer au loin une autre plaque qui reproduisait le son qui avait fait vibrer la première, et il annonçait qu'on pourrait, en perfectionnant ce système, arriver à transmettre la parole. Plus tard, en 1860, M. Riess fit connaître, sous le nom de *téléphone*, un appareil dans lequel un style disposé comme celui du phonographe de M. Scott (I, 629), produisait dans un courant, des intermittences qui faisaient vibrer au loin un fil de fer enveloppé d'une hélice et tendu sur une caisse renforçante (2142). Plusieurs autres inventeurs ont imaginé des systèmes analogues : MM. Varley, Pollard et Grenier faisaient intervenir un condensateur ; et M. Elisha-Gray, qui employait un diapason comme interrupteur du courant, parvint, en 1874, à transmettre les mots articulés. Jusque-là, il fallait toujours le courant d'une pile et l'on ne transmettait le plus souvent que des sons musicaux, qu'on a employés, du reste,

à former des signaux télégraphiques; mais le téléphone parlant et sans pile était encore à trouver.

M. Graham-Bell, après de longues études sur les caractères des sons vocaux, et sur le mode de transmission des courants intermittents, fut amené à distinguer ceux qu'il appelle *courants ondulatoires*, et à reconnaître la nécessité de leur emploi dans la transmission de la parole. Les courants ondulatoires sont ceux dont les intermittences sont produites, non par des suppressions et rétablissements brusques du courant, mais par des renforcements et affaiblissements passant des uns aux autres d'une manière continue. Tels sont ceux que produisent les courants induits dus aux vibrations d'une lame de fer près des pôles d'un aimant (2189). C'est au moyen de semblables courants que M. Bell, supprimant la pile, a obtenu les résultats qu'il cherchait; et il s'est arrêté à la disposition suivante.

**2327. Téléphone Bell.** — La figure 1625 représente une coupe longitudinale du téléphone, qui sert indifféremment de *transmetteur* ou de *récepteur*. On y distingue un aimant AB dont un pôle, A, est entouré d'une bobine à fil très-fin revêtu de soie, faisant un millier de tours. Les bouts sortent en C, d'un étui de bois qui enveloppe tout l'instrument. Une mince lame circulaire de fer, *mn*, est tendue comme une membrane, tout près du pôle A de l'aimant, à une très-petite distance que l'on règle au moyen de la vis *v*. La lame de fer est serrée par ses bords *mn* entre la base de l'étui et un anneau de bois *aa* évidé en forme d'entonnoir. Les deux fils *f, f* sont mis en communication avec ceux d'un appareil identique placé au loin, et dont celui qui veut entendre applique l'embouchure sur son oreille.

**De la théorie du téléphone.** — Quand on parle dans l'entonnoir, la lame de fer est mise en vibration, et change alternativement de situation par rapport au pôle A; d'où résultent des courants d'induction alternatifs, comme dans l'expérience de M. Page (2189). Les sons mélangés qui occasionnent le timbre des voyelles (I, 810) produisent des vibrations superposées dans la lame, qui se subdivise en parties vibrantes d'autant plus petites que le son auquel elles répondent est plus aigu, comme dans la résonnance multiple (I, 732), et ces vibrations superposées produisent des courants induits concomitants, qui agissent sur l'aimant du téléphone récepteur, en lui transmettant les modifications magnétiques qui les ont engendrés. Ces mouvements magnétiques agissent à leur tour sur la lame de fer et lui impriment des vibrations superposées semblables à celles que possédait la lame du récepteur.

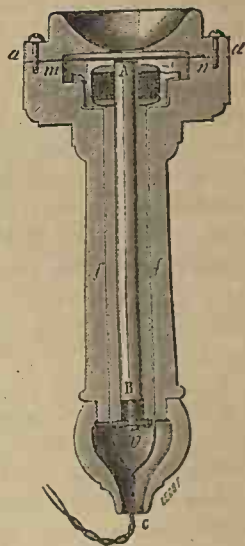


Fig. 1625. — 1/3.

Cette superposition des mouvements n'est pas facile à comprendre, surtout quand on considère la faiblesse de ces courants, et M. de Boscha a montré qu'on peut entendre avec des courants d'intensité moindre que  $\frac{1}{100000}$  de celle des courants d'un couple de Daniell. Aussi n'a-t-on pas tardé à admettre l'influence de vibrations *moléculaires* dans la lame du récepteur (2142), les vibrations de totalité étant insensibles; ce qui résulte d'expériences de M. A. Breguet, qui a obtenu des résultats avec des lames de fer épaisses, jusqu'à 15<sup>cm</sup>, et avec des lames sur lesquelles étaient appuyées des plaques de bois ou de caoutchouc.

On a prouvé aussi que des vibrations moléculaires dans l'aimant participent aux effets produits par le récepteur. En effet, M. Edison, en 1877, et MM. Blyth et Preece ont obtenu des résultats, mais très-faibles, avec des téléphones à lame de *cuivre*; ce qu'on a expliqué par des effets de *magnétisme par mouvement* (2230); et M. Spotiwood, en 1878, ayant supprimé la lame du récepteur, a pu entendre des sons, et M. Canestelli, des mots articulés.

L'hélice du récepteur participe aussi aux vibrations transmises; M. Rosetti a même vu qu'elle peut osciller le long du barreau quand elle n'est pas bien assujettie. En outre, M. Roy a entendu, quoique très-faiblement, avec l'hélice seule; et il a constaté que l'introduction dans cette hélice d'un barreau de fer, ou mieux du pôle d'un aimant, rendait les sons plus intenses. Du reste, la présence d'une lame de fer augmentait toujours l'intensité, surtout pour l'articulation des mots.

On voit, par ce qui précède, que la théorie du téléphone présente plus d'un point obscur, et qu'il faudra encore bien des expériences pour l'éclaircir complètement. Ce qui frappe surtout, c'est la sensibilité de l'appareil et la petitesse des forces qui produisent des effets aussi marqués.

**2328. Effets du téléphone.** — Pour expérimenter les effets du téléphone, il faut parler dans l'embouchure en articulant nettement. Celui qui écoute doit, pour bien entendre, appuyer l'ouverture de son instrument sur l'oreille. Les sons perçus sont moins intenses que les sons émis, et présentent un caractère particulier; ils semblent entendus à travers un mur, et ont un timbre un peu nasillard. Quand on veut échanger des phrases, il est bon que les deux interlocuteurs aient chacun deux instruments, l'un appliqué à la bouche et l'autre à l'oreille, de manière à être toujours prêts à parler et à écouter. Plusieurs récepteurs peuvent être mis en communication avec le même fil, au moyen d'embranchements. — D'après des expériences de M. A. Breguet sur deux instruments séparés par des résistances équivalent à un millier de kilomètres de fil de fer de 2<sup>mm</sup> de diamètre, on peut admettre qu'on pourrait se faire entendre à de très-grandes distances. Du reste, sur certaines lignes télégraphiques, en Amérique et en Allemagne, des téléphones sont mis à la disposition du public. Ces instruments sont tellement sensibles que les courants intermittents qui passent dans les fils télégraphiques suspendus aux mêmes poteaux sont entendus dans le téléphone par des effets d'induction. On peut même entendre, par un fil placé parallèlement à 50<sup>cm</sup> d'un autre, des paroles échangées



à travers ce dernier, même quand les deux fils ne sont rapprochés que dans un faible parcours. On évite ces effets d'induction, en employant, pour compléter le circuit, au lieu de la terre, un fil de retour voisin du premier, de manière que les inductions inverses s'entre-détruisent.

Généralement on ne peut entendre les sons transmis qu'en appliquant le téléphone récepteur sur l'oreille. De là la nécessité, pour celui qui doit écouter, d'un avertisseur (2292), et l'on en a construit de plusieurs sortes pour cet usage spécial. — Cependant, on a pu entendre à distance, surtout le chant et les sons des instruments. Plusieurs inventeurs ont aussi construit des téléphones à plusieurs lames vibrantes ayant chacune son aimant avec sa bobine, et sur lesquelles les ondes sonores arrivent perpendiculairement de l'entonnoir, dont le col se divise en plusieurs branches. Le effets sont alors plus intenses.

La grande sensibilité du téléphone a été appliquée par M. Wurtzbourg aux recherches physiologiques. Il a produit des convulsions dans une grenouille rhéoscopique (1905) quand il parlait dans un téléphone mis en rapport avec le nerf dénudé. M. d'Arsonval a reconnu que cet instrument est plus sensible que les membres de grenouille, et l'a employé à constater les courants musculaires, si difficiles à observer avec les rhéomètres les plus sensibles (1909). Il mettait un diapason interrupteur dans le circuit, et s'il passait un courant, le téléphone donnait immédiatement le son du diapason.

**2329. Téléphones avec pile.** — On a beaucoup varié la forme des téléphones, et plus tard on est revenu à l'emploi de piles, dont on est parvenu à rendre les courants intermittents ondulatoires, en les faisant passer à travers des conducteurs imparfaits, ordinairement du charbon résultant de noir de fumée comprimé. Dans le téléphone de M. Edison un disque de charbon est comprimé entre deux feuilles de platine, par lesquelles passe le courant qui traverse ce disque. La lame métallique vibrante, qui n'a plus besoin d'être en fer puisqu'il n'y a plus d'aimant, est mise en communication avec le disque par une rondelle de liège, de caoutchouc ou un anneau de fer. Les vibrations qu'elle reçoit déterminent dans le charbon, des compressions intermittentes qui font varier sa conductibilité, et par suite l'intensité des courants intermittents, qui prennent alors l'état ondulatoire. — Plusieurs physiciens, M. E. Gray le premier, amplifient les résultats en faisant passer les courants intermittents dans le fil inducteur d'une petite bobine de Ruhmkorff sans interrupteur, et envoyant les courants induits au récepteur. M. Navez ayant remarqué que les variations de pression sont surtout sensibles aux surfaces, augmente aussi les effets, en empilant plusieurs disques de charbon entre les deux lames de platine. MM. Pollard et Garnier ont mis simplement des pointes de plombagine en contact avec la lame vibrante, le courant passant d'une pointe à l'autre, ou d'une pointe à la lame, et ont obtenu ainsi de bons résultats.

**2331. MICROPHONE.** — Cet instrument, inventé par M. Hughes, et dont l'apparition a produit une sensation aussi vive que celle du téléphone, est d'une simplicité rustique. On peut le regarder comme un transmetteur spécial pour le

téléphone, et on lui a déjà donné bien des formes différentes; la figure 1626 représente le modèle combiné par M. Ducretet.

Le microphone consiste essentiellement en un crayon de charbon C (fig. 1626) placé à peu près verticalement, et terminé par des pointes émoussées qui s'enfoncent dans des cavités de petits dés en charbon D, D', où elles peuvent balloter librement, comme on le voit à part en DCD', à gauche de la figure. Le dé D est mobile, de manière qu'on peut en régler facilement la position. Ce système est introduit, au moyen des bornes d'attache B, B', dans le circuit d'une pile, où se trouve également un téléphone T, plus ou moins éloigné.

Quand, après avoir posé l'instrument sur des corps mous, pour étouffer les sons accidentels, on parle à une distance de quelques mètres, les paroles prononcées sont entendues dans le téléphone récepteur avec un léger accroisse-

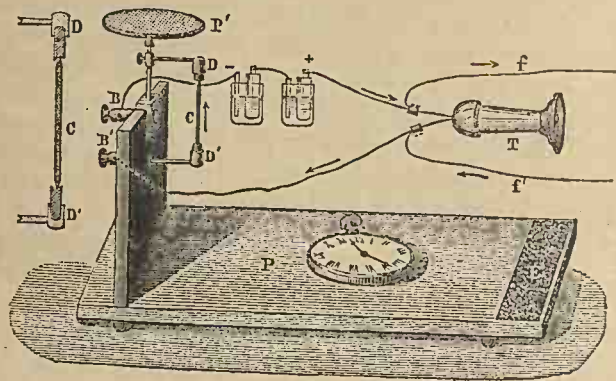


Fig. 1626. — 1/5.

ment d'intensité. Mais ce sont surtout les ébranlements, même les plus faibles, communiqués aux parties solides de l'appareil qui sont étonnamment amplifiés; ainsi, le bruit d'une montre posée sur la tablette P, et même les frottements des engrenages, le frôlement d'une barbe de plume sur une surface rugueuse E, P', les mouvements d'un insecte dans une petite cage posée sur P', sont entendus fortement. La marche d'une mouche en P produit l'effet des pas d'un cheval. De là le nom de *microphone*, les plus faibles bruits étant entendus très-amplifiés.

Quant à l'explication de ces effets, elle laisse encore beaucoup à désirer. Cependant, elle paraît se rattacher à ce fait établi par M. du Moncel, que la résistance au passage entre les surfaces de contact de deux corps peu conducteurs varie avec la pression. Or, les vibrations, même très-faibles, en faisant osciller le crayon de charbon, modifient sa pression sur les dés qui le soutiennent, surtout à la pointe supérieure où cette pression est excessivement

faible; d'où résultent des intermittences ondulatoires dans le courant de la pile, qui agissent sur le téléphone récepteur. — Cette explication peut être assez facilement acceptée; mais là où tout devient obscur, c'est quand le microphone est employé comme récepteur reproduisant la parole, ainsi que M. Hughes et plusieurs autres physiiciens l'ont constaté.

On a beaucoup varié la disposition du microphone; on a aussi remplacé le charbon par des métaux, et beaucoup d'expériences curieuses ont été faites pour en élucider la théorie et pour en constater l'extrême sensibilité. On a pu, au moyen de cet instrument associé au téléphone, faire entendre des discours prononcés à des distances de plusieurs kilomètres, non-seulement par quelques personnes, mais encore par toute une assemblée. On a pu, en Suisse, suivre tous les détails de l'exécution d'un opéra, d'un endroit où les sons ne pouvaient parvenir directement, et même après avoir introduit dans le circuit une résistance équivalent à 10 kilomètres de fil télégraphique. On a songé à appliquer le microphone à la médecine et à la chirurgie, pour les oscultations des poumons et du cœur, pour reconnaître, dans les sondages des plaies, la présence de la plus petite parcelle solide, dont le choc sur la sonde est rendu perceptible. La trépidation du sol précédant les tremblements de terre, la marche des troupes, de la cavalerie, sont entendues de plusieurs kilomètres au moyen du microphone, et M. Chandler-Roberts s'en est servi pour entendre le passage d'un gaz par diffusion à travers une lame poreuse (I, 448)<sup>1</sup>.

**2332. PHONOGRAPHE.** — Nous venons de voir la parole transmise au loin à travers un fil télégraphique. Ce résultat merveilleux est encore dépassé par le phonographe de M. Edison, instrument très-simple, qui, non-seulement enregistre la parole et en conserve le signe écrit, mais encore la reproduit à la volonté de l'opérateur, au bout d'un temps quelconque, après l'avoir fidèlement conservée. Nous avons vu comment M. E. Scott est parvenu à enregistrer les vibrations de l'air, même quand il y a plusieurs sons simultanés, au moyen d'un appareil admirablement combiné qu'il a nommé *phonautographe* (I, 629). Ce résultat constitue la première partie des effets que produit le phonographe de M. Edison. C'est le 11 mai 1878 que ce nouvel appareil a été présenté à l'Académie des sciences de Paris, où il excita un grand enthousiasme, et où il fut soumis à de nombreuses épreuves.

Le phonographe consiste en un cylindre enregistreur *c'* (fig. 1627), que l'on fait tourner au moyen d'une manivelle *m*, et dont l'arbre, fileté en *v*, porte un volant *V* destiné à régulariser le mouvement. La surface du cylindre est sillonnée d'un pas de vis sur les filets serrés de laquelle est appliquée une feuille mince d'étain ou de cuivre. Une embouchure *e*, disposée comme celle du téléphone Bell, est soutenue à côté de ce cylindre, dont elle peut être plus ou moins rapprochée au moyen de la manette *r*. On voit (fig. 1628) une coupe de cette embouchure : derrière la lame métallique vibrante est un ressort fixé au bras *r*,

<sup>1</sup> V. le Téléphone, le microphone et le phonographe, par le comte du Moncel, 1878.

et muni d'une pointe courte et dure, *p*, mise en relation avec la lame métallique, par un bout de tube de caoutchouc collé à cette lame et au ressort.

Quand on parle dans l'embouchure, en ayant soin d'y bien enfoncer les lèvres, les vibrations communiquées à la lame font agir la pointe, qui produit sur la feuille d'étain recouvrant le cylindre tournant, des dépressions accidentées, en rapport avec les mouvements et les inflexions que reçoit la lame, par suite de vibrations superposées. Les paroles sont ainsi enregistrées, d'autant plus facilement que la pointe correspond au creux du pas de vis.

Pour faire répéter à l'appareil les mots ainsi enregistrés, on le ramène d'abord à sa situation première, en écartant la pointe et faisant tourner le cylindre en sens contraire, puis remettant la pointe en place, on met le cylindre en marche. Le gaufrage produit dans la première opération, déplace la lame, la soulève, et lui imprime les vibrations complexes qu'elle possédait en produisant les empreintes. Ces mouvements sont transmis à la lame, qui vibre et reproduit dans l'air les combinaisons de son primitives, et par suite les mêmes paroles

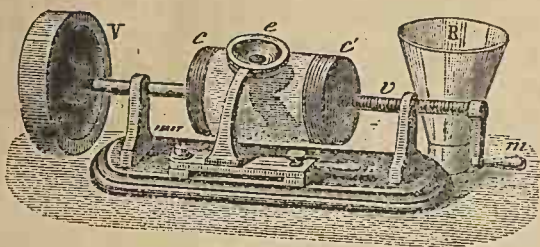


Fig. 1627.

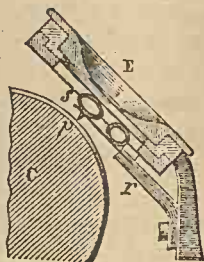


Fig. 1628.

articulées. Comme l'intensité est beaucoup plus faible, ce qui se conçoit facilement, on adapte à l'embouchure *e* un cornet renforçant *R* (fig. 1627).

Si l'on tourne plus vite que lors de l'inscription des sons, la parole est répétée sur un ton plus aigu, et si l'on va plus lentement, sur un ton plus grave. S'il s'agit d'un air de musique, il faut évidemment que le mouvement soit très-régulier; autrement, certaines notes seraient trop hautes et d'autres trop basses, et l'appareil chanterait faux. Dans ce cas le cylindre doit être mis en mouvement par un système d'horlogerie. — On peut, du reste, détacher la feuille, du cylindre, pour lui faire répéter plus tard les sons inscrits, en la remettant en place. On peut aussi obtenir 5 ou 6 répétitions, mais elles sont de moins en moins nettes, le gaufrage s'effaçant peu à peu en passant sous la pointe. M. Edison a obtenu le gaufrage sur une surface plane tournant sur elle-même et sillonnée d'une spirale, sur laquelle on applique la feuille d'étain. On peut alors reproduire cette feuille par la galvanoplastie et la faire parler aussi souvent qu'on le veut. On peut enfin faire agir les vibrations sur un téléphone transmetteur, et les faire répéter au loin sur un autre téléphone.

Quant aux applications du phonographe, elles se présentent en foule à l'imagination. On pourra lui faire enregistrer et répéter une conversation, un discours, un air de musique. On pourra aussi conserver en portefeuille, ou expédier au loin les feuilles d'étain ayant reçu les empreintes des mots et les faire répéter par l'instrument, de manière à faire jouir ainsi la postérité ou des personnes éloignées, de l'audition de discours prononcés hors de leur portée.

#### IV. Horloges électriques et chronoscopes.

**2333.** Dans l'horlogerie électrique, on peut se proposer trois choses : 1<sup>o</sup> construire une horloge à pendule dont le mouvement soit entretenu par l'électricité ; 2<sup>o</sup> communiquer le mouvement d'une horloge-régulateur aux aiguilles de divers cadrans éloignés ; 3<sup>o</sup> rendre solidaires plusieurs horloges ayant chacune leur moteur, de manière qu'elles restent toujours d'accord. On a donné un grand nombre de solutions de ces trois questions. Nous indiquerons quelques-unes de celles qui se recommandent par leur simplicité, ou qui ont reçu la sanction de la pratique.

**2334. I. Horloges électriques.** — La vitesse d'une horloge à pendule dépend de l'amplitude des oscillations de ce dernier, amplitude qui varie avec l'état des rouages. On a donc cherché à supprimer les rouages en donnant les impulsions au pendule au moyen de l'électricité. C'est M. Bain qui a construit la première horloge électrique ; l'impulsion était donnée directement par un électro-aimant, dont la force dépend de l'intensité, toujours variable, du courant. Aujourd'hui, on entretient le mouvement du pendule au moyen d'une petite masse ou d'un ressort, soulevés d'une quantité constante par l'action d'un électro-aimant.

**Horloge de Froment.** — Le pendule P (fig. 1629) est suspendu par une lame d'acier communiquant en *p* avec le fil d'un électro *e*. Une vis *v* placée latéralement vient toucher, à la fin de chaque excursion vers la droite, un léger ressort *r*, dont l'extrémité libre est soutenue par un petit disque *d* fixé à une tige verticale *da* guidée dans l'anneau *a*. Cette tige est articulée avec le prolongement *ca* du contact *e*, dont le point d'appui *s* est sur le bord de l'électro. Le fil de ce dernier communique avec un des pôles d'une pile, dont l'autre pôle communique avec le ressort *r*. Le circuit est fermé par *prr* toutes les fois que, le pendule se portant vers la droite, la vis *v* touche le ressort *r*. Alors le contact *e* est attiré, la tige *ad* s'abaisse, ainsi que le disque *d* ; et le ressort *r*, devenu libre, presse la vis *v* et donne une petite impulsion au pendule arrivé à sa limite d'amplitude. Dès que la vis *v* se sépare du ressort *r*, le courant est interrompu, et, le contact *e* étant relevé par le ressort de rappel *s*, le disque *d* soulève le

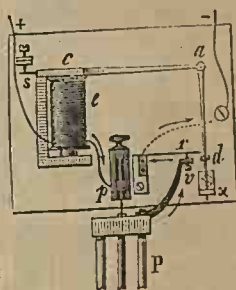


Fig. 1629.

ressort  $r$ , qui, par son élasticité de flexion, donnera une nouvelle impulsion à la vis  $v$  quand elle viendra de nouveau toucher le ressort. L'appareil est représenté tel que l'a modifié M. Hardy.

**Compteur.** — Pour transmettre le mouvement du pendule aux aiguilles d'un compteur ou *minuterie* indiquant sur un cadran les heures et les minutes, Froment a imaginé le système suivant : Le courant, interrompu et rétabli alternativement par le pendule, passe par un électro  $EE$  (fig. 1630) qui attire le contact  $db$ . Ce contact redresse alors le système des tringles articulées  $bca$ , et tire vers la droite la tige  $cl$  articulée au levier coudé  $lon$ . Un cliquet  $n$  s'enfonce alors entre les dents obliques de la roue  $R$ , et la fait avancer d'une dent à chaque mouvement, et, par conséquent, à chaque oscillation du pendule. Si ce dernier bat la seconde, et si la roue  $R$  porte 60 dents, une aiguille fixée à son

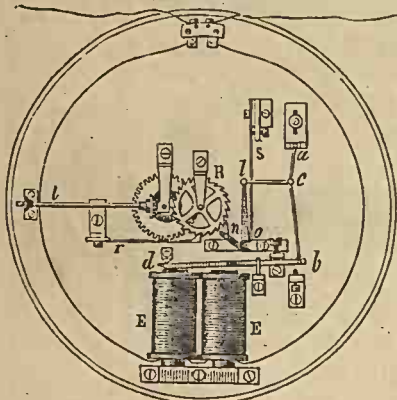


Fig. 1630.

pendule, suspendu par la lame d'acier  $\beta x$ , qui communique d'une part, en  $o'$ , avec le pôle positif de la pile, et d'autre part avec les deux cornes métalliques  $B, B'$ , qui viennent toucher alternativement les ressorts  $R, R'$  fixés en  $e, e'$ . Ces ressorts communiquent, l'un,  $R$ , par le fil  $n'$ , avec l'électro  $E'$  placé du côté opposé ; l'autre,  $R'$ , par le fil  $n$ , avec l'électro  $E$ . Ces fils, après avoir enveloppé les électros, se réunissent au bouton  $o$ , uni au pôle négatif de la pile. Les armatures  $AA'$  des électros relèvent, quand elles sont attirées, les ressorts  $R, R'$ , et en même temps de petites masses  $m, m'$  fixées aux extrémités des leviers coudés  $mc, m'e'$ , portant des pieds de biche  $c, c'$ , qui peuvent encliqueter et tenir soulevés les ressorts  $R, R'$ .

Supposons que, le pendule s'inclinant vers la droite, la branche  $B'$  vienne soulever un peu le ressort  $R'$ , le courant passera par  $\alpha PB'e'n$  dans l'électro  $E$ , et l'armature  $A$  sera soulevée, tandis que l'armature  $A'$  restera abaissée. Le crochet  $c'$  s'écartera par l'effet du poids  $m'$ , et le ressort  $R'$ , rendu libre, impri-

axe marquera les secondes; et, par un système de roues dentées, il sera facile de faire mouvoir deux autres aiguilles marquant les minutes et les heures. Les tringles articulées  $bca$  transmettent graduellement et sans choc le mouvement du contact  $bd$  à la roue  $R$ . Le ressort d'arrêt  $r$  empêche le recul de cette roue quand le cliquet revient sur ses pas, sous l'action du ressort de rappel  $s$ . La tige  $t$  sert à mettre les aiguilles sur l'heure pour régler l'appareil.

### 2335. Horloge de R. Houdin.

— Dans ce système, le pendule reçoit l'impulsion aux deux limites de ses excursions.  $PP$  (fig. 1631) est le

mera, par son élasticité, une impulsion à la branche B' du pendule. En outre, ce ressort tirera, par l'intermédiaire de la tige *l'* et du levier coudé *l'r'*, le cliquet *r'* qui agit sur la roue des secondes. Pendant ce temps, l'électro E étant aimanté, son armature relève le ressort R par l'intermédiaire de la tige *t*, qui porte une clavette au-dessous de l'armature, soulève la masse *m*, et engage le pied de biche *c* au-dessous de ce ressort, qu'il soutient. Quand ensuite le pendule, revenant vers la gauche, quitte le ressort R', le courant cesse de passer en E, et l'armature A retombe en abandonnant la masse *m*, et en glissant le long de la tige *t* qui la traverse sans frottement. Mais, dès que la branche B vient soulever un peu le ressort R, le crochet *c* se dégage, entraîné par le poids *m*, et le ressort R, rendu libre, donne l'impulsion à la branche B du pendule. En même temps, ce ressort agit, par l'intermédiaire de la tige *t* et du levier *l*, sur le cliquet *r*, qui pousse la roue des secondes. Pendant ce temps-là, l'électro E' est aimanté, le contact A' est attiré et soulève le ressort R' et la masse *m'*, de manière que le pied de biche *c'* s'engage sous le ressort R'. En *s* est un ressort de retient.

**2336. II. Compteurs électro-chronométriques.** — On nomme ainsi des minuterics ou compteurs mis en mouvement par l'électricité, et indiquant les mêmes heures sur différents cadrans éloignés les uns des autres. Dès l'année 1840, Wheatstone employait son télégraphe à cadran à indiquer l'heure, la roue d'interruption du manipulateur étant mue par une horloge proprement dite. D'autres inventeurs, entre autres MM. Bain,

Froment, et surtout P. Garnier, rendirent cette application pratique. Ce dernier établit, dans la gare du chemin de fer, à Lille, puis sur les lignes de Lyon et de l'Ouest, des cadrans à aiguilles marchant d'accord avec celles d'un régulateur, ou horloge-type, réglant les intermittences des courants. Plus tard, on a disposé, dans certaines villes, des lanternes-horloges donnant, par l'intermédiaire d'un courant, l'heure du régulateur qui les commande. Nollet a établi les premières à Gand, et l'on en a installé depuis à Paris, Lyon, Marseille... La figure 1632 représente une de ces lanternes, avec une des dispositions imaginées par M. Detouche pour faire fonctionner la minuterie. A est l'électro-aimant; toutes les fois que le circuit est fermé par l'horloge-type, l'extrémité *c* du levier coudé *cor* est attirée, et l'extrémité *r*, s'abaissant, pousse un cliquet,

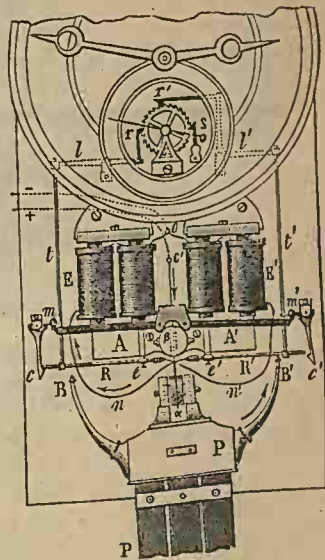


Fig. 1631.

représenté à part en K, qui fait marcher la roue R liée à la minuterie. Le cliquet K est articulé à l'extrémité du levier Oa, et poussé par le ressort s; n est un talon de retient qui arrête la roue quand le cliquet est abaissé. Dans ce système, l'impulsion donnée par l'électro va en croissant, et l'aiguille du cadran

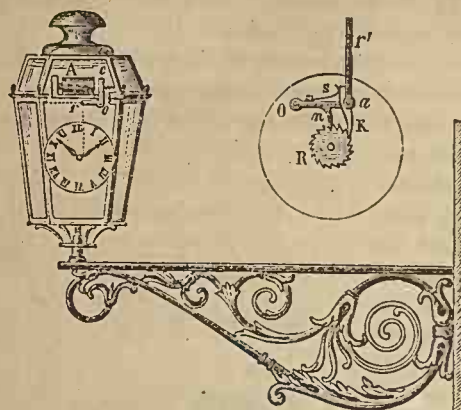


Fig. 1632.

de la pile et de l'état de l'atmosphère. On ne peut ici régler chaque jour la tension du ressort, comme dans les télégraphes, et les appareils se dérangent assez souvent. M. Breguet a évité cet inconvénient, dans ses compteurs de Lyon et Marseille, en produisant les deux mouvements du contact au moyen de

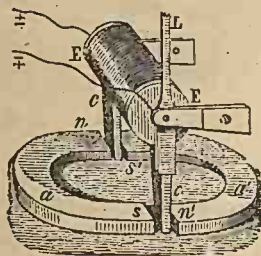


Fig. 1633.

l'électro-aimant, sans employer de ressort. La figure 1633 représente la disposition employée, dont le principe est dû à M. Cecchi, de Florence. Le levier L, qui doit osciller pour faire marcher la minuterie, est fixé à un électro EE mobile autour de son axe, et portant des pièces polaires c, c' qui peuvent osciller entre les pôles opposés de deux aimants en fer à cheval nas, n'a's'. Le régulateur lance le courant dans l'électro, alternativement dans les sens opposés, de manière que les pièces c, c' soient attirées tantôt à droite, tantôt à gauche.

**Distribution.** — On a employé une foule de dispositions différentes pour supprimer et rendre le courant au moyen du pendule de l'horloge-type. Quand on emploie une horloge électrique, il n'y a rien à ajouter à ce que nous avons dit plus haut, et le compteur (fig. 1630), plus ou moins éloigné du pendule régulateur, communique avec lui par de longs fils isolés. Mais, quand il s'agit d'une horloge ordinaire, la moindre résistance peut modifier son mouvement. L. Foucault a eu l'heureuse idée de faire fermer le

éprouve une secousse au moment où elle s'arrête. M. Bain a évité cet inconvénient en faisant marcher le cliquet par le ressort de rappel, au moment où le courant cesse dans l'électro, comme dans la minuterie de l'horloge de R. Houdin (fig. 1631).

#### Compteur de M. Breguet.

— Dans le compteur précédent, l'électro doit vaincre, pour attirer le contact, la résistance du ressort de rappel. Or, la force de l'électro change avec celle du courant, qui dépend elle-même des variations



circuit par le pendule au moment où il passe par la verticale, c'est-à-dire quand, ayant sa plus grande vitesse, il est le moins sensible aux causes de perturbation. P (fig. 1634) est la tige du pendule, et  $r$ ,  $r'$  sont deux ressorts qui ferment le circuit quand ils se touchent en  $a$ . La jonction est établie par le pendule, au moyen d'une tige  $b$  et du levier  $t$  articulé en  $o$  avec une pointe qui s'enfonce dans une coupe en agate placée sur le ressort  $r$ .

**Communications.** — Pour faire communiquer l'horloge-type avec les divers compteurs, on se sert ordinairement de fils aériens passant par les différents électros, qui fonctionnent ainsi tous en même temps. M. P. Garnier a pu, au moyen de courants dérivés, augmenter le nombre des compteurs sans déranger ceux qui existent déjà. Il établit d'abord un fil principal, sur lequel il soude les extrémités du fil de chaque électro, qui reçoit ainsi un courant dérivé. On fait ainsi des *prises d'électricité*, comme on fait des prises d'eau sur une conduite principale. L'électricité se partage entre les différents circuits dérivés, inversement à leur résistance.

**Sources des courants.** — Ordinairement on se sert d'une pile. M. Bain avait essayé de produire le courant en enfonçant simplement dans le sol humide une lame de cuivre et une lame de zinc, ce qui formait une espèce de pile de Bagnation. M. Glæsner a employé des courants d'induction magnéto-électriques : un aimant vertical en fer à cheval entouré d'une hélice faisant partie du circuit, porte un contact mobile et muni d'un prolongement sur lequel frappe un marteau soulevé à intervalles égaux par les chevilles d'une des roues d'une forte horloge. Le coup de marteau écarte le contact, et il se produit dans l'hélice un courant induit, qui est suivi d'un autre, au moment où le marteau se relève et permet au contact de se précipiter sur l'aimant.

**2337. III. Régulateurs des horloges.** — Au lieu de faire marcher des compteurs au moyen d'une horloge-type, M. Breguet s'est proposé de maintenir d'accord plusieurs horloges ordinaires. Pour cela, il supprime le pendule de ces horloges, et fait marcher l'échappement au moyen des oscillations du contact d'un électro, dans lequel un régulateur lance un courant et l'intercepte à chaque oscillation de son pendule. L'électro-aimant n'agissant plus comme moteur, il suffit d'un très-faible courant.

M. Bain a imaginé de régler seulement toutes les 12 heures, des horloges indépendantes les unes des autres. A la fin de la période, quand l'aiguille des minutes du régulateur est verticale, ce dernier ferme un circuit passant par un électro placé derrière chaque cadran, dont le contact est alors soulevé et fait monter une fourchette en forme de V. Celle-ci attaque une cheville fixée

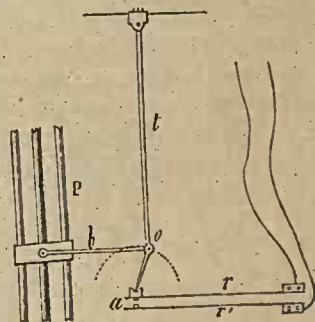


Fig. 1634.

derrière l'aiguille des minutes, de manière que cette cheville l'amène dans son angle, et l'aiguille est ainsi ramenée sur la verticale au même moment que celle du régulateur.

M. Faye a proposé de soustraire les horloges astronomiques à l'influence de la chaleur, en les plaçant dans des caves à température invariable, et les faisant communiquer par des fils électriques, avec le compteur à secondes placé dans la salle d'observation. Les pendules électriques sont ici préférables, à cause de l'humidité des caves, qui ne leur est pas aussi nuisible qu'aux horloges à rouages.

**2338. I. CHRONOGRAPHES ET CHRONOSCOPES.** — Nous avons vu (I, 594) comment l'électricité peut servir à entretenir les vibrations d'un diapason chronométrique, et venir en aide à la méthode graphique pour enregistrer la durée de certains phénomènes. Dès l'année 1840, l'électricité avait été appliquée par Wheatstone à la mesure d'intervalles de temps extrêmement courts. Les appareils destinés à cet usage, nommés *chronoscopes*, ont été principalement employés à l'évaluation de la vitesse des projectiles. La figure 1633 représente la disposition imaginée par Wheatstone. Une horloge *h*, dont le mouvement est arrêté par un cliquet retenu par le fer doux attiré d'un électro-aimant, marque les fractions de secondes. Les fils de l'électro animé par la pile *P*, aboutissent à une cible composée de deux parties *a* et *b* qui ferment le circuit quand elles se touchent. Ce circuit est d'abord fermé par un fil de dérivation *f* qui passe devant la bouche du canon qui doit lancer le projectile. Dès que ce dernier sort de la pièce, il brise le fil *c*, le circuit est interrompu, et l'horloge se met en marche. Mais quand le boulet frappe la cible, il ferme le circuit en *ab*, et le mouvement de l'horloge est arrêté. Le déplacement des aiguilles donne, en millièmes de seconde, le temps employé par le boulet à parcourir l'espace *co*. Ce système comporte quelques incertitudes : par exemple, l'électro-aimant, n'abandonne pas son contact instantanément, et il faut un certain temps à l'arrêt, pour arrêter le mouvement ou le laisser partir. Wheatstone est parvenu à annuler à peu près ces causes d'erreur. — M. Hipp a apporté à l'appareil un perfectionnement important : l'horloge marche continuellement, mais les aiguilles n'en reçoivent leur mouvement qu'à l'instant où les dents d'une roue dont elles dépendent s'engagent dans les dents d'une certaine roue de l'horloge ; à peu près comme dans le compteur de la sirène acoustique, et c'est l'électro-aimant qui produit le mouvement nécessaire.

**Chronographes.** — En 1843, M. Constantinoff a mesuré la vitesse des projectiles au moyen d'un appareil enregistreur très-ingénieux, qui a été exécuté avec une grande perfection par M. Breguét. Voici quel en est le principe : une horloge fait tourner un cylindre avec une vitesse de 2 tours par seconde. Deux crayons, retenus chacun par l'armature d'un électro, ont leur pointe très-près d'une même arête du cylindre. L'un des électros fait partie d'un circuit dont le fil, replié un grand nombre de fois dans l'intérieur d'un cadre ou cible, doit être brisé par le projectile. Le fil de l'autre électro passe par une seconde cible

disposée comme la première. Quand le boulet traverse la première cible, il rompt le circuit du premier électro-aimant; le crayon qu'il retenait vient s'appuyer sur le cylindre, et trace une ligne perpendiculaire aux arêtes. Quand le projectile rompt le fil de la seconde cible, le second électro-aimant laisse de même son crayon tracer sa ligne. La distance entre les points de départ de ces lignes, donne le temps employé par le boulet pour aller d'une cible à l'autre. Par exemple, si cette distance est de 5 millièmes de la circonférence du cylindre faisant 2 tours par seconde, le temps cherché sera  $\frac{5}{2000}$  de seconde. Le temps que mettent les deux crayons à tomber sur le cylindres, étant sensiblement le même, il n'en résultera pas d'erreur, si les deux électro-aimants sont identiques.

M. Siemens a évité la difficulté de remplir cette dernière condition, en employant, au lieu de crayons, les étincelles de deux bouteilles de Leyde, qui font une petite tache sur le cylindre d'acier, et dont la décharge est déterminée par le passage du boulet à travers la cible.

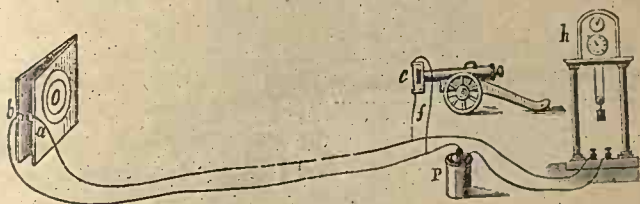


Fig. 1635.

Les chronographes ont reçu beaucoup de perfectionnements de divers inventeurs, entre autres de MM. Martin de Brettes, Beetz, Parisot. Nous allons encore citer le chronoscope de Pouillet, dans lequel il est fait usage d'une principe nouveau, et l'appareil de M. le capitaine Navez, comme un des plus précis et celui avec lequel on a fait le plus d'expériences pour se procurer les données nécessaires au calcul des tables de tir.

**2339. Chronoscope de Pouillet.** — Dans la méthode de Pouillet, le temps très-court pendant lequel passe un courant, est déduit de la déviation impulsive de l'aiguille d'un rhéomètre. On construit d'abord une table des déviations correspondantes à des durées connues du passage du courant : on colle sur un disque de verre une bande d'étain allant du contour au centre, communiqué avec l'un des pôles d'une pile. Un ressort joint à l'autre pôle, s'appuie sur le contour, de manière que le circuit soit fermé quand la bande d'étain passe sous le ressort. On fait tourner le disque avec une vitesse uniforme, et l'on observe la déviation impulsive que reçoit pendant un passage de la bande d'étain, l'aiguille d'un rhéomètre introduit dans le circuit. On compare ensuite cette déviation à la durée du passage du courant, déduite de la vitesse du disque et du nombre de degrés qu'occupe la bande d'étain sur son contour.

En répétant l'expérience sous différentes vitesses, on construit une table, qui ne convient qu'au courant et au rhéomètre employés. Pouillet a trouvé ainsi une déviation de  $15^\circ$ , avec un rhéomètre de Melloni et un couple de Daniell, quand le courant passait pendant  $\frac{4}{5000}$  de seconde.

Pouillet a appliqué sa méthode à la mesure du temps que met la balle à parcourir le canon d'un fusil. Le fil du circuit passe en  $f$  (fig. 1634), et est interrompu en  $o$ . Dès que le chien s'abat, le circuit est fermé en  $o$ , et le courant passe jusqu'à ce que la balle, en sortant, coupe le fil  $f$ . De la déviation impulsive de l'aiguille du rhéomètre  $R$ , on déduit, au moyen de la table, la durée du courant, et par conséquent le temps qu'a mis la balle à parcourir le canon. Pouillet a trouvé ainsi  $\frac{4}{430}$  à  $\frac{4}{450}$  de seconde, avec l'ancien fusil de munition chargé réglementairement.

**2340. Chronoscope de M. Navez.** — Ce système, imaginé en 1848, est une combinaison du chronoscope électrique et du pendule balistique. On y distingue : 1<sup>o</sup> un chronoscope  $Ep$  (fig. 1637); 2<sup>o</sup> un disjoncteur  $nn'$ ; 3<sup>o</sup> un conjoncteur  $E'b$ .

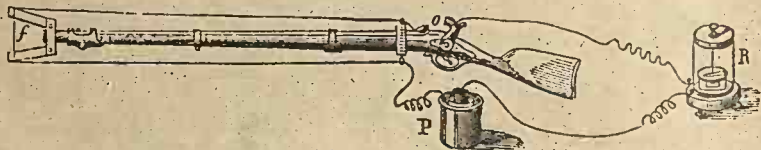


Fig. 1636.

Le chronoscope est formé d'un pendule  $p$  suspendu au centre d'un cercle divisé. La lentille porte une petite masse de fer, par laquelle elle peut adhérer à un électro-aimant horizontal  $E$  fixé au cercle par une vis de pression, et dont le fil aboutit aux bornes  $a, e$ . L'axe autour duquel oscille le pendule, est enveloppé d'un manchon muni d'une rondelle en fer doux qui porte une aiguille  $l$  terminée par un vernier. L'aiguille et le manchon sont entraînés par le pendule, par l'intermédiaire d'un léger ressort qui laisse ce pendule se mouvoir, quand l'aiguille est arrêtée par un électro, qui attire la rondelle de fer doux derrière laquelle il est placé, et dont le fil aboutit aux bornes  $a', e'$ .

Le conjoncteur  $E'b$  consiste en un électro vertical  $E'$  soutenant une masse de fer  $m$  qui, en tombant sur le ressort  $r$ , fait enfoncer son extrémité recourbée dans du mercure, et ferme un circuit dont fait partie ce ressort et la bande de cuivre  $b$ . — Le disjoncteur  $nn'$  se compose de deux lames de cuivre fixes  $c, c$  isolées, communiquant avec les boutons  $n, n$ , et entre lesquelles s'engagent deux autres lames isolées  $c', c'$ . Ces lames  $c', c'$  sont fixées à une tige qui traverse un cylindre  $o$  dans lequel est un ressort à boudin, qui tend toujours à les éloigner des lames  $c, c$ . Si l'on pousse la tige, les lames se touchent, et les bornes  $n, n, n', n'$  communiquent deux à deux. Un arrêt maintient ces lames

en contact; mais si l'on presse le bouton  $o$ , on dégage l'arrêt, et le ressort fait subitement reculer les lames  $c'$ ,  $c'$ .

L'appareil contient trois circuits; les deux premiers, marqués 1 et 2 (fig. 1637), reçoivent l'électricité de la pile  $P$ ; l'un, représenté par un trait double, passe par l'électro  $E$ , la cible  $R$ , dans laquelle il forme des sinuosités, et le disjoncteur  $m'$ ; l'autre, 2, représenté par un trait simple, passe par l'électro placé derrière la rondelle de l'aiguille  $l$ , et par le conjoncteur  $E'b$  et le disjoncteur  $m'$ . Le troisième circuit, représenté par une ligne ponctuée, et recevant le courant de la pile  $P'$ , passe par une seconde cible  $R'$  et par le conjoncteur  $E'b$ .

Cela posé, on fait d'abord une expérience préliminaire. Les lames du disjoncteur  $m'$  étant en contact, de manière que les circuits 1 et 3 soient fermés, on fait adhérer le pendule  $p$  à l'électro  $E$ , on place l'aiguille  $l$  sur le zéro de la

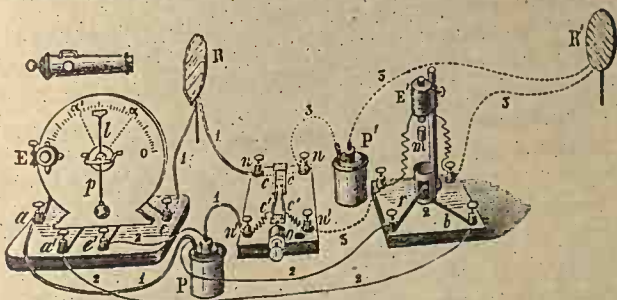


Fig. 1637.

division, et l'on suspend la masse  $m$  à l'électro  $E'$  du conjoncteur. On presse ensuite la détente  $o$ ; les circuits 1 et 3 sont ouverts au même instant, et le pendule  $p$  se détache, ainsi que la masse  $m$ . Celle-ci vient fermer le circuit 2 entre  $r$  et  $b$ ; l'électro placé derrière l'aiguille  $l$  attire la rondelle et arrête cette aiguille dans une position  $\alpha$ , pendant que le pendule continue ses oscillations. On rétablit ensuite l'appareil dans son état primitif et l'on fait partir la pièce de canon. Le boulet coupant le fil de la cible  $R$ , le circuit 1 est interrompu et le pendule tombe. Un instant après, le boulet vient couper le circuit 3 en  $R'$ , la masse  $m$  se détache et vient fermer le circuit 2, ce qui arrête l'aiguille  $l$ . Si les deux circuits 1 et 3 eussent été ouverts au même instant, c'est-à-dire si le boulet n'avait mis aucun temps à franchir l'espace  $RR'$ , l'aiguille se serait arrêtée en  $\alpha$ , puisque toutes les conditions de l'expérience sont restées les mêmes. Mais l'aiguille s'arrête un peu plus loin, en  $\alpha'$ , et la différence  $\alpha\alpha'$  correspond au temps employé par le boulet à parcourir la distance  $RR'$ . Ce temps se déduit par le calcul, de la valeur des arcs  $ox$ ,  $ox'$ . La grandeur absolue de ces arcs dépend évidemment du temps que met la masse  $m$  à tomber sur le ressort  $r$ . On peut donc, en plaçant l'électro  $E'$  plus ou moins haut, donner à ces

avec la grandeur la plus favorable au calcul du temps employé par l'aiguille pour venir de  $\alpha$  en  $\alpha'$ .

#### V. Applications scientifiques et industrielles.

**23-11. APPLICATIONS SCIENTIFIQUES.** — Nous avons eu plus d'une fois à citer des applications des électro-aimants aux observations scientifiques. Wheatstone a eu, le premier, l'idée de s'en servir pour enregistrer les observations météorologiques, et il a construit des appareils inscrivant à la fois les indications du thermomètre, du baromètre et du psychromètre. Nous avons décrit plus haut plusieurs enregistreurs électromagnétiques : barométrographes (II, 1408), anémographes (II, 1424), pluviomètres (II, 1475). Nous avons indiqué comment on emploie les électro-aimants pour entretenir les vibrations d'un diapason chronoscopique, et pour enregistrer les instants où commence et finit un phénomène (I, 594), etc. Nous allons encore citer quelques applications scientifiques, pour montrer avec quelle facilité l'électromagnétisme vient au secours des procédés d'observation.

**23-12. Applications aux observations du baromètre.** — Masson s'est servi d'un courant pour rendre plus précises les observations des baromètres à niveau mobile : Un fil rigide en platine, dont l'extrémité sert de repère, pénètre verticalement dans la chambre vide ; une vis micrométrique traverse le couvercle de la cuvette ; on connaît la distance entre l'extrémité du fil de platine et la pointe de cette vis, quand sa tête se trouve dans une position connue. Le fil et la vis communiquent avec les pôles d'une faible pile, et dans le circuit, se trouve une sonnerie de Mirand (2292). La vis plongeant dans le mercure, on soulève le fond de la cuvette jusqu'à ce que le mercure, qui monte alors dans le tube, vienne effleurer le fil de platine, ce qui est indiqué aussitôt par la sonnerie. On retire alors la vis, jusqu'à ce qu'elle quitte la surface du mercure, ce qui a lieu au moment où la sonnerie s'arrête. La tête de la vis portant 100 divisions, et son pas étant de 1<sup>mm</sup>, on évalue ainsi la longueur de la colonne barométrique, avec une approximation de 0,01 millimètre.

**23-13. Enregistreur du passage des étoiles.** — Cet appareil, établi par M. Airy à l'observatoire de Greenwich, consiste en un cylindre tournant régulièrement ; au-dessus d'une même arête, sont deux crayons soulevés par les contacts de deux petits électros fixés à un chariot qui se déplace suivant une arête du cylindre, de manière que les marques des crayons forment une hélice. L'horloge qui fait tourner le cylindre, interrompt à chaque seconde le courant de l'un des électros, et le crayon qu'il soutient marque alors des points équidistants indiquant les secondes. L'autre électro est parcouru par un courant continu ; au moment où une étoile passe par le fil de la lunette méridienne, l'observateur presse un bouton, le circuit est ouvert, et le crayon retombe et marque un point, dont la position par rapport à ceux qui indiquent les secondes

fait connaître l'heure du passage de l'étoile au méridien. On évalue les fractions de seconde d'autant plus facilement, que les points équidistants sont plus espacés, c'est-à-dire que le cylindre tourne plus rapidement. Comme ce cylindre marcherait par saccades s'il était conduit par une horloge à pendule ordinaire, M. Airy emploie pour régulateur, un *pendule conique* qui décrit régulièrement un cône dont le sommet est à son point de suspension.

**2344. Application à la machine d'Atwood.** — Wheatstone a appliqué sa méthode chronoscopique (2338) à l'étude de la chute des corps. La

figure 1638 représente un appareil construit sur les mêmes principes par MM. Breton. Il est le chronoscope, dont les rouages sont arrêtés par le contact de l'électro-aimant *e*, quand passe le courant de la pile *P*. Une lame de cuivre *c*, mobile à charnière et retenue par le crochet à ressort *k*, soutient une balle de métal. Quand on écarte le crochet, en tirant le cordon *n*, la lame *c* s'abaisse brusquement, et la balle tombe librement dans une coupe *R* fixée à un léger ressort *Ra*, et portée par un curseur que l'on peut arrêter à différentes hauteurs sur la règle *kl*. Le courant passe par l'électro *e*, la lame de cuivre *c*, le crochet *k* et la tige *l'*, qui descend le long de la règle et communique avec le pôle négatif de la pile. Un fil de dérivation *f* peut aussi faire passer le courant par la coupe *R*, le curseur *r* quand la coupe le touche, et par la tige *l'*. Pour faire l'expérience, on tire le cordon *n*, la balle tombe, et, en même temps, la lame *c* se séparant du crochet *k*, le circuit est ouvert en *ek*; alors, le contact de l'électro *e* se déplaçant, le chronoscope *H* se met en marche. Quand la balle arrive en *R*, la coupe s'abaisse sous le choc, le circuit dérivé est fermé en *Rr*, et, le courant étant rétabli dans l'électro, le chronoscope est arrêté. Du chemin qu'ont parcouru les aiguilles, on déduit le temps qu'a mis le corps à tomber de la hauteur *kR*.

M. Bourbouze a imaginé une machine d'Atwood dans laquelle la poulie est munie d'un cylindre enregistreur sur lequel une tige vibrante trace des sinuosités. Un petit électro retient la tige et la laisse vibrer au moment où le corps pesant commence à descendre. Les espaces occupés par un même nombre de sinuosités tracées sur le cylindre sont entre eux, comme les espaces parcourus par le corps qui tombe pendant le même nombre de vibrations, c'est-à-dire pendant le même temps.

**2345. Conservation du mouvement du pendule de L. Foucault.** — *P* (fig. 1639) est une sphère qui sert de lentille au pendule. Un électro de forme cylindrique *E*, qui reçoit le courant de la pile *np*, est placé verticalement

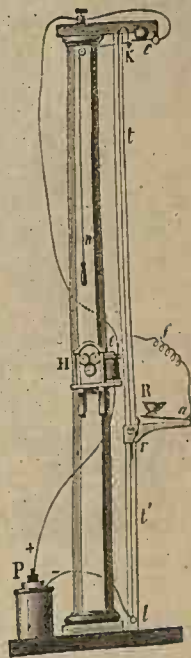


Fig. 1638.

au-dessous, de manière que les centres de ses bases soient exactement sur la verticale passant par le point de suspension. La sphère du pendule contient un cylindre vertical en fer doux, dont l'axe coïncide avec le prolongement du fil de suspension. Il faut que ce cylindre soit attiré par l'électro pendant chaque demi-oscillation descendante, et que le circuit de cet électro soit fermé et ouvert au moment convenable, sans que le pendule intervienne pour faire jouer le rhéotome, ce qui porterait atteinte à la liberté de ses mouvements. L. Foucault, aidé de Froment, a rempli ces conditions de la manière suivante : L'électro-aimant, E, est appuyé sur un ressort R, et soutient un levier métallique *ol* équilibré par le contre-poids *q*. Ce levier, en s'abaissant, vient frapper la borné *a*, et ferme le circuit *peolan* d'un second électro *e*. Ce dernier agit alors sur le levier de fer *o'l'* et l'abaisse, de manière à fermer en *l'a'* le circuit *pEo'l'n* de l'électro E. Mais le levier *o'l'* ne peut s'abaissier que peu à peu ; car il porte un cliquet *r* qui pousse une roue à rochet et fait tourner un volant *v*, par l'intermédiaire d'une seconde roue dentée. Ce n'est qu'après que ces rouages ont défilé, que le circuit se trouve fermé en *l'a'*, après un temps qui dépend du moment d'inertie du volant. — Voici maintenant comment fonctionne l'appareil : Supposons que le pendule soit au commencement d'une demi-oscillation descendante ; l'électro E, comprimant par son poids le ressort R, abaisse le levier *ol* et ferme en *la* le circuit de l'électro *e*, le levier *o'l'* est alors attiré et ferme en *l'a'* le circuit de l'électro E. Ce dernier attire donc le fer doux du pendule et en accélère le mouvement, sans rien changer à la direction du plan d'oscillation, l'action s'exerçant dans un plan ver-

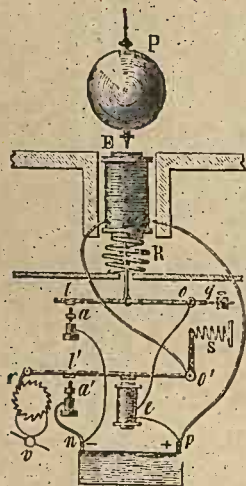


Fig. 1639.

tical passant par le point de suspension. Quand le pendule arrive très-près de l'électro E, le fer qu'il contient réagit pour soulever cet électro, le circuit est interrompu en *la*, et, l'électro *e* rentrant à l'état neutre, le levier *o'l'* se relève sous l'action du ressort de rappel *s* ; l'électro E n'agit donc plus sur le pendule, qui peut accomplir sans obstacle sa demi-oscillation ascendante. Il est vrai que le pendule n'a pas plutôt quitté la verticale, que l'électro E, revenu à l'état neutre, descend en comprimant le ressort R, et rétablit le courant dans l'électro *e* ; mais, comme le levier *o'l'* ne s'abaisse que peu à peu, à cause du système de rouages *rv*, le pendule a le temps d'arriver à la limite de son amplitude avant que le circuit ne soit fermé en *l'a'*, et que le courant ne soit rétabli en E.

**2346. Applications diverses.** — On a fait d'innombrables applications de l'électromagnétisme à l'industrie et aux usages domestiques. Beaucoup d'entre elles doivent être considérées comme de simples expériences de curio-



sité; car, toutes les fois qu'on peut, par des moyens mécaniques, obtenir les mêmes résultats plus simplement et à moins de frais, l'électricité n'est qu'un embarras inutile, et il serait peu rationnel de la faire intervenir. L'énumération seule des appareils, en général très-ingénieux, qu'on a imaginés pour les diverses applications, serait très-longue; nous ne pouvons donc décrire ici ces appareils, et nous renverrons aux ouvrages spéciaux<sup>1</sup>, nous contentant de donner des indications succinctes sur les applications les plus curieuses ou les plus importantes.

Nous citerons d'abord l'électrotrieuse de M. Chenot, qui sert à séparer les parcelles de fer des résidus pulvérulents de diverses opérations industrielles. Des électros disposés en rayons autour d'une roue en mouvement, plongent en arrivant en bas, dans les résidus amenés par une toile sans fin, et emportent les parcelles de fer, qui s'en détachent ensuite à une certaine hauteur, et tombent sur un plan incliné, le courant qui animait ces électros étant ouvert par un disjoncteur placé sur l'arbre tournant.

MM. Bonelli, Maumencé..., ont remplacé, dans les métiers à tisser, les cartons troués de Jacquart par des systèmes d'électros et par des cylindres rhéotomes mettant en activité les électros qui correspondent aux fils de chaîne qui doivent être soulevés.

On a employé les courants pour transmettre le mouvement des touches des claviers des grandes orgues, aux soupapes qui distribuent le vent dans les tuyaux. Ces soupapes sont attirées par des électros, dont le courant est fermé par la touche correspondante, quand on l'abaisse. Les soupapes à levier pneumatique de M. Barker (I, 714) sont actionnées de la même manière, ainsi que les registres, par l'intermédiaire de leviers pneumatiques. Ce système a été appliqué, à Paris, aux orgues de Saint-Augustin et de Saint-Pierre de Montrouge; il permet de placer les claviers à une grande distance du buffet d'orgue, et même loin de l'édifice qui le contient.

Pour avertir d'un commencement d'incendie, MM. de Gaulne et Ch. Mildé, entre autres, placent dans l'enceinte à surveiller, près du plafond où la chaleur se porte d'abord, un système de 2 lames de compensation (II, 1005) formées de zinc et acier soudés suivant leur longueur, et fixées à peu près parallèlement par une de leurs extrémités. Une chaleur accidentelle les courbe, et leurs extrémités libres se joignant, ferment un courant qui fait marcher une sonnerie d'alarme à une distance qui peut être très-grande.

M. Edison a imaginé une plume électrique, qui consiste en un porte-plume dans l'axe duquel est une tige terminée par une pointe très-sûne. Cette pointe sort à l'extrémité inférieure et fait de rapides oscillations, 5 à 6 mille par seconde, dans le sens de sa longueur et dans une très-petite amplitude. Le mouvement lui est imprimé par un petit moteur électromagnétique fixé à l'extrémité supérieure du manche et animé par deux couples à chromate de

<sup>1</sup> Voir *Exposé des applications de l'électricité*, par le comte du Moncel (3<sup>e</sup> édition).

potasse auxquels il est réuni par des fils métalliques très-fins. Quand on promène l'aiguille en mouvement sur une feuille de papier, celle-ci est criblée de trous suivant les lignes parcourues, et l'on peut ensuite, en l'appliquant sur une feuille blanche, et passant en-dessus un rouleau garni d'encre d'imprimerie, obtenir une épreuve du dessin produite par l'encre qui traverse les trous microscopiques, trous qui sont assez rapprochés pour figurer des lignes continues. On peut tirer ainsi des centaines d'exemplaires avec une même feuille piquée.

On fait communiquer les différentes parties d'une habitation d'un grand établissement, au moyen d'espèces de télégraphes électriques à sonnerie Mirand. On a appliqué les électro-aimants à la construction de cherche-fuites pour le gaz ou l'eau; à l'embrayage des machines sans qu'on ait besoin de s'en approcher; à des machines à voter pour les grandes assemblées; à des avertisseurs de différentes sortes; à la chirurgie, pour reconnaître la présence d'un corps métallique au fond d'une plaie; à la fermeture de meubles à secret; à des machines à écrire, à graver, à imprimer; à des jouets d'enfant, et même à des bijoux combinés par M. Trouvé, dans lesquels de petites figures se meuvent sous l'influence d'électro-aimants microscopiques animés par de petites piles à sulfate de mercure contenues dans des tubes de moins de 1<sup>cm</sup> de diamètre, etc.

## VI. Éclairage électrique.

2317. Une des applications les plus remarquables de l'électricité est celle que les progrès de l'électromagnétisme ont permis d'en faire d'une manière pratique à l'éclairage public et privé. Les électro-aimants jouent un rôle important dans cette application, soit comme organes essentiels de régulateurs des courants des piles, soit comme pièce principale des générateurs magnéto-électriques qui produisent plus économiquement l'électricité. La lumière électrique employée dans l'éclairage est produite de deux manières différentes : 1<sup>o</sup> le plus ordinairement au moyen de l'*arc voltaïque*, dont nous avons étudié les propriétés (1943); 2<sup>o</sup> au moyen de l'*incandescence* produite par un courant intense, dans un conducteur imparfait ou au point de jonction de deux charbons en contact imparfait.

Nous allons d'abord nous occuper de l'éclairage par l'arc voltaïque, jaillissant, comme on l'a fait d'abord, entre deux charbons opposés l'un à l'autre. Nous avons vu que ces charbons s'usent inégalement, par combustion et par arrachement de parcelles transportées du charbon positif au charbon négatif. Il résulte de là qu'il faut, si l'on ne veut voir le courant interrompu, rapprocher de temps en temps ces charbons l'un de l'autre. Dans le principe, cela se faisait à la main; mais on a imaginé depuis un grand nombre d'appareils nommés *régulateurs de la lumière électrique*, ou *lampes électriques*, qui fonctionnent automatiquement sous l'influence même du courant qui produit l'arc. L. Foucault, en France, et MM. Staite et Petri, en Angleterre, ont imaginé, en 1848, les

premiers régulateurs donnant de bons résultats. Nous allons décrire quelques-uns de ces appareils.

**2348. Régulateur de M. Duboscq.** — Cet appareil fait mouvoir les deux charbons à la fois; de manière à conserver à l'arc voltaïque une position constante, ce qui est souvent utile, par exemple, dans les expériences d'optique. Les deux charbons *c*, *c'* (fig. 1640), sont fixés à des tiges métalliques *t*, *t'* pouvant glisser verticalement dans les pièces qui les supportent. La première, *t*, est sollicitée à monter, par un ressort de montre renfermé dans un barillet *b*, par l'intermédiaire d'un cordon *e* qui s'enroule sur un cylindre fixé au barillet, et passe sur une poulie de renvoi. L'autre tige, *t'*, tend à descendre par son poids; mais elle est retenue par un cordon de soie enroulé autour d'un second cylindre *r*, et descend quand ce cylindre tourne avec le barillet. Le mouvement du barillet est transmis, par une roue et une vis sans fin, à un volant qu'arrête un crochet poussé par le levier *i*. Ce n'est que lorsque ce crochet s'élève, que les rouages peuvent tourner. Pour que cela ait lieu quand la distance entre les charbons a augmenté par la combustion, on fait passer le courant qui produit l'arc, dans le fil de l'électro-aimant *E*. Les flèches indiquent la marche de ce courant, qui entre en *o'* et sort en *o*. Le fer doux de l'électro est foré, de manière à laisser passer et à guider la tige *t*. Tant que le courant n'est pas trop affaibli par la distance des charbons, l'électro retient son armature *v*; le levier *i* est abaissé, et les rouages sont arrêtés. Mais quand cette distance augmente, l'armature est soulevée par un ressort, les rouages deviennent libres, et les charbons sont rapprochés. Alors le courant reprend son intensité, l'armature est attirée, et les rouages arrêtés.

Les cordons qui soutiennent les charbons dans lequel des roues dentées tournant en sens contraire, agissent sur des crémaillères adaptées aux porte-charbon. Le charbon supérieur est alors soutenu par une potence qui glisse dans un tube, comme celle que l'on voit en *P'P'* (fig. 1642).

**Régulateur à liquide.** — Ce régulateur (fig. 1644), dû à MM. Duboscq et Marçais ne contient aucun rouage. Le porte-charbon supérieur, *P*, forme la tige d'un piston, qu'on peut remonter au moyen d'une crémaillère à pignon, et qui est pressé sur de l'huile *H* par un ressort à boudin *r*. Le porte-charbon inférieur positif est soutenu en *P'* par une grenouillère, système de losanges articulés *abcd*, fixée en *o*, et dont l'angle *n* est tiré vers le bas par la crémaillère. Alors *P'* monte d'une quantité qui est à celle dont descend le charbon *c*, comme *ab* : *cd*.

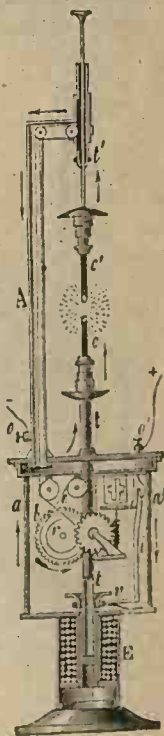


Fig. 1640.

Le piston descend quand l'huile peut s'écouler par le tube T, fermé en s par une soupape que commande la tige *t*. En E, est un électro-aimant parcouru par le courant. Quand ce courant s'affaiblit, le contact *k* descend, et le levier *l* tirant la tige *t*, ouvre le passage à l'huile ; le piston descend donc, et les charbons se rapprochent. Alors le contact remonte et la soupape *s* se ferme.

Dans les régulateurs précédents, si l'arc vient à s'interrompre, il faut l'intervention d'un surveillant pour ramener les charbons au contact et rétablir le courant ; ce qui est impossible quand l'appareil est renfermé en vase clos ; par

exemple, quand on opère sous l'eau, dans les mines, dans le vide. Avec les appareils suivants, l'arc se rallume de lui-même.

### 2349. Régulateur

de M. V. Serrin. —

C'est ce régulateur qu'on emploie le plus souvent dans les applications où l'on emploie le courant d'une pile. L'un des porte-charbon PP (fig. 1642) consiste en un tube qui glisse dans un manchon *m'm* articulé aux leviers *oa*, *o'a'*, mobiles en *o* et *o'*, et dont les oscillations sont limitées par les vis *v* et *u*. Le second porte-charbon P'P' s'enfonce librement dans la

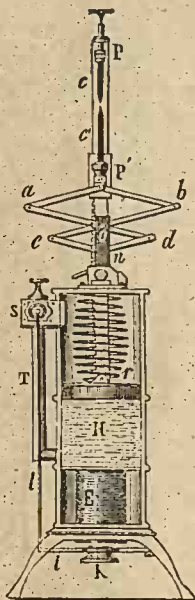


Fig. 1641.

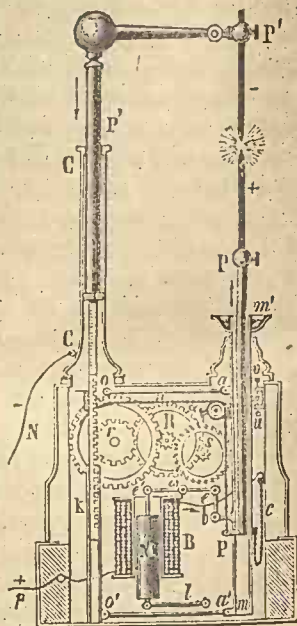


Fig. 1642.

colonne isolée CC, et porte une crémaillère *k* qui agit sur un pignon *r*. Ce pignon est lié à une roue, qui en fait tourner deux autres, R et s ; mais la dernière est arrêtée par un crochet *α* porté par le manchon *m'm*. Sur l'arbre du pignon *r* est affermie une poulie, autour de laquelle s'enroule une chaînette *n*, qui passe sur une poulie de renvoi et soulève le porte-charbon PP quand la crémaillère descend avec le porte-charbon P'P'. Le rayon de la poulie est double de celui du pignon *r*, de manière que le charbon inférieur, qui est positif, monte deux fois autant que le charbon supérieur descend. Enfin, le manchon *m'm* est soutenu en *b* par un levier *e'oe* équilibré par la masse cylindrique de fer doux M engagée dans une bobine B. Cette masse est soulevée quand passe le courant, d'autant plus qu'il est plus intense, et elle descend, en

faisant monter le manchon  $m'm$ , quand le courant s'affaiblit (2136). Des poids placés en  $m'$  servent à équilibrer la masse  $M$ . Le courant de la pile arrive en  $p$ , circule dans la bobine, passe, par la chaîne  $c$ , dans le porte-charbon  $P$ , et sort par  $P'CN$ .

Quand le courant est interrompu, les charbons sont en contact; mais, dès que le courant est établi, la masse  $M$  est soulevée, le manchon  $m'm$  s'abaisse jusqu'à ce que la vis  $u$  l'arrête, en entraînant par frottement le porte-charbon  $PP$ ; en même temps, le charbon supérieur monte un peu sous l'action de la chaînette  $n$ , qui tire sur la poulie  $r$  de manière à faire monter la crémaillère  $k$ , le crochet  $\alpha$  s'engage dans les dents de la roue  $s$ , et l'arc voltaïque est formé. L'écart des charbons ayant un peu affaibli le courant, la masse  $M$  descend un peu, et le manchon remonte, de manière que son mentonnet se tient entre les deux vis  $u$  et  $v$ , et que le crochet  $\alpha$  ne touche une dent de la roue  $s$  qu'à son extrémité. Si le courant s'affaiblit par l'usure des charbons, la masse  $M$  descend encore, le manchon monte jusqu'à ce que la vis  $v$  l'arrête, et, le crochet  $\alpha$  abandonnant la roue  $s$ , la crémaillère descend avec le charbon négatif, pendant que le charbon positif est soulevé par la chaînette  $n$  qui s'enroule sur la poulie  $r$ . Dès que le courant a repris son intensité, la masse  $M$  remonte, et le crochet  $\alpha$  arrête la roue  $s$ .

Si le courant est interrompu, la masse  $M$  descend, le crochet  $\alpha$  abandonne la roue  $s$ , et les charbons viennent au contact; le courant est alors rétabli, et l'arc se reproduit. La chaîne  $c$  est assez grosse pour que le poids de la partie attachée au porte-charbon compense la perte de poids du charbon inférieur, de manière que le levier  $ew'e'$  reste toujours équilibré.

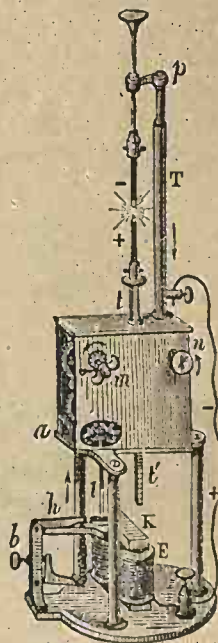


Fig. 1643.

**2350. Régulateur Foucault.** — La figure 1643 représente un nouveau régulateur, imaginé par L. Foucault et construit par M. Dubosq, qui corrige les plus petites variations de distance des charbons, dans quelque sens qu'elles aient lieu. Le charbon positif est porté par une tige  $u'$ , munie d'une crémaillère verticale, représentée à part en  $C$  (fig. 1645) et qu'engrène la roue dentée  $R$ . Le charbon négatif est porté par une potence à crémaillère  $p$  (fig. 1643) glissant dans le tube  $T$ . Cette crémaillère se voit en  $T$  (fig. 1645); elle fait mouvoir la roue  $R'$ , liée invariablement à la roue  $R$ , et ayant deux fois plus de dents. Suivant le sens de la rotation du système  $RR'$ , les charbons se rapprochent ou s'éloignent. Ce sens dépend de l'action de l'électro-aimant  $E$  (fig. 1643), dont le contact  $K$  est surmonté d'un levier  $l$ , représenté à part en  $L$  (fig. 1644) et portant une pièce  $A$  par laquelle il peut arrêter deux

petits volants V, V', liés aux roues *v*, *v'* (fig. 1645), et tendant à tourner en sens contraire. Ou bien les deux volants sont arrêtés, et alors les charbons sont fixes ; ou bien un seul des volants est arrêté, et l'autre tourne. Quand le courant s'affaiblit, c'est le volant V qui est libre, et les charbons se rapprochent ; c'est le contraire quand, le courant augmentant d'intensité, le volant V' est libre à son tour.

Un levier à résistance variable, dû à R. Houdin, donne à l'appareil une extrême sensibilité, en réglant les mouvements du contact K (fig. 1643). Ce contact, qui ne touche jamais l'électro-aimant, en est éloigné par un ressort de rappel *r* (fig. 1644), qui agit sur le bras *Bo* par l'intermédiaire d'une pièce à surface convexe, *II*, articulée en *c*. Cette pièce presse ce bras par un point variable, d'autant plus éloigné du point d'appui *o* que, le bras étant plus relevé, l'électro-aimant agit sur K à une plus petite distance ; de sorte que la résistance

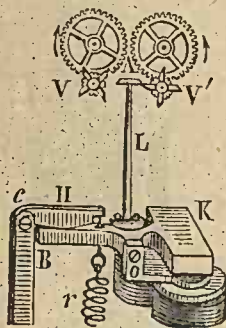


Fig. 1644.

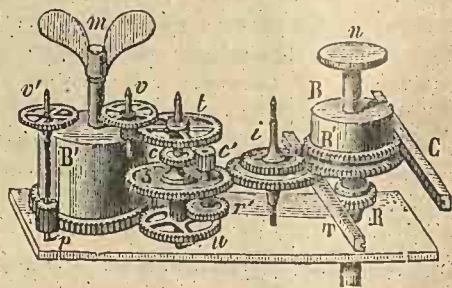


Fig. 1645.

à son action croit avec l'intensité de cette action, ce qui modère l'amplitude des oscillations du contact et du levier L.

Voyons maintenant par quel mécanisme les volants V, V' (fig. 1644) tendent à tourner en sens contraire. Deux barillets à ressorts B, B' (fig. 1645), sollicités à tourner en sens opposé, sont liés entre eux par un système de roues dentées, parmi lesquelles on distingue la roue *s*, dite *roue à satellite*. Le ressort de B' est plus fort que celui de B, et peut le remonter en faisant rebrousser les roues RR'. Les roues *v*, *v'* communiquent avec les volants V, V' (fig. 1644) et s'arrêtent en même temps qu'eux. — Supposons la roue *v'* arrêtée, et *v* libre ; le barillet B' est tenu en repos par la roue *v'* et le pignon *p* ; le barillet B se met en mouvement, entraînant, par l'intermédiaire des roues *i*, la roue-satellite *s*. Le plateau de cette roue est traversé par un arbre tournant portant un pignon *c'* et une roue *r'* dont les dents engrenent la roue *c* et le pignon *r*. Ces derniers sont affermis, avec les roues *t* et *u*, sur des canons pouvant tourner autour de l'arbre de la roue *s*, et indépendamment de cet arbre. La roue *u*,

engagée dans les dents du barillet B', étant maintenue au repos, le système  $c'r'$ , transporté autour de l'arbre de  $s$ , fait tourner la roue  $t$  (les roues  $r'$  et  $c'$  étant très-inégales) et par suite le volant en relation avec  $v$ . En même temps, le mouvement de  $s$  se communique au système RR', et les charbons se rapprochent.

Supposons maintenant  $v$  arrêtée et  $v'$  libre. Le barillet B' tourne en entraînant la roue  $u$ ; et, le pignon  $c'$  étant arrêté par la roue  $e$ , le système  $c'r'$  se déplace en faisant tourner la roue satellite  $s$ . Celle-ci transmet son mouvement au système RR', en remontant le ressort de B; et les charbons s'écartent.

On a imaginé beaucoup d'autres systèmes de *lampes électriques*; celles que nous venons de décrire donnent de bons résultats, et il est peu probable qu'on puisse faire beaucoup mieux. Quel que soit, du reste, l'appareil employé, l'éclat et la régularité de la lumière obtenue dépendent beaucoup de la qualité des charbons employés.

**2351. Charbons.** — Davy employait du charbon de bois éteint dans l'eau. L. Foucault lui substitua le charbon de cornue, plus résistant et brûlant moins vite, mais qui est généralement peu homogène, et contient des silicates qui fondent et donnent lieu à des scintillations incommodes et même à l'extinction brusque de l'arc. On a donc fait de nombreuses recherches pour obtenir des charbons homogènes et donnant une lumière calme.

MM. Staité et Edwards, dès 1842, avaient fabriqué des charbons avec du coke pulvérisé, mêlé de sirop de sucre, puis calciné, de manière que le sucre réduit en charbon remplissait les pores et augmentait la densité. Beaucoup d'autres charbons ont été inventés depuis; ceux de M. Carré, trois ou quatre fois plus tenaces que le charbon de cornue, sonores et brillants comme des métaux, jouissent d'une grande faveur. Ils ont la forme de baguettes cylindriques, que l'on obtient en chassant la matière pâteuse par un trou, au moyen d'une forte pression. La pâte est formée de coke pulvérisé (15 parties), noir de fumée calciné (5) et sirop de sucre (7 à 8). Les baguettes sont ensuite calcinées. Il résulte des expériences de M. Fontaine que ces charbons donnent une lumière qui peut dépasser de près de moitié celle des charbons de cornue.

On a essayé de mélanger divers sels métalliques à la pâte, afin que le métal réduit sur l'électrode négative ajoute la lumière qu'il produit en brûlant. On a aussi enveloppé les charbons de couches métalliques déposées par galvanoplastie, pour empêcher la combustion des parties voisines de l'arc voltaïque. M. E. Reynier a constaté que ces charbons *métallisés* durent beaucoup plus que les autres: des baguettes de 7<sup>mm</sup> de diamètre, qui se raccourcissent de 234<sup>mm</sup> en une heure, quand elles sont nues, ne perdent que 186<sup>mm</sup> ou 144<sup>mm</sup> quand elles sont cuivrées ou nickelées; la lumière conservant toujours sensiblement le même éclat.

**2352. Premières applications.** — C'est depuis l'invention des régulateurs que la lumière électrique a été employée à autre chose qu'aux expériences de physique, ou à l'embellissement des fêtes publiques. On l'a fait servir aux expériences d'optique, pour remplacer la lumière solaire. Les photographes

l'ont employée de bonne heure pour opérer par tous les temps et à toute heure. On l'a fait servir avec grand avantage à l'éclairage des chantiers pendant la nuit ; d'abord aux travaux du Louvre et du pont Notre-Dame à Paris, du pont du Rhin à Kehl. Un seul appareil pouvait éclairer des centaines d'ouvriers avec une régularité remarquable, et les plus éloignés étaient illuminés comme par un beau clair de lune. En certains cas, la dépense n'atteignait pas 1 centime et demi par heure et par ouvrier, et les moyens d'alors étaient beaucoup moins économiques que ceux qu'on possède aujourd'hui.

La découverte de l'induction électrodynamique, et l'invention des générateurs puissants d'électricité qui en a été la conséquence, ont fait faire un grand pas à ce mode d'éclairage. Après les premiers essais faits avec la machine Nollet on l'a appliqué à l'éclairage des phares, d'abord au phare de Dungeness, en Angleterre, au commencement de l'année 1862, puis au cap de la Hève, près du Havre à la fin de 1863. Depuis, cette importante application s'est répandue de plus en plus. Dans le principe on ramenait les courants alternatifs de la machine Nollet à un même sens, mais Masson ayant pensé avec raison que l'on pouvait employer les courants alternatifs, les régulateurs furent simplifiés, et les courants gagnèrent notablement en intensité, les commutateurs produisant toujours une certaine résistance. L'application de la lumière électrique aux phares constitue un grand progrès. Le foyer lumineux est beaucoup plus resserré, ce qui est favorable à l'effet des lentilles, et la lumière porte beaucoup plus loin, pour cette raison, et aussi parce qu'elle est beaucoup plus éclatante que celle de l'huile. D'après M. Allard son éclat équivaut, à égalité de surface lumineuse, à 255 fois celui de la flamme d'un bec de phare à 5 mèches. On a trouvé, en outre, que l'éclat, à égale surface, de la lumière de l'arc fourni par une machine dynamo-électrique puissante, égale et peut même dépasser l'éclat du soleil. Nous verrons, dans l'optique, par quels procédés photométriques on fait de semblables comparaisons. Enfin, l'application de la lumière électrique aux phares réalise une grande économie, et la dépense peut, d'après M. Leroux, être abaissée à  $\frac{1}{4}$  de celle de l'éclairage à l'huile.

On commence à munir les navires à vapeur de feux électriques alimentés par des générateurs dynamo-électriques que fait mouvoir la machine à vapeur, et qui, illuminant l'espace à de grandes distances, permettent d'éviter plus facilement ces abordages désastreux qui viennent trop souvent épouvanter la navigation. La gêne qu'apporte une lumière trop vive est évitée, en rendant la lumière intermittente au moyen d'un disjoncteur mu par la machine d'induction ; par exemple, on la laisse briller pendant 20 secondes suivies de 100<sup>s</sup> d'interruption. En éclairant l'espace en avant et d'une manière continue, un navire peut entrer facilement dans le port, et la navigation fluviale peut être continuée pendant la nuit, même dans les passages les plus difficiles.

M. Martin de Brette a proposé d'appliquer l'éclairage électrique à l'art de la guerre, pour faire des signaux, illuminer le terrain dans les reconnaissances, démasquer les travaux de l'ennemi. On a construit pour cela des machines loco-



mobiles portant un générateur dynamo-électrique. Pendant le siège de Paris, en 1870, des lampes électriques avec réflecteur sphérique furent installées aux postes les plus avancés, lançant au loin des faisceaux lumineux plus ou moins divergents, avec lesquels on pouvait balayer la campagne et déceler l'approche de bandes ennemies qui espéraient surprendre, pendant les ténèbres, des postes qu'elles n'osaient attaquer au grand jour.

La lampe électrique, renfermée dans un cylindre métallique muni de glaces, permet d'éclairer à une grande profondeur sous l'eau, pour les travaux hydrauliques, le sauvetage d'objets naufragés, etc. On s'est également servi du même appareil pour éclairer les galeries de mine, sans craindre d'enflammer le *grison*.

On a songé de bonne heure à appliquer l'arc voltaïque à l'éclairage des places publiques et des rues, mais plusieurs difficultés, entre autres le haut prix de l'électricité fournie par les piles avant l'invention des générateurs magnéto-électriques, ont fait regarder longtemps cette application comme irréalisable. Un autre obstacle venait de la nécessité de munir chaque foyer lumineux d'un régulateur, appareil coûteux et délicat; mais dernièrement, en 1876, M. Jablochhoff a levé cette difficulté en imaginant une disposition très-simple, avec laquelle on se passe de régulateur.

### 2353. Bougies Jablochhoff. —

Deux baguettes de charbon *c, c'* (fig. 1646) sont placées parallèlement l'une à côté de l'autre, et séparées par une matière isolante (ordinairement un mélange de plâtre et de sulfate de baryte). Ces charbons sont en communication, par le bas, avec les fils rhéophores. L'arc voltaïque s'établit à l'extrémité libre, et fond la matière interposée à mesure que les charbons brûlent, de manière à toujours laisser leur extrémité libre. Pour allumer, les extrémités ont été réunies par une couche de plombagine obtenue en trempant simplement la bougie dans une pâte formée de poudre de plombagine et d'eau gommée. Dans le principe, on employait une aiguille de charbon retenue par un fil d'amianté.

Le système des deux charbons accouplés *C* (fig. 1646) est enveloppé d'un globe en verre opalin *B*, qui amortit le trop grand éclat du foyer lumineux, mais lui fait perdre environ 0,4 de son intensité. La lumière est d'une blancheur remarquable, et rappelle celle de la lune quand l'air est très-pur.

Les charbons *C* sont maintenus dans le globe de verre au moyen d'une espèce de chandelier, représenté à part en *rl* (fig. 1646), qui porte deux pièces de

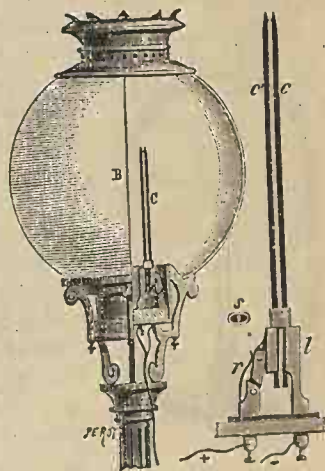


Fig. 1646.

métal *r*, *l* creusées en dedans de rainures verticales dans lesquelles la bougie *cc'*, dont on voit la coupe transversale en *s*, est pressée par le ressort *r*.

Pour que les charbons s'usent également, il faut employer des courants alternatifs, et c'est pour cela que M. Gramme a imaginé sa machine à courants renversés (2278), avec laquelle on alimente ordinairement l'arc voltaïque, pendant qu'elle-même est excitée par l'appareil dynamo-électrique à courant continu (2277); de sorte que le moteur a deux machines à faire mouvoir. Chaque appareil, pouvant donner des courants alternatifs dans plusieurs circuits, ordinairement 4 (2278), peut servir à alimenter autant de ballons plus ou moins éloignés les uns des autres.

On emploie ordinairement des charbons de M. Carré (2351), de 4<sup>mm</sup> de diamètre, distants de 3<sup>mm</sup> et fournissant une lumière équivalent à celle de 25 à 40 becs de gaz. Comme ils ne durent qu'une heure et demie, on installe plusieurs bougies dans le même globe, et l'on fait passer le courant de l'une à l'autre au moyen d'un commutateur dont on change la position, à la main, au moment convenable. On a imaginé aussi des dispositions au moyen desquelles le courant passe automatiquement d'une bougie à l'autre : un ressort appuyé sur le bas de la matière isolante interposée, devient libre au moment où la fusion de celle-ci arrive au point d'appui, et fait mouvoir un levier qui conduit le courant dans la bougie voisine.



Fig. 1647.

**2354. Bougies sans isolant solide.** — On a construit des systèmes de charbons sans matière isolante solide. Il faut alors, pour que l'arc ne puisse se déplacer, que les charbons ne soient pas parallèles; on les incline donc l'un vers l'autre, et plusieurs physiciens, entre autres MM. Wilde et de Meritens

ont imaginé des dispositions qui les rapprochent à mesure qu'ils s'usent, pour qu'il n'y ait pas d'augmentation dans la distance à franchir par l'arc.

M. Jamin vient d'imaginer une disposition très-simple qui permet d'employer des charbons parallèles. Il fait faire au circuit 3 ou 4 tours enveloppant les charbons (fig. 1647) de manière que le courant marche comme l'indiquent les flèches. Quel que soit le point où l'on établit l'arc au moyen d'une aiguille de plombagine, on le voit se précipiter vers les extrémités libres des charbons, en obéissant, comme un courant mobile, aux actions des quatre côtés du multiplicateur *abcd*, suivant les lois d'Ampère (2156). Afin de pouvoir allumer, on a retenu les charbons au contact au moyen d'un anneau de caoutchouc, qui fond, laissant les charbons s'écarter par leur élasticité, et l'arc s'établit, avec explosion.

L'arc, soulevé par l'action du multiplicateur et par le courant ascendant d'air chaud, se courbe et devient plus long. M. Jamin a eu l'idée de renverser les charbons la pointe en bas; alors le courant d'air agit en sens inverse du circuit

enveloppant, l'arc est plus court, plus brillant ; si bien qu'un courant qui ne peut qu'à peine entretenir 3 foyers lumineux les uns à la suite des autres, quand les charbons sont droits, en entretient facilement 5, quand ils sont renversés.

**1855. Applications.** — L'invention des bougies Jablochhoff, venant à la suite de celle des machines dynamo-électriques, a donné une vive impulsion à l'éclairage électrique, qui s'est rapidement répandu en Europe et en Amérique, dans les usines, les gares de marchandises des chemins de fer, les magasins, les grands ateliers, où l'on commence à supprimer les globes opalins, à la demande même des ouvriers, ce qui fait gagner environ 40 pour 100 d'intensité lumineuse. On a enfin appliqué avec succès ce mode d'éclairage aux voies publiques. Les premières expériences suivies et concluantes ont été faites à Paris en 1878, et les étrangers attirés par l'Exposition ont pu admirer, chaque soir, l'éclairage de la place et de l'avenue de l'Opéra, du palais Bourbon, etc., et de divers grands magasins. Des machines de Gramme lancent des torrents d'électricité dans les bougies Jablochhoff. Ces expériences, répétées et poursuivies dans beaucoup de villes des départements et de l'étranger, ont occasionné une vive émotion parmi les intéressés à l'exploitation du gaz d'éclairage ; mais ces craintes paraissent très-exagérées. L'électricité ne peut, dans une foule de circonstances, remplacer l'éclairage par le gaz, dont elle ne pourra que, momentanément, restreindre la consommation, de même que le gaz n'a pas fait abandonner l'éclairage à l'huile, et que les chemins de fer n'ont pas fait renoncer aux chevaux et aux voitures, et n'ont fait, au contraire, qu'en multiplier l'usage.

On a fait de nombreuses expériences pour comparer les prix de la lumière électrique et de celle du gaz. Dès 1856, M. E. Becquerel avait trouvé que la lumière fournie par 60 couples de Bunsen coûtait 4 fois plus cher que celle du gaz et à peu près autant que celle de l'huile ; et MM. Lacassagne et Thiers étaient arrivés depuis aux mêmes résultats. Mais l'emploi des machines d'induction a considérablement réduit la dépense. D'après MM. Reynaud et Leroux, avec les machines Nollet, la dépense ne dépasse pas celle du gaz, et elle a encore été abaissée par l'usage des nouvelles machines.

Dans les grandes usines où il existe un moteur dont on peut emprunter une partie de la puissance pour faire mouvoir les générateurs d'électricité, le prix de la lumière électrique est étonnamment réduit. Ainsi, M. Fontaine<sup>1</sup> trouve, avec les machines de Gramme, que l'éclairage d'un grand atelier coûte, dans les circonstances les plus défavorables, de 7 à 11 fois moins par l'électricité que par le gaz, suivant le prix de ce dernier, et en tenant compte de tous les frais, entretien, surveillance, intérêt du capital d'acquisition des appareils, etc. N'oublions pas que les bougies Jablochhoff n'étaient pas alors connues, et que les générateurs se simplifient et se perfectionnent chaque jour.

**2356. Division de la lumière électrique.** — Quand il faut un moteur spécial pour produire la lumière électrique, la dépense s'élève aussitôt dans une

<sup>1</sup> *Éclairage à l'électricité*, par H. Fontaine (1877), p. 200.

grande proportion, surtout si l'on n'a qu'un petit espace à éclairer. Il faudrait, pour l'éclairage des petits espaces, avoir le moyen de *diviser* l'électricité et de la distribuer à de nombreux et faibles foyers lumineux, comme on distribue le gaz à de nombreux becs. Cette question de la division de la lumière électrique a beaucoup occupé les inventeurs, et l'on en a donné différentes solutions. Mais, disons-le tout de suite, les résultats économiques qui précèdent ne s'appliquent plus à la lumière divisée, probablement, comme le remarque M. du Moncel, parce que la lumière dégagée diminue beaucoup plus rapidement que la chaleur produite, quand l'action totale s'affaiblit, et la chaleur représente du travail mécanique perdu pour l'éclairage. D'après M. Preece, la quantité de lumière fournie par une quantité donnée d'électricité diminuerait, à partir d'une certaine limite, comme le carré du nombre de foyers lumineux distribués dans un même circuit. C'est pour cela, sans doute, que l'éclairage électrique de l'avenue de l'Opéra coûte plus cher que par le gaz, plusieurs candélabres étant alimentés par le même générateur électrique. Ajoutons, du reste, que des progrès significatifs ont déjà été réalisés dans le prix de revient, par le perfectionnement des méthodes de division, dont nous allons maintenant nous occuper.

Les générateurs à courants multiples (2278) donnent une solution partielle du problème, une même machine pouvant alimenter plusieurs circuits indépendants les uns des autres. De plus, un même courant peut passer successivement d'un bec à l'autre; la machine de M. de Meritens (2278) peut ainsi entretenir un grand nombre de foyers sur le même circuit, mais il s'agit toujours de forts foyers, et il faudrait obtenir une plus grande subdivision.

M. Leroux a imaginé de distribuer l'électricité alternativement à plusieurs foyers lumineux, qui la reçoivent par intermittences assez rapprochées pour que l'effet paraisse continu, et il a pu entretenir ainsi jusqu'à 50 becs. M. Jablochhoff, en interposant un condensateur analogue à celui de la bobine de Ruhmkorff, a pu doubler ce nombre par un effet encore inexpliqué. On a, plus tard, réalisé la subdivision par un autre mode de production de la lumière électrique, dit *par incandescence*.

**2357. Lampes à incandescence.** — La méthode par incandescence consiste à utiliser la lumière que dégage un fil de platine, une tige de charbon, rendus incandescents par le passage d'un courant continu ou alternatif. Dès 1845, M. King avait employé ce moyen, qui a été perfectionné depuis par plusieurs inventeurs. Pour empêcher la combustion du charbon, on le renfermait dans une éprouvette privée d'air. La résistance étant relativement faible à chaque foyer lumineux, on pouvait faire passer un même courant par un grand nombre de ces foyers.

M. Jablochhoff rend incandescente une lame de kaolin fixée entre deux pinces de fer, et à travers laquelle il fait passer les courants intermittents d'une bobine de Ruhmkorff (2247) animée par les courants alternatifs d'une machine magnéto-électrique. Il peut ainsi illuminer un grand nombre de lames de kaolin placées dans le même circuit, et leur faire produire à volonté l'effet de 1 à 15 becs de

gaz; mais les résultats ne sont pas encore pratiques, à cause de certaines difficultés qui ne permettent pas un allumage rapide.

**2358. Lampes Reynier, Werdermann...** — M. Reynier a imaginé une disposition dans laquelle un petit *arc voltaïque* vient ajouter son vif éclat à celui que produit l'incandescence et la combustion d'un crayon de charbon. Ce crayon, de 2<sup>mm</sup> de diamètre, s'appuie, par son bout inférieur, sur un bloc cylindrique de charbon, et descend par son poids à mesure qu'il brûle. Le bloc tourne sur lui-même, afin d'enlever la cendre. Le courant entre dans le crayon par un anneau, dans lequel il glisse, de manière à limiter la partie qui rougit. En même temps, la répulsion qui s'exerce entre les parties consécutives d'un même courant (2153) écarte un peu les deux charbons, et l'espace qui les sépare est occupé par un petit *arc voltaïque*.

M. Werdermann a modifié ce système en plaçant le crayon au-dessous du bloc de charbon, qui n'a plus besoin de tourner, et ce crayon est alors soulevé par des poids suspendus à des cordons qui passent sur des poulies. Le bloc, négatif, s'échauffe à peine, et on a pu le remplacer par de la magnésie comprimée, de la chaux et même du cuivre.

Les lampes à incandescence et *arc voltaïque* ont reçu divers perfectionnements. La figure 1648 représente un des modèles combinés par M. Ducretet. Le crayon, *m*, est soulevé par la poussée du mercure contenu dans le tube de fer TT, et s'appuie sur le bloc de charbon II, dont on règle la position au moyen de la tige *s* et de la vis S. Le courant passe dans le crayon *m* par la tige *t* et le couvercle B, entretient le foyer lumineux *c*, et sort par *st'*V. Pour éviter l'échauffement du mercure, le couvercle B est séparé du tube de fer par un espace *i* rempli de matière conduisant mal la chaleur; celle-ci passe du couvercle dans la tige *t*, qui la laisse perdre par rayonnement et par le contact de l'air.

Les lampes à incandescence avec *arc voltaïque* rudimentaire ont été expérimentées avec succès pour l'éclairage public. Elles semblent devoir se prêter avec facilité à la division, tant recherchée, de la lumière électrique. Du reste, le progrès ne s'arrêtera pas là, et, au moment où nous écrivons ces lignes, de nouveaux perfectionnements sont annoncés chaque jour; nous allons encore en

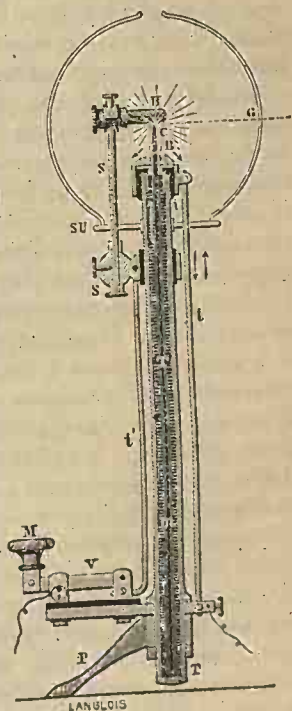


Fig. 1648.

mentionner un tout récent et des plus importants, relatif au moyen de se procurer facilement l'électricité.

**Générateurs Clamond.** — Nous avons signalé la forte dépense qu'entraîne l'emploi d'un moteur spécial quand on n'a qu'une petite étendue à éclairer. Il faudrait donc, pour que l'éclairage électrique pût se répandre dans les petits ateliers et dans les usages domestiques, qu'on eût à sa disposition des moyens de produire économiquement l'électricité sans employer de moteur. M. Clamond vient de résoudre la question au moyen de sa pile thermo-électrique, mais après lui avoir apporté des perfectionnements considérables à la suite d'expériences nombreuses poursuivies pendant neuf années<sup>1</sup>.

Dans les premières piles, que nous avons décrites (1889), pour que le refroidissement par l'air pût maintenir une différence notable de température entre les extrémités des barreaux de zinc et *antimoine*, il fallait que ces barreaux fussent assez longs, ce qui donnait à la pile une trop grande résistance; de plus, la chaleur du foyer n'était utilisée qu'en faible proportion, la plus grande partie étant entraînée par les produits gazeux de la combustion. Ces inconvénients ont été combattus dans le nouvel appareil. On y distingue trois parties principales : 1<sup>o</sup> le *collecteur*, système de carreaux dans lesquels les gaz chauds déposent leur chaleur, et qu'ils ne quittent qu'à une température peu supérieure à la leur; 2<sup>o</sup> le *diffuseur*, formant la partie extérieure de l'appareil, et constitué par un système de lames métalliques présentant à la circulation de l'air ambiant une très-grande surface de refroidissement; 3<sup>o</sup> les couples en forme de prismes très-courts, placés entre le collecteur et le diffuseur, et à travers lesquels passe la chaleur, en maintenant entre les bases de chaque couple une grande différence de température, d'où naît un courant électrique intense.

D'après les expériences de M. Clamond, et celles de M. G. Cabanellas poursuivies pendant deux mois, une pile de 0<sup>m</sup>,80 de côté sur 1<sup>m</sup>,50 de hauteur, présentant une surface de chauffe de 20 mètres carrés, entretient deux lampes Serrin (2349), produisant chacune la lumière de 30 à 50 becs de lampe Carcel, et donnant la même quantité d'électricité que 121 couples de Bunsen, en ne dépensant, en moyenne, que 9<sup>kil</sup> de coke par heure. — Ajoutons que l'appareil fonctionne en même temps comme appareil de chauffage remplaçant un calorifère à grande surface, qu'il peut être alimenté par un combustible quelconque, et qu'il n'exige aucune surveillance spéciale.

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXXVIII (5 mai 1879).

## CHAPITRE VIII

## UNIVERSALITÉ DU MAGNÉTISME

« Les phénomènes qui vont nous occuper... peuvent nous mettre sur la voie de saisir l'ensemble des rapports qui lient les phénomènes magnétiques, et peut-être d'établir une théorie de l'action générale du magnétisme. »

(FARADAY, *Mémoire sur l'état magnétique de toute matière*, trans. phil. 1845.)

## § 1. — MAGNÉTISME ET DIAMAGNÉTISME

## I. Faits généraux. — Diamagnétisme.

**2359. Historique.** — Pendant longtemps on a considéré le magnétisme comme appartenant en propre à un petit nombre de substances, à la tête desquelles est le fer. Mais, depuis qu'Ampère avait attribué les phénomènes du magnétisme à des courants électriques moléculaires, l'esprit avait quelque peine à admettre l'existence de ces courants seulement dans quelques substances privilégiées. Or, nous allons voir que tous les corps obéissent à l'action des aimants; mais ce n'est qu'après la découverte des électro-aimants qu'on a pu disposer de moyens assez puissants pour lever tous les doutes à cet égard. La question de l'universalité du magnétisme avait été soulevée dès le commencement du dix-huitième siècle. Musschenbroeck et l'abbé Nollet avaient constaté qu'une foule de corps en poudre, les cendres des végétaux, de petits fragments de substances organiques, étaient attirables à l'aimant; mais ils attribuèrent ce résultat à des parcelles de fer contenues dans ces corps. Lehmann et Cavallo ont fait beaucoup de recherches sur ce sujet; et Brugmann, en 1778, découvrit un phénomène tout à fait inattendu : la *répulsion* du bismuth par les forts aimants, fait capital qui n'attira pas alors toute l'attention qu'il méritait. Coulomb vit, plus tard, de petites aiguilles de divers métaux, or, argent..., de fines tiges de verre ou de substances végétales ou animales, suspendues sous une cloche, à un fil de cocon, osciller entre les pôles contraires de deux forts aimants<sup>1</sup>. Mais, comme il reconnut qu'il suffit de mêler à de la cire  $\frac{1}{133120}$  de fer en poudre fine pour lui donner la propriété de se diriger entre les mêmes pôles, et que l'analyse la plus

<sup>1</sup> *Journal de physique* de Lametherie, t. LIV (1802), p. 367.

précise ne peut déceler d'aussi faibles quantités de fer, on était en droit de soupçonner la présence de ce métal dans les substances essayées.

Après la découverte de l'électromagnétisme, Becquerel étudia l'action d'un courant énergique sur de petites baguettes de différentes matières<sup>1</sup>, et constata un fait nouveau : tandis qu'un fil de fer horizontal suspendu par un fil de cocon dans un multiplicateur se place transversalement au plan du cadre, des tiges de certaines matières, gomme laque, bois..., se placent, en certaines circonstances, dans le plan même de ce cadre. Un tube de papier, rempli de peroxyde de fer, présente ce résultat d'une manière nette ; et Becquerel a reconnu, au moyen d'un aimant, que les pôles magnétiques sont placés sur deux arêtes opposées du petit cylindre, au lieu d'être rejetés à ses extrémités. Une semblable distribution du magnétisme a été aussi constatée quand le multiplicateur était remplacé par des aimants.

Lebaillif, en 1828, trouva que tous les corps sont influencés par les aimants. Mais le nom de *sidéroscope*, qu'il donnait à son appareil, porte à penser qu'il attribuait, en général, ces résultats à la présence de parcelles de fer. Le sidéroscope se compose d'une paille de 40<sup>cm</sup> de longueur suspendue horizontalement par un fil de cocon, dans une cage de verre ; à l'extrémité de la paille et sur son prolongement, est fixée une aiguille à coudre aimantée à saturation, dont on approche le corps à essayer. Lebaillif a constaté que le bismuth et l'antimoine exercent une *répulsion* sur l'aiguille, confirmant ainsi la remarque importante de Brugmann. Depuis, Saigey a trouvé la même répulsion avec diverses autres substances.

Malgré les faits que nous venons de citer, on n'admettait pas généralement l'action du magnétisme sur tous les corps. Les résultats étaient isolés, peu concordants, et attribués le plus souvent à la présence du fer, lorsque Faraday, en 1845, découvrit l'action qu'exercent la plupart des corps transparents sur la *lumière polarisée*, quand ils subissent l'influence de puissants aimants. Ce phénomène capital le conduisit à penser que les aimants agissent sur les molécules des corps, et il entreprit des recherches suivies sur ce sujet. Une foule de physiciens s'élançèrent avec ardeur dans la voie qui venait d'être ouverte, et il résulte de tous ces travaux que la plupart des corps sont sensibles à l'action du magnétisme. Mais il faut, pour établir ce fait général, se servir d'électro-aimants très-puissants ; car l'action des aimants sur les corps non magnétiques est environ 100,000 fois plus faible que celle qu'ils exercent sur le fer.

**2360. DIAMAGNÉTISME.** — L'appareil dont s'est servi Faraday<sup>2</sup> consiste en un électro-aimant en fer à cheval placé verticalement, sur les branches duquel sont appliquées des *pièces polaires* en fer doux destinées à rapprocher à volonté les centres d'action magnétique. Une aiguille de la substance à essayer est suspendue par un fil sans torsion, dans un étrier de papier, et est préservée

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XXV, p. 269, et t. XXXVI, p. 337.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences), t. II, pp. 42 et 145.



des agitations de l'air, par une cage vitrée. On s'assure d'abord que l'étrier et son fil de suspension ne sont pas influencés par l'électro-aimant. Les premières expériences ont été faites sur le *verre pesant* (silicoborate de plomb); une tige de cette substance, au lieu de se placer suivant la ligne des pôles de l'aimant, ce que Faraday appelle la *direction axiale*, se place perpendiculairement à cette ligne, suivant la *direction équatoriale*. Beaucoup de corps, parmi lesquels se distingue le *bismuth*, présentent le même phénomène. D'autres, au contraire, prennent la direction axiale, comme les corps magnétiques proprement dits. L'appareil (fig. 1541, p. 755) convient très-bien pour répéter ces expériences. Un aimant très-puissant agit comme l'électro-aimant, mais, en général, moins fortement.

Faraday appelle *corps diamagnétiques* ceux qui se dirigent perpendiculairement à la ligne des pôles de l'aimant, et il nomme *paramagnétiques*, ou simplement *magnétiques*, ceux qui, comme le fer, prennent la direction axiale. Les premiers prennent la direction *équatoriale*, parce qu'ils sont repoussés par l'électro-aimant, et également par ses deux pôles, comme on peut le vérifier en en approchant un morceau de bismuth suspendu à un fil : on voit ce corps s'écarter du pôle dès qu'on fait passer le courant dans l'hélice, et s'en rapprocher, par la pesanteur, dès qu'on supprime le courant. — Faraday a encore mis la répulsion en évidence au moyen du spectre magnétique : de la limaille fine de bismuth projetée sur une feuille de papier tendue au-dessus des pôles de l'électro-aimant dessine le contour du fer doux, en laissant tout autour une bande étroite complètement dégarnie. Pouillet, ayant fait l'expérience avec un mélange de poudres de bismuth et de sesquichlorure de chrome qui est magnétique, a vu les poudres se séparer, et l'espace abandonné par le bismuth se remplir de la poudre violette du sesquichlorure.

**2364. Solides magnétiques ou diamagnétiques.** — Il résulte des observations de Faraday qu'il y a beaucoup plus de corps diamagnétiques que de corps magnétiques. Parmi les premiers sont le *bismuth*, le *plomb*, le *zinc*, le *cuivre*, le *crystal de roche*, le *verre*, le *sel marin*, le *plâtre*, le *charbon*, le *soufre*; en général, les substances organiques, la *résine*, le *sucré*, le *bois*, la *chair crue ou cuite*, le *sang*, etc. Les corps *magnétiques* sont principalement des métaux et la plupart de leurs composés salins, soit secs, soit en dissolution. Ainsi, les dissolutions des sels de fer sont magnétiques. Cependant, les *cyanoferrures* secs, jaunes ou rouges, de potassium sont *diamagnétiques*. Il en est de même du sang, de la chair des animaux, quoique renfermant du fer; ce qui montre que l'action des éléments diamagnétiques l'emporte sur celle du fer contenu. Aussi, le corps d'un animal même vivant se place-t-il dans la direction équatoriale; c'est, du moins, ce que l'expérience a prouvé pour le corps d'une grenouille vivante. M. Plucker a reconnu que certaines matières organiques ne sont pas diamagnétiques, comme on le croyait avant lui : ainsi, on peut dire que l'écorce des végétaux est, en général, magnétique, tandis que l'intérieur est diamagnétique. Les élytres des insectes coléoptères sont aussi magnétiques. Faraday n'a

pas rencontré de corps solide ou liquide complètement indifférent à l'action du magnétisme. On peut cependant former des mélanges qui soient dans ce cas, en réunissant en proportions convenables une matière diamagnétique avec une autre paramagnétique. Par exemple, l'eau étant diamagnétique, une dissolution de sulfate de fer peut être étendue de manière à devenir indifférente.

**2362. Circonstances qui modifient les résultats.** — Il y a des précautions à prendre pour n'être pas induit en erreur dans les expériences. La plus petite quantité de fer peut rendre magnétique un corps qui ne l'est pas naturellement. Par exemple, du bois peut paraître magnétique quand il a été taillé avec un couteau. Le papier paraît souvent magnétique, quoique les matières organiques soient diamagnétiques; ce qui tient probablement à des particules de fer mêlées à la pâte pendant la fabrication.

Il faut aussi avoir égard à la forme des extrémités polaires de l'électro-aimant et à la position du petit barreau par rapport à ces extrémités. M. H. C. Ørsted a fait un grand nombre d'expériences à ce sujet<sup>1</sup>. Il a reconnu qu'une aiguille diamagnétique, qui prend la direction équatoriale entre des faces polaires verticales, prend la direction axiale quand elle est suffisamment élevée au-dessus de ces faces, effet d'autant plus marqué que celles-ci sont plus rapprochées. Lorsqu'on suspend l'aiguille au-dessus du bord supérieur d'une seule des faces polaires, l'aiguille diamagnétique prend encore la direction axiale; mais, si on l'approche des autres bords des pièces polaires, elle se place perpendiculairement au bord à l'action duquel on l'expose. Cela a lieu notamment quand les pièces polaires sont forcées suivant l'axe; une aiguille de bismuth prend alors une direction axiale quand elle est suspendue entre les deux ouvertures. Becquerel avait vu, au contraire, le peroxyde de fer, qui est magnétique, se placer dans la direction équatoriale, et l'on avait voulu conclure de là que le diamagnétisme n'existait pas, et que les effets qu'on lui attribuait étaient dus à une distribution transversale du magnétisme, dépendant de la forme du corps attiré et de celle des faces polaires. Mais Faraday a montré que l'équilibre, dans le cas du peroxyde de fer, est instable, et qu'il se forme plusieurs pôles dans différentes directions, à cause de l'état de division de cette matière. Au reste, la poudre de peroxyde de fer est attirée par les pôles des aimants quand on en forme une masse non allongée. Les positions axiales ou équatoriales attestent donc, en général, les attractions ou répulsions; mais une même substance peut passer d'une position à l'autre par diverses causes mal connues, qui dépendent de la longueur et de la position des aiguilles, de la forme du champ magnétique des pièces polaires et de la manière dont les forces attractives ou répulsives y sont distribuées.

C'est à une cause semblable qu'il faut attribuer les résultats trouvés par M. Plucker, qui a vu un petit barreau *diamagnétique* prendre la direction axiale quand il l'élevait suffisamment au-dessus des pôles de l'électro-aimant; et, quand

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXIV, p. 424.

ce barreau était assez peu élevé pour conserver la direction équatoriale, se diriger suivant l'axe si l'on ajoutait un couple de plus aux deux qui excitaient d'abord l'électro-aimant. Ayant observé ces résultats sur des corps composés de matières magnétiques et diamagnétiques mélangées, M. Plucker en avait conclu que la répulsion diminuait plus rapidement que l'attraction, quand on augmentait la distance ou qu'on diminuait l'intensité du courant. Des expériences faites avec un petit barreau formé d'un mélange de bismuth et d'étain rendu magnétique par du fer, lui ont, en effet, donné les mêmes résultats. Mais nous verrons que les lois sont les mêmes pour le diamagnétisme et le paramagnétisme; il faut donc voir aussi, dans ces anomalies, une question de direction de résultante.

**2363. Diamagnétisme et magnétisme des liquides.** — Pour reconnaître si un liquide est magnétique ou diamagnétique, Faraday le renferme dans un petit tube de verre très-mince, qu'il suspend horizontalement entre les pôles de son électro-aimant. Faraday a vu ainsi le tube, qui vide n'était pas influencé sensiblement, prendre la direction équatoriale, avec une foule de liquides, qui, par conséquent, sont *diamagnétiques*. Tels sont l'acide azotique, l'eau, l'alcool, l'éther, l'acide sulfurique, les solutions des sels alcalins et terreux, l'huile d'olive, l'essence de térébenthine, le mercure, etc., etc. Les liquides *paramagnétiques* sont principalement les dissolutions des sels des métaux magnétiques. La solution de cyanoferrure rouge de potassium est *magnétique*, tandis que le sel sec est *diamagnétique* (2361).

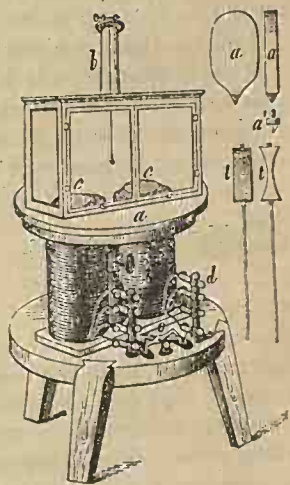


Fig. 1649.

Matteucci dispose entre les pièces polaires de l'électro-aimant une petite caisse de verre contenant une goutte d'huile en suspension dans une dissolution alcoolique de chlorure de fer de même densité; cette goutte s'allonge dans le sens transversal. Si la goutte est formée de la dissolution de chlorure en suspension dans l'huile, elle s'allonge dans le sens de l'axe. Une multitude de gouttelettes d'huile se portent sur la ligne équatoriale, pendant que le liquide ferrugineux s'accumule autour des pôles.

M. Plucker distingue les liquides magnétiques et diamagnétiques par les changements de forme qu'ils éprouvent sous l'influence d'un électro-aimant<sup>1</sup>. L'appareil qu'il a employé consiste en un électro-aimant très-puissant en fer à cheval, *cc* (fig. 1649); des pièces polaires de différentes formes, telles que *a*, *a*, peuvent être appliquées sur ses extrémités. Ces pièces sont munies de cônes de

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXIX, p. 129.

diverses formes,  $a'$ , qui peuvent s'y visser. L'hélice magnétisante est composée de quatre fils aboutissant à deux colonnes séparées, dont une se voit en  $d$ . On peut faire passer le courant soit dans les quatre fils réunis bout à bout, de manière à former un circuit de longueur égale à leur somme, soit dans ces fils réunis en faisceau par leurs extrémités, de manière à former un circuit de section quadruple. Les pôles  $c, c$  sont recouverts d'une caisse vitrée portant un tube de verre à micromètre,  $b$ , auquel est suspendu un fil métallique de torsion. Une balance ordinaire toute en verre, peut être placée dans la caisse, et sert à mesurer la répulsion exercée par les pôles  $c, c$  sur les corps diamagnétiques.

Pour essayer les différents liquides, M. Plucker applique sur son électro-aimant les pièces polaires  $a, a$ , de manière que les parties circulaires soient en regard, et il pose sur les bords arrondis un verre de montre contenant le liquide à éprouver. Quand ce liquide est *magnétique*, on le voit se porter vers les arêtes des pièces polaires, où la force est surtout concentrée, et s'allonger dans la direction axiale en se creusant au milieu, comme on le voit à droite (*fig. 1650*). Le protochlorure de fer présente ce résultat d'une manière remarquable. Quand le liquide est *diamagnétique*, il est repoussé par les arêtes des pièces polaires,



Fig. 1650.

et forme une petite colline transversale, comme on le voit à gauche; seulement, le phénomène est généralement moins prononcé qu'avec les liquides magnétiques. Quand la surface est à peine déformée, on juge de sa courbure par l'image d'un objet éloigné. M. Plucker a constaté,

par ce moyen, le diamagnétisme de l'eau, de l'alcool, du sang..., et même du mercure placé dans une capsule amalgamée. On obtient des résultats variés en plaçant le liquide dans un vase qu'il ne mouille pas, en l'étendant sur une lame de mica, ou enfin en le déposant en grosse goutte sur les pièces polaires mêmes. — Matteucci a vu, de son côté, le liquide placé dans un vase à fond plat se porter vers la ligne des pôles, ou s'en écarter, suivant les cas; et M. Quet a fait nouveau des gouttes liquides engagées dans des tubes capillaires placés entre les pôles d'un électro-aimant.

**2364. Diamagnétisme des flammes.** — Certains gaz sont magnétiques, et d'autres diamagnétiques. Faraday, après divers essais infructueux, fut conduit à revenir sur cette question par la découverte curieuse du P. Bancalari, qui vit les pôles d'un électro-aimant repousser la flamme et la fumée d'une lampe, ainsi que les vapeurs d'eau et d'alcool; résultats confirmés par M. Zantedeschi. Plus tard, M. Plucker a décrit les formes singulières qu'affectent dans divers cas des flammes de différente nature. Pour répéter ces expériences, on termine par des cônes à sommet arrondi les pièces polaires  $a, a$  (*fig. 1649*), ou les extrémités du fer doux de l'électro-aimant  $BB'$  (*fig. 1544*, page 755). La flamme s'élevant entre les deux cônes, dès qu'on lance le courant, on la voit se porter latéralement d'un côté ou de l'autre, en s'aplatissant transversalement à la ligne des pôles,  $A$  (*fig. 1651*). Si cette ligne rencontre l'axe de figure de la flamme,

celle-ci s'aplatit dans la direction équatoriale en s'étendant également des deux côtés, et prenant différentes formes, suivant que la ligne des pôles est plus ou moins rapprochée de son extrémité supérieure. On voit (fig. 1652) les formes que prend la flamme d'une chandelle de suif quand la ligne des pôles se trouve à la hauteur *o, o*; en *e, e* la flamme est représentée étendue dans le sens équatorial, et, en *a, a*, coupée par un plan passant par la ligne des pôles. On voit aussi en E (fig. 1651) la forme que prend la flamme de l'essence de térébenthine ou celle d'une chandelle de suif très-fuligineuse; elle se continue à sa partie supérieure en une fumée épaisse formant deux branches séparées. Matteucci, ayant expérimenté sur les flammes de résine, de soufre, de cire, d'alcool, d'hydrogène, trouva que l'action du magnétisme est la plus prononcée sur la flamme de la résine, et la plus faible sur celle de l'hydrogène; ce qui le conduisit à attribuer l'effet produit, au moins en partie, à l'action exercée sur les particules solides qui entrent dans la composition de la flamme (II, 1295). — Dans le cas de l'arc voltaïque repoussé par les électro-aimants (1951), la flamme est formée

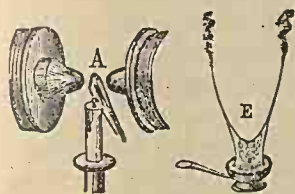


Fig. 1651.

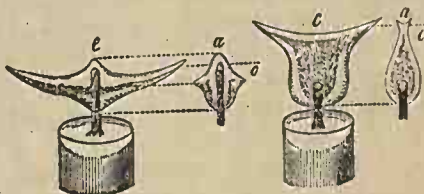


Fig. 1652.

par l'électricité, et le phénomène se rattache à l'action des aimants sur les courants.

**2365. Gaz.** — Faraday a étudié le magnétisme des gaz, par différents procédés<sup>1</sup>. Il a d'abord reconnu que l'air chaud est repoussé par les pôles d'un électro-aimant, en faisant monter ce gaz entre ces pôles, et cherchant, au moyen d'un petit thermomètre, la direction que suit la colonne gazeuse quand l'électro-aimant est inerte, puis quand il est aimanté. M. Plucker a observé la marche de l'air chaud au moyen de l'ombre qu'elle projette. Quand les gaz étaient froids, Faraday les faisait descendre ou monter entre les pôles, suivant qu'ils étaient plus denses ou moins denses que l'air, et observait la direction du courant gazeux pendant l'aimantation, en cherchant à recevoir dans un tube renfermant du papier imbibé d'ammoniaque, le gaz qui avait passé sur du papier imbibé d'acide chlorhydrique. Des fumées blanches apparaissaient dans le tube, quand il se trouvait sur le chemin de la colonne gazeuse. Le même physicien a encore procédé en soufflant au bout d'un tube et avec différents gaz, des bulles de savon qu'il approchait des pôles de l'électro-aimant; ces bulles se portaient vers le pôle magnétique ou s'en éloignaient, suivant les cas. Il a encore rempli de

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 210.

gaz une ampoule de verre très-mince fixée à l'extrémité d'un long levier de bois suspendu horizontalement par un fil sans torsion; l'ampoule était attirée ou repoussée, suivant le gaz qu'elle contenait. L'ampoule, remplie d'air, n'était pas sensiblement influencée.

Faraday a reconnu que, dans l'air, l'oxygène est fortement attiré par les pôles magnétiques, et que tous les autres gaz sont repoussés, surtout l'hydrogène et le gaz d'éclairage. L'oxyde de carbone, le bioxyde d'azote et le gaz nitreux n'ont cependant donné que des résultats douteux.

Les résultats dépendent, comme nous allons le voir, du milieu ambiant; de sorte qu'on ne peut dire si les gaz sont magnétiques ou diamagnétiques, mais seulement que l'oxygène est plus magnétique ou moins diamagnétique que l'air, et les autres gaz moins magnétiques ou plus diamagnétiques que lui. Alors, M. Plucker a opéré, en cherchant les changements de pression d'une masse gazeuse confinée, sous l'influence d'un électro-aimant appelant le gaz près de ses pôles ou l'en éloignant. Ayant disposé entre les parties arrondies des pièces polaires *a, a* (fig. 1649) un thermomètre à air *t, t*, dont le réservoir en laiton se moulait sur le contour de ces pièces, il a vu l'index liquide du tube s'avancer de 2 à 3<sup>mm</sup> vers l'orifice, dès qu'il lançait le courant dans l'électro-aimant, comme si l'air était diamagnétique. Mais l'effet était dû à une répulsion sur les parois flexibles du réservoir; car, Faraday ayant pris pour parois les surfaces mêmes des pièces polaires, il n'y eut jamais de déplacement de l'index. Cependant, les dimensions de l'appareil étaient telles, qu'un accroissement de volume de  $\frac{1}{100000}$  eût été sensible. Du reste, nous allons voir (2368) comment le sens du magnétisme des gaz a été déterminé directement par M. E. Becquerel.

## II. Influence du milieu sur le magnétisme.

**2366. Faits et loi.** — Faraday a constaté un fait très-important : c'est que le milieu dans lequel est plongé un corps, a une grande influence sur les résultats de l'action qu'exerce sur lui le magnétisme. Ainsi, une solution étendue de sulfate de fer, renfermée dans un tube de verre mince, est magnétique; mais, quand le tube est plongé dans une solution plus concentrée du même sulfate, il prend la direction équatoriale. Dans l'eau pure, il reprend la direction axiale. Un tube rempli d'air, plongé dans le mercure, l'eau, l'alcool, paraît *magnétique*, et *diamagnétique* dans une dissolution suffisamment concentrée d'un sel de fer, de cobalt, de manganèse, de cérium. M. Plucker a vu un aréomètre placé au-dessus des pôles d'un fort aimant s'enfoncer dans un liquide diamagnétique, et s'élever dans un liquide magnétique. En général, un solide magnétique paraît diamagnétique dans un liquide plus magnétique que lui, et un corps diamagnétique semble magnétique dans un milieu plus diamagnétique. Faraday a constaté aussi cette influence du milieu, dans le cas des gaz : il remplissait d'un certain gaz une boîte placée entre les pièces polaires de son électro-aimant, et faisait,

au milieu de ce gaz, avec les tubes contenant du papier imbibé d'ammoniaque, les expériences ci-dessus (2365). Il a reconnu ainsi que l'azote, qui est légèrement repoussé dans l'air, est attiré dans le gaz d'éclairage et dans l'hydrogène; le bioxyde d'azote, à peu près indifférent dans l'air, est attiré dans l'acide carbonique. L'air est plus fortement attiré dans ce dernier acide et dans l'hydrogène que dans le gaz d'éclairage.

M. Plucker et M. E. Becquerel, chacun de leur côté, ont déduit de leurs expériences la loi suivante, dont l'analogie avec le principe d'Archimède (I, 197) est facile à saisir : *l'action attractive ou répulsive exercée par un aimant sur un corps plongé est égale à l'effet qu'éprouverait le corps dans le vide, diminué de l'effet produit sur le volume de fluide déplacé par ce corps.*

M. Plucker explique, au moyen de ce principe, l'influence qu'exerce le milieu ambiant sur les effets du magnétisme sur un même corps. M. E. Becquerel va beaucoup plus loin, et part de là pour établir une théorie très-ingénieuse du diamagnétisme, sur laquelle nous reviendrons (2372).

**2367. Expériences de M. E. Becquerel.** — Pour établir par l'expérience le principe ci-dessus, et mesurer avec précision les actions exercées sur des volumes égaux du fluide et du corps qui y est plongé, M. E. Becquerel a combiné l'appareil suivant<sup>1</sup>, AC, AC (fig. 1653) sont les extrémités d'un énorme électro-aimant, dont le noyau a 1 mètre de longueur et 0<sup>m</sup>,11 de diamètre. Deux fils de cuivre de 2<sup>mm</sup> de diamètre et de 910<sup>m</sup> de longueur sont enroulés sur les deux branches; en les réunissant bout à bout, on forme un circuit de 1820<sup>m</sup>. Les bases du cylindre de fer, bien dressées et horizontales, supportent

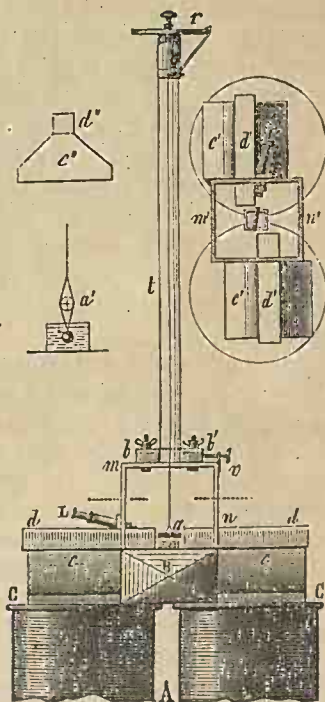


Fig. 1653.

un socle en bois B, sur lequel repose une balance de torsion *mm*. Le tube *t* est encasté dans un anneau de bois *bb'*, que l'on peut déplacer dans deux directions perpendiculaires, au moyen de deux vis, dont une est en *v*. On peut ainsi bien centrer le fil de torsion; après quoi l'on fixe l'anneau au moyen d'écrous à oreilles. Des pièces polaires *c, c*, dont la coupe se voit en *c''*, sont appliquées

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXIV, p. 377.

sur les pôles de l'électro-aimant, et reçoivent des barreaux de fer doux  $d$ ,  $d'$ ,  $d''$ , qui sont continués en dedans de la cage  $mn$ , par deux autres petits barreaux, dont les extrémités intérieures forment en réalité les faces polaires actives. Les deux systèmes  $Cd$ ,  $Cd'$  ne sont pas sur le prolongement l'un de l'autre, mais disposés comme on le voit en  $c'd'$ ,  $c'd''$ , de manière à permettre de viser avec un microscope  $L$  l'extrémité d'un petit barreau  $a$ , suspendu au fil de torsion et attaché, sans étrier, au moyen d'un fil d'argent disposé comme on le voit en  $a$  et  $a'$ . Une balle de plomb, suspendue par le même moyen, plonge dans de l'eau, afin d'amortir les oscillations du fil de torsion. Sur les bases du barreau  $a$ ,  $a'$  sont tracés deux diamètres à angle droit, dont on fait coïncider le point de croisement avec le fil vertical du réticule du microscope  $L$ , ce qui s'obtient en faisant tourner convenablement le cercle divisé  $r$ . Le microscope est fixe, et placé de manière que le petit barreau  $a$  fasse un angle de  $20^\circ$  avec un plan parallèle aux pièces  $d$ ,  $d'$ , quand la coïncidence a lieu.

Pour faire une expérience, après avoir établi la coïncidence, on fait passer le courant dans l'électro-aimant, le barreau  $a$  est dévié, et on le ramène à sa première position au moyen du micromètre  $r$ . L'angle de torsion mesure la force exercée, et, d'après le sens dans lequel on a tourné, on reconnaît si le petit barreau  $a$  est magnétique ou diamagnétique. On fait ensuite une seconde observation sur l'autre extrémité du barreau, en tournant le cercle  $r$  de  $180^\circ$ , et l'on prend la moyenne.

Pour expérimenter dans les liquides, on remplace le vase dans lequel plonge la balle de plomb par un autre à bords plus élevés rempli du liquide dans lequel on veut opérer, et l'on y plonge le petit barreau.

Quand on compare les effets produits sur une même substance dans des circonstances différentes, il se présente une cause d'erreur. Comme l'électro-aimant doit être très-puissant, on emploie 30 à 40 couples à charbon donnant un courant dont l'intensité, mesurée par une boussole des sinus, n'est qu'à peu près constante. Mais M. E. Becquerel a d'abord constaté, comme nous le verrons, que la force de torsion nécessaire pour maintenir un même barreau dans sa position normale est sensiblement proportionnelle au carré du sinus qui mesure l'intensité du courant. Il résulte de cette loi qu'en divisant les angles de torsion obtenus, par les carrés des sinus observés, on ramène tous les résultats à l'unité d'intensité de courant. C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres du tableau suivant. Le signe (+) indique qu'il y a attraction, et le signe (—), répulsion.

Milieux dans lesquels sont plongés les barreaux.	Actions exercées sur un barreau de soufre.	
Air. ....	— 0,9038	— 0,3485
Eau. ....	— 0,1004	+ 0,2647
Solution de chlorure de magnésium concentrée. . .	+ 0,0649	+ 0,3816
— de sulfate de nickel. ....	— 2,6060	— 1,6733
— de protochlorure de fer concentrée. . . . .	— 53,7860	»



On voit combien est grande l'influence du milieu sur l'intensité, et même sur le sens de l'effet produit. Par exemple, dans la solution de *protochlorure de fer*, la répulsion sur le soufre est 60 fois plus grande que dans l'air.

Les nombres du tableau représentent, d'après le principe ci-dessus (2366), les différences entre le magnétisme, à volume égal, du barreau et du milieu environnant. En appelant  $V_s$ ,  $V_a$ ,  $V_e$  les effets produits sur des volumes égaux de *soufre*, d'*air* et d'*eau*, on aura donc

$$V_s - V_a = -0,9038, V_s - V_e = -0,1004; \text{ d'où } V_e - V_a = -0,8034;$$

pour représenter l'action exercée sur l'eau dans l'air. On trouve de même les actions exercées sur les autres liquides du tableau, telles qu'elles sont dans l'air. En prenant pour terme de comparaison l'action, représentée par  $-10$ , exercée sur un certain volume d'eau dans l'air, M. E. Becquerel trouve, en parlant des expériences faites avec les barreaux de soufre et de cire :

	Eau.	chlorure de magnésium.	sulfate de nickel.	protoch. de fer.
Avec le soufre..	- 10	- 12,06	+ 21,19	+ 658,2
Avec la cire...	- 10	- 11,91	+ 21,60	"

Les nombres qui correspondent aux mêmes liquides étant sensiblement les mêmes, M. E. Becquerel en conclut que la loi d'où il est parti pour les calculer est exacte. D'autres expériences, faites avec des barreaux de verre et de soufre plongés dans l'eau, l'alcool rectifié, dans des dissolutions de chlorure de sodium ou de calcium, de protosulfate de fer, l'ont conduit à la même conclusion.

**2368. Magnétisme absolu de certains gaz.** — M. E. Becquerel a pu constater, par la même méthode, que l'*oxygène* est *paramagnétique*; ce que l'on n'avait pas pu encore décider. Pour opérer dans différents gaz ou dans le vide, il dispose l'appareil comme on le voit (*fig. 1654*). Le socle en bois B porte une cavité dans laquelle s'adapte une éprouvette de verre, fermée à sa partie supérieure par une virole de cuivre munie d'un robinet *r*, par lequel on peut faire le vide et introduire les gaz. La balle de plomb suspendue en *a* plonge dans une dissolution saturée de chlorure de calcium, qui ne donne pas d'humidité. Le fil de torsion est fixé à un petit treuil porté par un bouchon conique de cuivre s'adaptant exactement, et le trou par lequel passe ce fil est fermé avec de la cire, après qu'on a réglé la hauteur du barreau *a*.

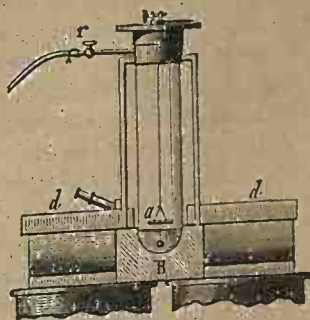


Fig. 1654.

Les premières expériences ont été faites sur l'air. Un petit tube de verre très-mince et fermé, suspendu à un fil d'argent de 0<sup>mm</sup>,015 de diamètre, était attiré; et l'attraction était mesurée par un angle de torsion de 6°,35. Le vide ayant été fait dans l'éprouvette, le tube fut plus fortement attiré, et, pour le ramener à sa position primitive, il fallut augmenter la torsion de 1°,15. Avec l'oxygène, l'effet fut 5 fois plus grand qu'avec l'air. L'oxygène et l'air sont donc *paramagnétiques*. L'hydrogène, l'acide carbonique, ne donnèrent pas d'effet appréciable. Il en fut de même de l'azote; d'où il faut conclure que l'air doit ses propriétés magnétiques à la présence de l'oxygène.

M. E. Becquerel a encore opéré par un moyen qui lui a permis de rendre ces résultats plus certains en les amplifiant, et d'obtenir des effets avec d'autres gaz que l'oxygène et l'air. Ce moyen consiste à condenser les gaz par absorption dans les pores d'un cylindre de charbon (I, 461). Un cylindre de charbon de chêne, de 35<sup>mm</sup> de longueur et 10<sup>mm</sup> de diamètre, fut recuit au rouge dans du sable, puis suspendu en *a* dans l'éprouvette (*fig.* 1654). Il éprouva *dans le vide* une répulsion mesurée par un angle de torsion de — 3°,85. L'éprouvette ayant été remplie d'*oxygène sec*, il y eut une attraction mesurée par un angle de + 18°,55. Or, le charbon avait absorbé environ 9,25 fois son volume de gaz. C'est donc en vertu d'un volume absorbé égal à 9,25 — 1 = 8,25 que le charbon était attiré, le volume d'oxygène ambiant déplacé produisant une répulsion égale à 1. Avec l'*air*, l'attraction correspondait à + 1°,2 de torsion. Avec l'*acide carbonique* et le *protoxyde d'azote*, la force répulsive du charbon fut un peu augmentée, mais trop peu pour ne pas laisser quelques doutes. L'*hydrogène* et l'*azote* n'ont donné aucun résultat appréciable. Il est vrai que le charbon ne condense pas tout à fait 2 volumes du premier, mais il condense jusqu'à 7,20 d'azote. M. E. Becquerel a, plus tard, vérifié ces résultats, au moyen de la balance, par un procédé semblable à celui que nous allons décrire.

M. Plucker a fait de nombreuses expériences sur le magnétisme des gaz<sup>1</sup>, au moyen de sa balance en verre (2363), à laquelle il suspendait un ballon à robinet, en verre très-mince et rempli du gaz à étudier. Les pièces polaires étaient échanerées de manière à s'appliquer sur le contour du ballon. Après avoir établi l'équilibre pendant le passage du courant dans l'électro-aimant, on cherchait les poids nécessaires pour le rétablir après la suppression du courant. L'action sur le verre de la sphère vide avait été préalablement évaluée.

M. Plucker a trouvé par ce moyen que l'*hydrogène* est légèrement repoussé. Le *bioxyde d'azote* est fortement magnétique, et à peu près comme si l'oxygène y était simplement mélangé. L'*acide azoteux*, obtenu en mélangeant un volume d'oxygène avec 4 de bioxyde d'azote, est moins magnétique que ce dernier gaz. L'*acide hypo-azotique* est à peu près insensible au magnétisme; l'introduction d'une certaine quantité d'oxygène dans la sphère remplie de bioxyde d'azote diminue donc l'attraction. L'acide hypo-azotique liquéfié par le froid est repoussé;

<sup>1</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 342.

il en est de même de l'acide azoteux liquéfié, tandis qu'il est magnétique à l'état gazeux. De plus, le gaz obtenu par l'évaporation du liquide est moins magnétique que celui qui a été préparé directement. M. Plucker en conclut que l'acide azoteux liquéfié et le gaz qu'il donne en s'évaporant, ne sont pas identiques avec les gaz préparés directement. Ces résultats singuliers ne sont pas les seuls qu'ait observés M. Plucker : ayant rempli le ballon d'oxygène, et placé dans le plateau opposé de la balance le dixième des poids nécessaires pour séparer ce ballon des pièces polaires, il le vit s'éloigner quand il supprima le courant. Ayant rétabli celui-ci, mais en sens inverse, il vit que la sphère était sensiblement repoussée avant de subir l'attraction ; il semblerait donc que l'oxygène se comporte comme un corps doué de *force coercitive*.

**2369. Relation entre les actions diamagnétiques et l'intensité du courant.** — Il résulte des expériences de MM. E. Becquerel, Tyndall, Plucker, Reich, que les actions diamagnétiques varient sensiblement en raison du carré de l'intensité du courant. M. E. Becquerel a établi cette loi au moyen de l'appareil (fig. 1653). Une boussole des sinus placée dans une chambre séparée donnait l'intensité du courant, qui a été fourni successivement par 20, 17, 14, 10 couples à charbon ; ce n'est donc qu'entre les limites d'intensité correspondantes que la loi a été vérifiée ; et, en effet, la théorie des électro-aimants indique qu'elle ne peut être vraie que lorsqu'ils sont loin du maximum d'aimantation. Voici comment M. E. Becquerel rend compte de la loi, en partant de la polarité développée dans les corps par l'électro-aimant : un aimant d'une intensité  $I$  développe dans une molécule placée à une distance  $l$  une force  $(\pm ml)$ ,  $m$  étant une constante ; d'où résulte un effet d'intensité  $(\pm ml) \times I$ , ou  $\pm ml^2$ . Or, l'intensité magnétique  $I$  d'un électro-aimant est proportionnelle à l'intensité du courant, tant qu'on reste assez éloigné du point de saturation (2132). Donc, dans ces limites, les actions magnétiques ou diamagnétiques sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

### III. De la polarité diamagnétique.

**2370. Historique.** — Les corps magnétiques soumis à l'action d'un aimant reçoivent, avant d'être attirés, une polarité en vertu de laquelle les éléments magnétiques sont tous orientés, ou les courants d'Ampère tous dirigés dans le même sens que ceux de l'aimant ; d'où il résulte des centres d'action. Il semble naturel d'admettre qu'il en est ainsi dans les corps diamagnétiques, et que la répulsion est précédée d'une polarité sans laquelle elle ne s'exercerait pas. Cependant, les actions répulsives sont si faibles, que la polarité diamagnétique a été contestée par plusieurs physiciens, tandis que d'autres l'ont admise, et ont constaté en même temps que les pôles formés dans les corps diamagnétiques sont de même nom que les pôles des aimants qui les repoussent. Il faudrait donc, dans ce cas, que les courants d'Ampère fussent parallèles à ceux de l'aimant, mais dirigés en sens contraire.

M. Reich a, le premier, établi la polarité diamagnétique<sup>1</sup> : il suspendit une balle de bismuth au levier de la balance de Cavendish modifiée (I, 162), et, après avoir vérifié qu'elle était repoussée par l'un ou l'autre pôle d'un aimant en fer à cheval, il reconnut que, si l'on dispose ces pôles de manière qu'ils se trouvent à la même distance de la balle, il n'y a plus de répulsion, malgré l'extrême mobilité de l'appareil. Les actions répulsives des deux pôles ne s'ajoutent donc pas ; l'effet est dû à leur différence, comme dans les attractions sur le fer, et le premier effet des aimants sur le bismuth est d'y développer par influence une polarité précédant la répulsion.

Pour confirmer l'existence de la polarité diamagnétique, Poggendorff approcha de l'extrémité d'un barreau de bismuth placé en travers entre les pièces polaires, un des pôles d'une petite aiguille aimantée située à une égale distance des branches de l'électro-aimant, de manière qu'elle n'en subit pas l'influence, et il vit que le pôle de cette aiguille était repoussé par l'extrémité du barreau qui l'aurait attiré, si, au lieu d'être en bismuth, il eût été en fer.

M. Weber plaçait un barreau de bismuth dans une hélice parcourue par un courant, et observait que les effets produits par ses extrémités sur les pôles d'une aiguille aimantée, étaient inverses des effets qu'aurait produits un barreau de fer. Pour amplifier les résultats, on renversait le barreau de bismuth à la fin de chaque oscillation de l'aiguille. Mais, dans ces mouvements, il se produit des courants d'induction dans le barreau, comme Faraday l'a constaté dans une belle série d'expériences<sup>2</sup>, qui lui ont montré que les effets n'augmentent pas avec le pouvoir diamagnétique des barreaux, mais avec leur conductibilité, ainsi que de La Rive l'avait déjà reconnu. De plus, ces effets disparaissent quand on remplace le barreau par un faisceau de fils de même métal, ou, comme l'a fait M. Von Feilitz, par des bâtons diamagnétiques de cire ou de verre pesant.

M. Plucker et M. H. C. Ørsted ont cherché à prouver la polarité, en faisant agir sur les corps diamagnétiques placés entre les pôles d'un électro-aimant des lames de fer doux qui en subissaient l'influence ; mais Faraday a remarqué que cette méthode ne peut donner de résultats concluants, la distribution des forces dans le champ magnétique de l'électro-aimant étant modifiée par l'approche du fer. — Matteucci a cherché à modifier les oscillations d'une petite aiguille de bismuth oscillant entre les pôles d'un aimant, en en approchant des masses du même métal. N'ayant pas obtenu de résultat, il suspendit un système de courants astatiques au milieu d'un carré aux quatre angles duquel étaient placées des hélices verticales égales, de manière qu'il n'y ait aucune déviation quand on faisait passer des décharges dans les hélices. Si l'on introduisait dans l'intérieur des deux hélices opposées, des cylindres de cire mélangée de quantités, même très-petites, d'oxyde de fer, la décharge produisait une déviation ; mais, si l'on remplaçait ces cylindres par des barreaux de bismuth, il n'y avait plus d'effet.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série t. XXXVI, p. 127.

<sup>2</sup> *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XVI, p. 89.

**2371. Expériences de M. Tyndall.** — C'est à M. Tyndall qu'il était réservé de lever tous les doutes sur l'existence de la polarité diamagnétique<sup>1</sup>. La figure 1655 représente l'appareil, nommé *diamagnétomètre*, qu'il a fait construire sur les indications de M. Weber. Deux hélices égales et verticales *hh*, *h'h'*, de 2<sup>cm</sup> de diamètre intérieur, enroulées sur des tubes de cuivre qui les dépassent en *t*, *t'*, reçoivent, en sens contraire, un même courant. Elles sont fixées à une forte planche appliquée contre un mur, et, dans leur intérieur, sont suspendus deux petits barreaux diamagnétiques *l*, *l'*, attachés à un cordon sans fin qui passe sur deux poulies, *P*, *P'*. Un système astatique d'aimants horizontaux *sn*, que l'on voit en projection en *NS*, *N'S'*, est suspendu à la hauteur du milieu des hélices, *H*, *H'*, par des fils de soie fixés à un cercle de torsion *r*. Ce cercle peut tourner indépendamment de la vis *v*, qui prend son écrou dans une traverse de cuivre fixée aux extrémités des tubes de cuivre *t*, *t'*. Les deux aimants *sn*, *NS*, *N'S'*, sont renfermés dans une boîte de cuivre *aa'*, destinée à amortir leurs oscillations; ils sont réunis par une tige de laiton, sur laquelle on peut les rapprocher plus ou moins. Leurs déviations s'observent par la méthode de réflexion d'un pinceau lumineux sur un miroir *m*, *M* (2322). Tout l'appareil est renfermé dans une cage dont la paroi antérieure s'enlève à volonté.

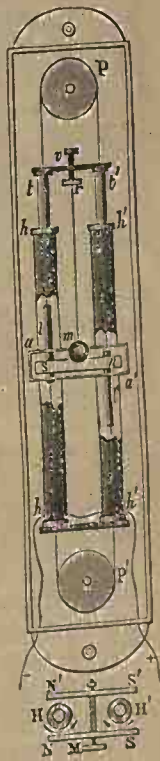


Fig. 1655.

Si nous supposons que les barreaux diamagnétiques éprouvent la polarité pendant le passage du courant dans les hélices, le système des aimants ne sera pas dévié tant que les milieux de ces barreaux seront à la hauteur des aimants; les actions exercées sur chacun de ces derniers s'entre-détruisent. Cet équilibre n'a jamais lieu exactement, à cause du défaut d'identité des hélices et des aimants; mais on peut toujours l'établir au moyen d'un circuit auxiliaire placé à quelque distance. Si ensuite, en faisant tourner la poulie *P*, on amène les barreaux à avoir, l'un, *l'*, son extrémité supérieure, l'autre, *l*, son extrémité inférieure dans le plan des aimants, comme dans la figure, ces extrémités ayant une polarité contraire, agiront concurremment, pour dévier le système des aimants. Si l'on abaisse à son tour le barreau *l*, et si l'on élève *l'*, la déviation aura lieu en sens contraire. L'appareil étant tellement sensible, que les plus faibles agitations de l'air déplacent les aimants, on met de la ouate ou du papier dans la boîte de cuivre *aa'*, partout où ces corps ne peuvent gêner les mouvements.

M. Tyndall a fait un grand nombre d'expériences avec cet appareil, et

<sup>1</sup> *Bibl. univ. de Genève (Arch. des sc.)*, t. XXXII, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3<sup>e</sup> série, t. XLIX.

a obtenu des déviations de 25 divisions de son échelle, et qui changeaient de sens quand il renversait le courant dans les hélices. Ces résultats, constatés à diverses reprises, ne peuvent être attribués à des courants d'induction développés dans le bismuth; car : 1<sup>o</sup> les déviations persistent pendant l'état de repos des barreaux; 2<sup>o</sup> elles se produisent avec le bismuth pulvérisé, quoique l'oxydation superficielle des parcelles en rende la masse assez peu conductrice pour qu'elle intercepte le courant d'une pile; 3<sup>o</sup> ces déviations sont à peine sensibles avec le cuivre, qui, cependant, conduit 40 fois mieux que le bismuth; 4<sup>o</sup> enfin, elles se manifestent, quoique faiblement, avec des substances non conductrices : verre pesant, spath d'Islande, marbre, phosphore, soufre, eau, sulfure de carbone... Les liquides sont renfermés dans des tubes en verre mince. Des substances magnétiques, limaille, oxyde de fer, sulfate, carbonate et chlorure de fer, arloises, dissolutions de sels de fer, nickel, cobalt..., ayant été substituées aux barreaux diamagnétiques, le système des aimants éprouva des déviations en sens contraire de celles que produisaient, dans les mêmes circonstances, les corps diamagnétiques.

On voit donc que la polarité diamagnétique est aujourd'hui bien prouvée. M. Ritchie l'a encore confirmée, en montrant que les aimants *su* (fig. 1655) ne sont pas déviés par les barreaux de bismuth, dès qu'ils sont quelque peu éloignés des extrémités de ces barreaux. Il a reconnu, en outre, que le diamagnétisme des barreaux de bismuth est proportionnel à l'intensité du courant qui circule dans les hélices.

**2372. DE L'EXPLICATION DU DIAMAGNÉTISME.** — Faraday et la plupart des physiiciens regardaient le diamagnétisme comme une propriété spéciale distincte du magnétisme. On avait été tenté d'abord de considérer la direction équatoriale comme provenant d'une distribution particulière du magnétisme ordinaire dans les barreaux. Mais nous avons vu que des masses sont directement repoussées par les pôles d'un aimant. M. E. Becquerel, à la suite de ses belles recherches (2367), a proposé la théorie suivante.

**Théorie de M. E. Becquerel.** — M. E. Becquerel, repoussant l'existence du diamagnétisme comme phénomène particulier, suppose que tous les corps sont plus ou moins attirés par les aimants; s'il y a répulsion dans certains cas, c'est que les corps repoussés sont moins magnétiques que le milieu dans lequel ils sont plongés (2366); de même que les corps pesants s'éloignent de la surface de la terre, quand ils pèsent moins, à égal volume, que le milieu environnant. Voici comment M. E. Becquerel applique ce principe à sa théorie : considérons un centre magnétique C plongé dans un milieu attirable à l'aimant. Il s'établira dans ce milieu un certain état d'équilibre, dans lequel il y aura un accroissement de pression dans les parties les plus rapprochées du centre C. Si nous séparons, par la pensée, une masse limitée  $m$  du fluide, elle sera attirée vers C avec une certaine force  $f$ , et comme cette masse reste en équilibre, il faut qu'elle soit soumise à une force, —  $f$ , égale et opposée. Si maintenant on remplace la masse  $m$  par une masse M d'une autre substance de même forme et de même

volume, qui soit sollicitée par le centre C avec une force F, la force  $-f$  agissant sur cette masse M, comme elle agissait sur la masse  $m$  du fluide, l'effet observé sera dû à la différence  $F - f$ ; et, suivant que cette différence sera positive ou négative, la masse  $m$  sera *paramagnétique* ou *diamagnétique*. — Une objection se présente immédiatement : c'est qu'il existe beaucoup de corps qui sont diamagnétiques dans le vide. M. E. Becquerel a cherché à lever la difficulté en admettant que l'éther qui remplit le vide, est magnétique et plus magnétique que les substances qui sont repoussées dans le vide. Il faudrait donc supposer que l'éther produit des pressions sur les corps, à la manière des fluides pondérables, ce qu'il semble bien difficile d'admettre. D'un autre côté, la polarité diamagnétique étant de nature contraire à celle qui se produit dans les corps magnétiques, il semble qu'il y a une opposition tranchée entre les deux ordres de phénomènes.

M. Weber a proposé une autre théorie, reprise et complétée par de La Rive, qui l'a présentée de la manière suivante<sup>1</sup>. Supposons d'abord que chaque atome des corps possède une polarité naturelle en vertu de laquelle l'électricité négative tend à s'accumuler en un certain point  $a$  de cet atome  $m$  (fig. 1656), et de l'électricité positive, au point opposé  $b$ . Si l'atome est seul et bon conducteur, ces électricités se recombinaient par sa surface, en formant des courants de sens contraire à ceux qui se forment, par une cause quelconque, dans son intérieur, pour y rétablir continuellement la tension polaire, et les actions que ces courants tendraient à produire à l'extérieur s'entre-détruisent. Si maintenant on suppose que l'atome  $m$  fait partie d'un groupe moléculaire, tous les atomes du groupe agiront les uns sur les autres, de manière que les pôles contraires soient en regard, comme on le voit dans



Fig. 1656.

la figure; les électricités, au lieu de se recombinaient par la surface de chaque atome, formeront des décharges entre les atomes voisins, et par conséquent un courant dirigé dans le sens des flèches extérieures. Les courants semblables qui existent dans tous les groupes moléculaires ne sont autre chose que les courants d'Ampère (2178); ils ont des directions très-diverses, et l'aimantation les amène au parallélisme. Ces courants ne peuvent se propager à travers les atomes du groupe, qu'autant que ces atomes sont suffisamment rapprochés. Or, nous allons voir (2381) que les corps les plus magnétiques sont, en général, ceux dont les atomes sont le plus rapprochés, ou ceux qui en renferment le plus grand nombre dans l'unité de volume. Cependant, le zinc et le cuivre, dont les atomes sont très-rapprochés, sont un peu diamagnétiques; ce que de La Rive explique, en observant que ces métaux étant très-bons conducteurs, la recombinaison des fluides doit se faire par la surface de chaque atome, malgré leur

<sup>1</sup> Traité d'électricité théorique et appliquée (1854), t. I, p. 569.

faible distance; et, à l'appui de cette explication, il fait remarquer que le cuivre combiné avec le chlore ou l'oxygène, qui diminuent sa conductibilité, devient magnétique. L'oxygène est le seul gaz magnétique; d'où de La Rive conclut que ses atomes sont arrangés en groupes très-serrés.

Les corps *diamagnétiques* sont ceux dont les atomes très-écartés ne peuvent agir les uns sur les autres, et présentent l'état indiqué dans l'atome isolé *m* (fig. 1656). Mais si l'on approche de ces atomes polarisés et indépendants les uns des autres, un courant, ou le système de courants d'Ampère constituant un aimant, ces atomes sont orientés, comme cela a lieu dans l'induction (2195), de manière que les pôles contraires étant en regard, ces atomes se placent, dans le groupe moléculaire qu'ils forment, dans le même ordre que ceux de la figure 1656; mais leur arrangement est tel que les pôles en présence dans les atomes du courant et dans ceux qui en subissent l'influence, sont *partout de signe contraire*. Si maintenant l'action exercée est assez énergique, la polarité des atomes du groupe moléculaire est augmentée par leur influence mutuelle, et des décharges ont lieu qui déterminent un courant de sens opposé à celui de l'aimant. Il y aura donc répulsion. On voit que la différence entre les corps *magnétiques* et les corps *diamagnétiques* consiste surtout en ce que, dans les premiers, les courants d'Ampère préexistent autour des groupes moléculaires; tandis qu'ils ne prennent naissance dans les autres que sous l'influence de courants énergiques capables de diriger les atomes.

Cette théorie est confirmée par ce résultat étudié plus loin (2383), que la chaleur, qui écarte les atomes des corps, diminue leur magnétisme, et peut même le faire disparaître ou le transformer en diamagnétisme. De plus, Matteucci a constaté que la pulvérisation, qui diminue la conductibilité des bons conducteurs, augmente leur diamagnétisme, tandis qu'elle ne change rien à celui des mauvais conducteurs comme le soufre. Enfin, nous verrons les phénomènes diamagnétiques produits par les corps cristallisés venir encore à l'appui de cette théorie. Cependant, il y a quelques anomalies; ainsi, la chaleur diminue le diamagnétisme du bismuth et augmente le magnétisme du fer jusqu'à une certaine température; le *potassium* et le *sodium*, dont les atomes sont plus écartés que ceux du bismuth sont, d'après M. Lamy, un peu *magnétiques*, et leur conductibilité est intermédiaire entre celle du fer et du cuivre<sup>1</sup>.

## § 2. — MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE

### I. Cas des corps à magnétisme intense.

**2373. Définitions.** — L'action exercée par un aimant sur un corps magnétique ou diamagnétique dépend de la force de l'aimant et de la *polarité* moléculaire.

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LI, p. 305.



laire que peut acquérir le corps. On a cherché les rapports entre les intensités des actions exercées à la même distance par un même aimant sur divers corps de même volume et de même forme. M. E. Becquerel a nommé *magnétisme spécifique* cette action exercée sur l'unité de volume du corps à l'unité de distance, action comparée à celle que reçoit une certaine substance prise pour terme de comparaison. On peut aussi comparer les effets produits sur une petite aiguille aimantée, par un cube égal à l'unité de volume, placé à l'unité de distance de cette aiguille. Les substances étudiées ne doivent jamais conserver d'aimantation permanente. Avant la découverte de l'universalité du magnétisme, on avait comparé ce que l'on appelait la *puissance magnétique* des corps magnétiques proprement dits, dont nous allons d'abord nous occuper.

**2374. Magnétisme spécifique du fer, etc.** — Dès 1822, Barlow avait comparé les pouvoirs magnétiques du fer et de quelques-uns de ses composés, par leurs effets sur une aiguille aimantée, et il avait trouvé qu'en représentant par 100 l'action exercée par le fer doux, celle de différentes espèces d'acier était comprise entre 74 et 66 avant la trempe, et entre 53 et 49 après la trempe; le fer fondu a donné le nombre 34<sup>1</sup>.

M. E. Becquerel a fait un travail étendu sur le même sujet<sup>2</sup>. Il procédait en faisant osciller un petit barreau de la substance à essayer, entre les pôles contraires de deux aimants. Le barreau, toujours de même forme et de même volume, était suspendu par un fil de cocon, sous une cloche de verre. La masse ayant de l'influence sur la durée de l'oscillation, M. E. Becquerel a fait usage de la formule suivante, dans laquelle  $t$  est cette durée,  $f$  la force développée,  $l$  la demi-longueur du barreau,  $P$  sa masse et  $g$  la pesanteur.

$$[1] \quad t = \pi l \sqrt{\frac{P}{3gf}}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\pi^2 P^2}{3g t^2}.$$

**2375. Action sur une file de molécules.** — Quand on veut, avec cette formule, calculer  $f$  pour des masses différentes d'une même substance, il ne suffit pas de changer la valeur de  $P$ ; car l'action magnétique exercée sur chaque molécule dépend de la forme du corps. Des expériences faites avec des faisceaux de fils de fer doux de même longueur, ont conduit à la loi suivante : *les cubes des temps des oscillations sont proportionnels aux poids de ces faisceaux, ou aux carrés des diamètres de barreaux cylindriques de même longueur et de même section que les faisceaux.* En introduisant cette loi dans la formule précédente, on obtient l'action sur une file élémentaire de molécules, et l'on trouve que cette action diminue quand le diamètre du barreau augmente, et qu'elle est à peu près en raison inverse de la puissance  $\frac{2}{3}$  du poids du barreau. En effet, si  $P$  et  $P'$  sont les poids de deux barreaux de même substance et de même longueur,

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 2<sup>e</sup> série, t. XX, p. 108.

<sup>2</sup> *Comptes rendus de l'Acad. des sc. de Paris*, t. XX, p. 1708, et *Tr. d'élec.*, t. III, p. 39.

$t, t'$  les temps des oscillations, on a  $P : P' = t^3 : t'^3$ , d'où  $P^{\frac{2}{3}} : P'^{\frac{2}{3}} = t^2 : t'^2$ ; mais la formule [1] donne le rapport des forces correspondantes  $f : f' = P t'^2 : P' t^2$ . En appelant  $n, n'$  les nombres de files de molécules dans les deux barreaux,  $p$  le poids d'une de ces files, on aura  $P = np, P' = n'p$ , et  $f : f' = n t'^2 : n' t^2$ ; d'où  $\frac{f}{n} : \frac{f'}{n'} = t'^2 : t^2 = P'^{\frac{2}{3}} : P^{\frac{2}{3}}$ ; et,  $\frac{f}{n}$  et  $\frac{f'}{n'}$  représentent les intensités moyennes des actions exercées sur une file de molécules dans chaque barreau.

La diminution d'effet sur chaque file, à mesure que leur nombre augmente, s'explique par leur influence mutuelle, comme dans les faisceaux aimantés (1527). En effet, si l'on éloigne ces files, en donnant au barreau la forme d'un tube de même poids, on trouve que l'action sur chacune d'elles est plus prononcée que dans un barreau massif.

M. E. Becquerel a encore opéré sur du fer en limaille, ou en poudre impalpable précipitée de l'oxyde par l'hydrogène, et qu'il disséminait régulièrement dans un cylindre de cire, ou mélangeait dans un tube de papier avec de la limaille de zinc ou de cuivre. Il nomme *densité magnétique*, le poids du fer, divisé par le volume dans lequel il est disséminé. Il a trouvé ainsi que la force qui fait osciller une file de molécules, est proportionnelle au carré de la densité magnétique, tant que les parcelles sont assez rapprochées pour réagir facilement les unes sur les autres; ce qui a lieu tant que la densité magnétique n'est pas inférieure à  $\frac{1}{10}$ . Quand les particules sont très-éloignées, l'action élémentaire est proportionnelle à la densité, comme Coulomb l'avait reconnu. Entre ces deux limites, la loi est fort compliquée. Il résulte aussi de là que, à égalité de densité magnétique, l'action sur le fer doux est la même quand il est massif, ou réduit en limaille ou en poudre impalpable.

M. E. Becquerel a reconnu par le même procédé, que le fer le plus doux est celui qui possède le magnétisme spécifique le plus fort; ce qui se conçoit, la force coercitive s'opposant au développement de la polarité qui précède l'attraction. Le nickel et le cobalt ont, à poids égal, sensiblement le même magnétisme spécifique que le fer doux; celui de la fonte n'en est que les  $\frac{8}{10}$ .

Ajoutons qu'il résulte d'expériences de M. Arndtsen que le nickel, sous l'influence de faibles forces magnétiques, s'aimante environ 5 fois et demie autant que le fer; et environ 5 fois moins, sous l'influence de forces intenses.

**2376. Influence des actions mécaniques sur le magnétisme spécifique du fer.** — Les actions mécaniques, qui agissent sur l'aimantation du fer et de l'acier, ont aussi une influence marquée sur le magnétisme spécifique, c'est-à-dire qu'elles modifient la polarité produite par une cause donnée, même quand ces actions mécaniques n'altèrent que passagèrement l'arrangement moléculaire. Quant le corps revient ensuite à son premier état, il reprend sa puissance magnétique primitive.

**Torsion.** — Pour montrer les variations du magnétisme spécifique pendant la torsion, M. E. Becquerel s'est servi des courants induits, produits par les variations d'aimantation d'un barreau, dans une hélice qui l'enveloppe. Il sus-

pendit un fil de fer bien recuit, tendu par un poids, dans un tube de verre vertical autour duquel était enroulée l'hélice en rapport avec un rhéomètre très-sensible à fil court. Toutes les fois qu'une torsion était imprimée au fil, l'aiguille du rhéomètre était déviée, toujours du même côté, quel que fût le sens de la torsion; c'est que le fil de fer était aimanté sous l'influence de la terre, la torsion diminuait sa puissance magnétique, et il se produisait brusquement un affaiblissement dans sa polarité, d'où résultait, dans l'hélice, un courant induit instantané direct. Quand le fil revenait à son état d'équilibre, l'aiguille était déviée en sens contraire, la puissance magnétique et la polarité s'accroissant brusquement, ce qui développait dans l'hélice un courant induit inverse. M. E. Becquerel a obtenu un courant continu, en laissant le fil osciller librement par torsion, et interposant dans le circuit un commutateur qui ramenait les courants au même sens, chaque fois qu'ils en changeaient.

Matteucci a fait de nombreuses expériences sur le même sujet, en employant,

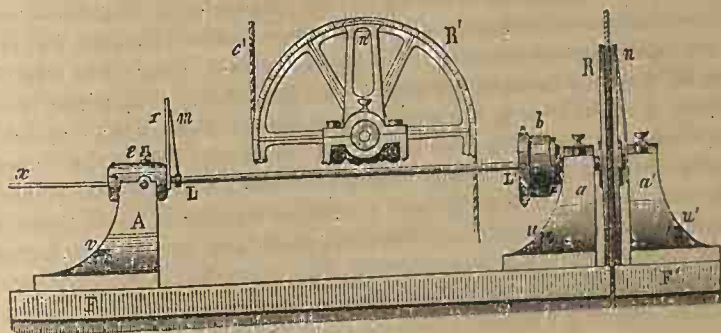


Fig. 1657.

au lieu de fils, des barres de fer doux ou d'acier, aimantées par une hélice enveloppante, près de laquelle se trouvait l'hélice dans laquelle devaient se développer les courants induits pendant la torsion<sup>1</sup>.

Wertheim, dans son travail sur la torsion (I, 518), en a étudié l'influence sur le magnétisme, au moyen de l'appareil (fig. 1657) déjà décrit; seulement la barre LL' est enveloppée par deux hélices placées l'une à la suite de l'autre, et n'occupant qu'une faible partie de sa longueur. La première, à gros fil, reçoit le courant qui aimante la barre; la seconde, à fil fin, en rapport avec un rhéomètre, reçoit les courants induits, et son diamètre est assez grand pour que la distance de sa surface intérieure à des barres de différente grosseur, puisse être regardée comme constante. Les expériences ont prouvé que les résultats restent les mêmes, quand varie la distance aux extrémités de la barre, de l'une ou de l'autre hélice, et quand l'appareil est en bois et muni d'étaux de bronze.

<sup>1</sup> Comptes rendus de l'Académie des sciences, t. XXIV, p. 301; et XXXVI, p. 742.

Wertheim a d'abord constaté, après Coulomb et Marianini (2141), que le fer le plus doux possède toujours un peu de force coercitive, et conserve un état magnétique permanent, dont les actions mécaniques temporaires hâtent la formation. Par exemple, une balle de fer très-doux horizontale, et aimantée par l'action terrestre, présentait, à son pôle nord, après avoir été retournée bout à bout, une force magnétique plus faible que celle qu'elle présentait dans sa première position, la barre ayant conservé presque la moitié de l'aimantation qu'elle avait alors.

Wertheim a ensuite constaté que 1° les torsions et détorsions ne produisent par elles-mêmes aucun magnétisme, car on n'observe pas de courant dans l'hélice induite, quand la barre est perpendiculaire au méridien magnétique. — 2° Si la barre est dirigée dans le méridien magnétique, ou soumise à l'action d'un aimant placé sur son prolongement, ou au courant de l'hélice magnétisante, les torsions et détorsions accélèrent l'action magnétisante de la cause extérieure; mais une fois l'équilibre magnétique établi, les torsions affaiblissent l'aimantation totale, et les détorsions la ramènent à sa première valeur, comme l'indiquent les courants induits direct et inverse qui se succèdent alors. Ces courants sont mesurés par les *déviations impulsives*, proportionnelles aux forces, de l'aiguille du rhéomètre, et l'on voit que le maximum d'aimantation a lieu dans l'état d'*équilibre mécanique*. — 3° Si la barre est soustraite à l'action qui l'aimante, les torsions et les détorsions font rapidement disparaître l'excès d'aimantation temporaire, mais elles agissent indéfiniment sur l'aimantation permanente. — 4° Quand la barre est dans un état quelconque d'équilibre magnétique, les effets de la torsion sont proportionnels aux angles de torsion; mais la grandeur de ces effets paraît dépendre beaucoup plus de l'aimantation permanente que de l'aimantation temporaire produite par la cause extérieure. — 5° La forme de la section ne paraît pas avoir d'influence, mais les déviations augmentent avec son étendue et l'intensité de l'aimantation. — 6° Quand on essaie différentes sortes de fer, la marche est la même pour toutes; il n'y a de différence que dans les intensités absolues des effets. Le fer le plus dur demande le plus de torsions et détorsions, pour atteindre son équilibre magnétique qui est indiqué par l'égalité des courants opposés qu'elles produisent. — 7° L'acier présente avec le fer une différence fondamentale: plus il est trempé, plus il faut de torsions ou détorsions pour qu'il atteigne l'équilibre magnétique, quand il est soumis à l'aimantation. Une fois l'équilibre établi, Wertheim trouve que les torsions ou détorsions ne peuvent à elles seules le modifier, comme cela a lieu pour le fer. Mais Matteucci a toujours obtenu des courants induits très-faibles, et d'autant plus faibles que la trempé était plus dure. — 8° Les fers durs ont présenté une anomalie qui n'a pas été expliquée; souvent les déviations qu'ils produisent par la torsion sont plus grandes immédiatement après l'interruption du courant magnétisant, que pendant son passage. Dans ce cas, il n'y a de diminution qu'au bout de quelque temps.

Au lieu de partir de la barre non tordue, Wertheim a ensuite cherché quels

sont les effets quand on la met, avant de l'aimanter, dans un état de torsion temporaire ou permanente; et il a reconnu que les résultats restent les mêmes, c'est-à-dire que le maximum magnétique correspond, non à l'état de torsion qui sert de point de départ, mais à l'état qui correspond à l'équilibre mécanique. Si donc on fait tourner la roue R dans le sens qui diminue la torsion primitive, le magnétisme s'accroît, et il diminue quand on revient à la torsion primitive. Mais si la torsion permanente qui sert de point de départ est produite pendant que la barre est soumise à l'action du courant aimantant, on observe la *rotation du maximum*, c'est-à-dire que ce maximum se déplace, et dans le sens de la torsion; et l'angle de rotation est d'autant plus prononcé que le fer est plus dur et la torsion permanente plus grande. Cet angle est toujours au-dessous de la moitié de la torsion temporaire qui accompagne toujours une torsion permanente.

Si l'on interrompt le courant pendant qu'il existe une torsion permanente sans torsion temporaire, le maximum, qui appartient alors au magnétisme permanent qui subsiste seul, conserve la même rotation. Mais si l'interruption a lieu pendant que la barre est soumise à une torsion temporaire, il se produit une nouvelle rotation dans le sens de cette torsion, rotation toujours moindre que l'angle de torsion temporaire, et d'autant plus prononcée que le fer est plus *doux*; tandis qu'elle est plus grande avec le fer le plus dur, quand on la produit au moyen d'une torsion permanente produite pendant le passage du courant.

**2377. Traction, flexion.** — Matteucci a reconnu qu'un allongement brusque imprimé par tension à un fil de fer ou d'acier soumis à l'action d'une hélice magnétisante, produit une *augmentation* de force magnétique, et que le raccourcissement produit une diminution. Ces changements se constatent au moyen de courants induits dans une hélice enveloppante. Ayant placé dans cette hélice un tube de cuivre rempli de limaille de fer, Matteucci a vu que le magnétisme était augmenté quand il la comprimait au moyen d'un piston à vis. Quand il retirait le piston ou qu'il agitait la limaille, il y avait diminution du magnétisme. Le même physicien a encore expérimenté au moyen d'un très-gros électro-aimant à deux branches, dont les hélices étaient indépendantes l'une de l'autre; l'une servant à aimanter le fer doux, l'autre représentant l'hélice induite. Quand il imprimait un choc, une vibration, une compression au fer doux, il observait des courants induits, indiquant une augmentation de magnétisme. Wertheim a observé, depuis, quelques-uns de ces résultats; il a trouvé, de plus, que la *flexion* ou la *déflexion* agit comme la torsion et la détorsion. Tous ces phénomènes se conçoivent par les ébranlements qui favorisent l'arrangement des molécules, soit dans le sens convenable pour augmenter l'aimantation, soit dans le sens opposé.

Wertheim avait trouvé dans l'augmentation de la capacité magnétique par la traction, l'explication de l'accroissement de force des aimants chargés peu à peu, fait dont nous avons vu plus haut la cause (1530). Le même physicien explique également, par des variations du magnétisme spécifique, les erreurs de la boussole dans les grands navires en fer, les *compensateurs* (1539) ne tenant

pas compte des variations que les flexions, inévitables pendant la marche, apportent à l'aimantation du fer par la terre.

## II. Corps diamagnétiques ou peu magnétiques.

**2378. Solides et liquides.** — M. Plucker a comparé, en poids, les pouvoirs magnétiques d'un grand nombre de solides et de liquides<sup>1</sup> : Il suspendait par des cordons de soie, à la balance de verre de son appareil (*fig.* 1649), un anneau mince de cuivre sur lequel il posait un verre de montre rempli de la substance à essayer, liquide ou en poudre impalpable. Une plaque de verre prenant bien juste fermait le verre de montre, de manière qu'il contint toujours des volumes égaux et de même forme des diverses substances; et l'on tenait compte de l'influence du verre vide. L'équilibre étant établi pendant le passage du courant dans l'électro-aimant, on cherchait les poids nécessaires pour le rétablir après la rupture du circuit. En divisant ensuite ces poids par la masse du corps, on obtenait la force exercée, pour l'unité de masse. M. Plucker a cherché à vérifier que la force est bien proportionnelle à la masse, en opérant sur des volumes égaux de cire; auxquels il mélangeait des quantités variables de fine limaille de fer.

M. Plucker a déterminé ainsi le magnétisme spécifique d'un grand nombre de substances, principalement des composés du fer et des dissolutions de ses sels. En représentant par 100,000 le magnétisme du fer, il a trouvé, pour la pierre d'aimant, 40227; pour le fer oligiste, 533; pour l'oxyde brun, 71, nombre le plus faible pour les composés du fer, solides ou liquides.

Voici quelques résultats relatifs aux substances *diamagnétiques*, à la température ordinaire et à poids égal, par rapport à l'eau :

Eau.....	100	}		Fleur de soufre.....	71	}
Phosphore.....	100			Sel marin.....	79	
Sulfure de carbone.....	102			Acide azotique.....	48	
Acide chlorhydrique.....	102			Azotate de bismuth.....	35	
Ether sulfurique.....	127			Acide sulfurique.....	34	
Essence de thérbentine.....	123	}		Mercure.....	23	}

On voit que les diamagnétismes des différents groupes sont exprimés à peu près par des rapports simples; mais on ne peut décider si ce résultat est dû au hasard, ou s'il exprime une loi réelle.

**2379. Expériences de M. E. Becquerel.** — M. E. Becquerel a déterminé le magnétisme spécifique d'un grand nombre de substances au moyen des appareils (*fig.* 1653, 1654). Il mesurait l'intensité de l'action exercée par

<sup>1</sup> *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXIX, p. 438.

l'électro-aimant, soit par la torsion, soit par la balance. Le magnétisme spécifique des liquides était déduit de la différence des actions exercées sur un même barreau, dans le vide et dans le liquide. Le tableau suivant contient une partie des résultats obtenus, rapportés à des volumes égaux; les corps marqués B ont été étudiés par la balance, et ceux marqués T par la torsion. Le magnétisme de l'eau est pris pour unité.

SOLIDES	MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE dans l'air.	LIQUIDES (T)	POIDS SPÉCIFIQUE	MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE dans l'air.	
Eau..... T.	— 1	Eau.....	1	— 1	
Zinc..... T.	— 0,25	Alcool.....	0,8059	— 0,97	
Cire blanche... T.	— 0,57	de { Ammoniaque....	»	— 1,02	
Soufre fondu... T.	— 1,14	Sel marin.....	4,2084	— 1,13	
Cuivre (galvanopl.) B	— 1,41	Dissolut. de { Chlorure de magné-	sium.....	4,3197	— 1,21
Cuivre pur.... B.	— 1,68	Sulfure de carbone...	»	— 1,33 <sup>2</sup>	
Plomb d'œuvre... T.	— 1,53	Sulfate de cuivre..	4,1265	+ 0,81	
Phosphore..... T.	— 1,64	Sulfate de nickel..	1,0827	+ 2,16	
Sélénium..... T.	— 1,65	Dissolution de { Protosulfate de fer.	1,1728	+ 18,02	
Argent pur.... B.	— 2,32	Id.....	1,1923	+ 21,12	
Or (pépité).... B.	— 2,41	Protochlorure de fer	1,0695	+ 2,19	
Or pur..... B.	— 3,47	Id.....	4,2767	+ 36,07	
Bismuth..... T.	— 21,76	Id. concentrée..	1,4334	+ 65,01	
Bismuth..... B.	— 22,67				

On voit que la *cire* et le *zinc* sont moins repoussés que les liquides diamagnétiques : ces corps seraient donc attirés dans ces liquides; c'est, en effet, ce que montre l'expérience. On voit aussi que le *bismuth* est le plus diamagnétique des corps et les dépasse tous de beaucoup. Du reste, les nombres du tableau se rapportent aux échantillons employés; les plus petites parcelles de fer et l'état moléculaire des solides (2386) peuvent notablement modifier les résultats.

**Comparaison avec le magnétisme du fer.** — M. E. Becquerel a ensuite comparé le magnétisme spécifique des corps à celui du fer. Pour cela, il lui a fallu trouver le rapport entre le magnétisme de ce métal et celui de l'eau, qui lui avait d'abord servi de terme de comparaison. Comme l'énorme pouvoir magnétique du fer rendait la comparaison difficile à faire directement, il a employé pour intermédiaire la solution concentrée de protochlorure de fer, dont le pouvoir est + 658,13 par rapport à celui de l'eau représenté par — 10. Cette solution a été introduite dans un tube de verre mince, de 4<sup>cm</sup> de longueur, suspendu entre les pôles contraires de deux aimants, et l'on a comparé les oscillations de ce tube à celles d'un barreau de même longueur formé de cire mélangée avec un poids connu de limaille de fer. Les nombres d'oscillations de

semblables barreaux sont indépendants de leur grosseur, et sont proportionnels aux quantités de limaille qu'ils contiennent. On a trouvé ainsi que le protochlorure de fer éprouve, à volume égal, la même action qu'une substance inerte renfermant 0,2 milligrammes de fer par centimètre cube. Le pouvoir magnétique de l'eau étant, par rapport au protochlorure de fer, égal à  $\frac{-10}{+658,43} = 0,0152$ ,

le pouvoir de l'eau sera égal à celui d'une matière inerte qui contiendrait  $0,0152 \times 0,2 = 0^m,003$  de fer par centimètre cube; mais il est de signe contraire. Chaque centimètre cube de fer massif pesant 7<sup>gr</sup>,788, les pouvoirs magnétiques du fer, du protochlorure de fer et de l'eau, sont, à volume égal : + 1 000 000; + 25,7; - 0,4; et, à poids égal, + 1 000 000; + 140; - 3.

**2380. Expériences de Faraday.** — Faraday, en 1853, a comparé les pouvoirs magnétiques d'un grand nombre de substances par la méthode de torsion<sup>1</sup>. Il suspendait, par un fil de platine, entre les pièces polaires d'un aimant en fer à cheval pouvant porter 200 kil., un barreau de la substance à étudier, et le ramenait dans la direction axiale au moyen de la torsion. Un petit miroir réfléchissant un pinceau de lumière (2322) permettait d'opérer avec une grande précision. Le tableau qui suit contient une partie des résultats trouvés par Faraday; ils sont rapportés à l'eau, et ont été obtenus à la température de 15°,5, et, pour les gaz, à la pression de 0<sup>m</sup>,76. Enfin, les nombres correspondent à des *volumes égaux* de chaque substance observée dans le vide.

SUBSTANCES	POUVOIRS	SUBSTANCES	POUVOIRS	SUBSTANCES	POUVOIRS
Proto-ammoniare de cuivre.....	+ 1,390	Cyanogène.....	- 0,009	Acide azotique....	- 0,914
Per - ammoniare de cuivre.....	+ 1,240	Verre.....	- 0,188	Ammoniaq. liquide.	- 1,010
Oxygène..	+ 0,481	Zinc pur.....	- 0,772	Bisulfure de carbone.	- 1,031
Air.....	+ 0,035	Ether.....	- 0,797	Azotate de potasse (saturé).....	- 1,036
Gaz oléfiant....	+ 0,006	Alcool absolu....	- 0,815	Acide sulfurique....	- 1,084
Azote.....	+ 0,003	Essence de citron.	- 0,828	Soufre.....	- 1,221
Acide carbonique.	0,000	Camphre.....	- 0,855	Chlorure d'arsenic..	- 1,260
Hydrogène.....	- 0,001	Camphire.....	- 0,859	Borate de pl. fondu.	- 1,443
Gaz ammoniac...	- 0,005	Huile de lin....	- 0,886	Bismuth.....	- 20,369
		Huile d'olive....	- 0,886		
		Cire.....	- 0,887		

**2381. Lois et résultats généraux.** — On a remarqué que les corps simples les plus magnétiques sont ceux dont le *volume atomique* (rapport de l'équivalent à la densité) est le plus petit, ou dont les atomes sont le plus rapprochés, et que les corps *diamagnétiques* sont ceux dont les atomes sont le plus

<sup>1</sup> *Bibl. de Gen.* (Supplément), t. XXIII, p. 405, et *Rech. expérim.*, t. III, p. 497.



écartés. Ce fait, déjà remarqué pour les corps très-magnétiques, s'est vérifié depuis sur beaucoup d'autres, mais non sur tous. Dans la liste qui suit, les nombres représentent les volumes atomiques :

Nickel. ....	42	Chrome; titano...	54	Or; argent.....	63
Cobalt. ....	43	Platine; osmium..	57	Mercure.....	91
Manganèse.....	43	Zinc.....	58	Plomb.....	1136
Cuivre.....	44	Sodium.....	447	Antimoine.....	126
Fer.....	44	Potassium.....	292	Bismuth.....	134

La troisième colonne est composée des métaux *diamagnétiques*. Dans les deux premières, nous trouvons le *cuivre* et le *zinc*, qui sont *diamagnétiques*; nous avons vu comment de La Rive explique cette anomalie, par leur conductibilité (2372). Mais nous voyons que le fer, le plus magnétique des corps, n'a pas le plus faible volume atomique. En outre, le potassium et le sodium, dont le *volume atomique* est le plus grand, sont *magnétiques*, d'après M. Lamy. La loi ne peut donc, pour le moment, être regardée comme exacte.

Matteucci a prouvé directement l'influence de la conductibilité des métaux sur leur pouvoir diamagnétique<sup>1</sup>; car il a constaté que ce pouvoir augmente proportionnellement à leur résistance à la conductibilité, et quand on les divise, ce qui diminue la conductibilité proportionnellement au degré de division. Par exemple, en appelant 1 le pouvoir diamagnétique du métal massif, le cuivre a donné de 1,6 à 2,90, en poudre fine; l'or, de 1,36 à 1,73; l'argent, de 1,12 à 1,55, suivant l'état de division. Avec le bismuth, les résultats ont été douteux; mais la poudre de ce métal est conductrice, parce que, étant obtenue mécaniquement, elle n'est pas aussi fine que les poudres obtenues par précipitation chimique. Les corps non conducteurs, comme le soufre, la résine, l'acide stéarique, la craie, ne changent pas de pouvoir quand on les réduit en poudre impalpable. Dans ces expériences, le corps était renfermé, en fragments ou en poudre impalpable, dans une boule de verre mince fixée à l'extrémité d'un long levier suspendu par un fil de torsion.

**Corps composés.** — On a cherché en vain à saisir quelque relation entre les pouvoirs magnétiques ou diamagnétiques des composés et les pouvoirs de leurs éléments. Cependant, on remarque que les combinaisons de fer sont, en général, magnétiques; mais, avec ce métal même, on trouve des exceptions: ainsi, les deux cyanoferrures de potassium secs sont *diamagnétiques*. L'état de combinaison semble donc modifier les tendances magnétiques des atomes; ce qui est bien d'accord, du reste, avec l'influence qu'exerce l'arrangement moléculaire sur le magnétisme (2376).

**Mélanges.** — Dans les *mélanges*, le pouvoir diamagnétique est sensiblement égal à la somme des pouvoirs des corps mélangés. Matteucci a établi cette loi,

<sup>1</sup> *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XLIV, pp. 242 et 625.

au moyen de mélanges de poudre d'argent mêlée à l'essence de térébenthine ; de poudres de soufre, colophane, craie, cuivre, bismuth, mélangées avec l'essence de térébenthine, l'huile d'olive, la benzine. Cependant les mêmes poudres ont formé avec l'eau pure, salée, ou acidulée, des mélanges dont le pouvoir dépassait constamment de  $\frac{1}{10}$ , environ la somme calculée.

**2382. Magnétisme spécifique de l'oxygène et de l'air.** — Matteucci compare le magnétisme de l'oxygène à celui du protochlorure de fer, par le moyen suivant qui peut servir à montrer facilement que l'oxygène est magnétique. On introduit une grosse bulle d'oxygène dans un tube rempli d'alcool que l'on place transversalement entre les extrémités polaires hémisphériques d'un très-fort électro-aimant. Si la bulle est tangente latéralement à la ligne polaire, on la voit s'allonger vers cette ligne, et si son milieu se trouve sur cette ligne, elle se raccourcit. Si l'alcool est saturé de protochlorure de fer, dans le dernier cas, la bulle se partage en deux parties qui s'écartent l'une de l'autre. En cherchant par tâtonnement la proportion de protochlorure pour laquelle la bulle n'éprouve pas de changement appréciable, on obtient une dissolution ayant le même magnétisme que l'oxygène. Matteucci a reconnu qu'il en est ainsi quand la solution de protochlorure contient 3 milligrammes de fer par centimètre cube.

M. E. Becquerel a fait de nombreuses expériences pour mesurer le magnétisme de l'oxygène comparé à celui de l'eau, et par suite, à celui du fer. Il a suspendu dans son appareil (*fig.* 1654) un petit tube de verre rempli de cire, et il observe les effets produits par l'électro-aimant sur ce tube quand il est dans le vide, dans l'oxygène, puis dans l'eau. Ses actions, à la température de  $12^{\circ}$ , furent, dans l'oxygène à la pression de  $0^m,76$ ,  $V_o = -0,2675$ ; dans le vide,  $V_v = -0,1145$ ; et dans l'eau,  $V_e = +0,7033$ . On en conclut  $V_o - V_v = +0,1530$ ,  $V_e - V_v = -0,8178$ , et pour le magnétisme de l'oxygène par rapport à l'eau dans le vide,  $0,1530 : 0,8178 = 0,1871$ . Ainsi, à volume égal, le pouvoir magnétique de l'oxygène est presque  $\frac{1}{5}$  de celui de l'eau, mais de signe contraire. On trouve pour l'air, le nombre  $0,0377$ , qui est sensiblement égal aux  $\frac{21}{100}$  du pouvoir de l'oxygène; l'air doit donc son magnétisme à l'oxygène qu'il contient. Faraday et Matteucci sont arrivés à des résultats peu différents, que M. E. Becquerel a encore confirmés par la méthode de la balance (2378) en renfermant le gaz dans les boules de verres très-minces, assez résistantes cependant pour qu'on pût y faire le vide. Il laissait un intervalle de 5 à  $10^{mm}$  entre la boule et les pièces polaires; pour éviter de rendre prédominante l'action sur le verre et sur le gaz adhérent. Enfin, M. E. Becquerel a constaté que le pouvoir magnétique de l'oxygène est proportionnel à sa pression; loi qui probablement s'étend aux autres gaz.

Le pouvoir magnétique du fer étant représenté par 1,000,000, celui de l'oxygène à poids égal est 377, et celui de l'air 88. L'oxygène, à poids égal, est près de 3 fois plus magnétique que le protochlorure de fer, qui est le liquide le plus magnétique. Il résulte de là que 1 mètre cube d'oxygène agirait sur une

aiguille aimantée comme 0<sup>5</sup>,54 de fer; et 1 mètre cube d'air, comme 0<sup>5</sup>,11. L'atmosphère entière équivaut, sous le rapport magnétique, à une enveloppe de fer de 0<sup>mm</sup>,1 d'épaisseur recouvrant la terre. On conçoit que ses agitations puissent troubler l'aiguille aimantée, et que, son pouvoir magnétique variant avec la température, comme nous allons le voir, son échauffement aux différentes heures du jour puisse concourir dans une certaine mesure à la production des variations diurnes.

**2383. Influence de la température sur le magnétisme et le diamagnétisme.** — Faraday a constaté que la chaleur diminue rapidement le pouvoir des corps magnétiques proprement dits, mais qu'elle ne l'annéantit jamais complètement, quand on emploie un électro-aimant très-énergique. M. Plücker a confirmé ces résultats; ayant suspendu à la balance de son appareil (2363), une capsule de porcelaine contenant un thermomètre et remplie de la substance, liquide ou en poudre, il chauffait fortement et faisait ensuite de fréquentes pesées pendant le refroidissement. Il reconnut ainsi que le magnétisme spécifique des solides et des liquides diminuent généralement quand leur température s'élève.

Il y a cependant des exceptions; par exemple, le mercure ne change pas jusqu'à 300°; il en est de même du soufre et de la stéarine, même au-delà de leur point de fusion, M. Brunner a trouvé que l'eau possède le même magnétisme spécifique sous les trois états, solide, liquide et gazeux.

Matteucci a fait des recherches suivies sur le même sujet<sup>1</sup>. Il a reconnu d'abord que le magnétisme du fer augmente jusqu'à une certaine température, puis décroît rapidement. Entre 0° et 212°, le pouvoir diamagnétique d'une aiguille de bismuth diminue à peu près proportionnellement à l'augmentation de température. Cette aiguille était suspendue par un fil de cocou, sous une cloche de verre remplie d'air, plongée dans un bain d'huile, et placée entre les pôles d'un électro-aimant. — Ayant mis du bismuth dans une petite cuiller en chaux fixée à l'extrémité d'un long levier suspendu par un fil de platine, il reconnut que le système était repoussé. Ayant fait chauffer la cuiller jusqu'à la fusion du bismuth, il constata une attraction qui se changea en répulsion au moment de la solidification. La cuiller avait été frottée légèrement avec du papier teint d'oxyde de fer, de manière à être un peu attirée quand elle était vide. De plus l'expérience a prouvé qu'une petite auge allongée, en chaux remplie de bismuth fondu, oscillait aussi vite que lorsqu'elle était vide à la même température; d'où il résulte que le pouvoir diamagnétique du bismuth est insensible dans l'état de fusion.

Les changements d'état des corps non métalliques et non cristallisés, comme par exemple le soufre, le phosphore, diminuent à peine leur diamagnétisme.

Matteucci, ayant fait fondre un globule de fer dans la cuiller en chaux, au moyen du chalumeau de Newmann, a vu que ce globule était encore attiré; mais

<sup>1</sup> *Bibl. de Genève (Arch. des sc)*, t. XXII, p. 24, et *Cours sur l'induction*, p. 219.

seulement par un énorme électro-aimant animé par 30 couples de Grove ; et il évalue le pouvoir magnétique du fer en fusion à 0,000015 de son pouvoir à froid. Il n'est donc pas étonnant qu'on ait avancé que le fer au rouge blanc cesse d'être magnétique quand on l'essaie avec les aimants ordinaires. Le cuivre, l'or des monnaies, le zinc, la porcelaine, certaines espèces de charbon, *magnétiques* à la température ordinaire, sont *diamagnétiques* à une température plus ou moins élevée. Le platine cependant reste magnétique à l'état de fusion, et son pouvoir paraît à peine diminué.

La chaleur semble diminuer le magnétisme des gaz. Faraday avait vu l'air chaud repoussé dans l'air froid, comme s'il était moins magnétique que ce dernier (2366). Mais M. E. Becquerel a conclu de ses expériences sur l'oxygène, que l'influence de la chaleur n'a rien de réel, et que les effets sont dus aux changements de densité. Il opérait par des pesées, avec son ballon mince rempli de gaz et entouré d'une étuve à double enveloppe placée sur l'électro-aimant, dans laquelle il faisait passer un courant de vapeur d'eau.

### § 3. — MAGNÉTISME ET DIAMAGNÉTISME DES CRISTAUX

2384. Nous venons de voir que l'état de division et la fusion apportent des changements dans le magnétisme de certains corps. L'arrangement moléculaire a donc une influence sur cette propriété. C'est surtout dans les cristaux que cette influence se manifeste d'une manière frappante. Dans ces sortes de corps, les molécules ne sont pas également rapprochées dans toutes les directions, et nous avons vu comment la structure manifeste son influence, dans les expériences sur l'élasticité (I, 785), la *dilatabilité* (II, 1001), la *conductibilité* pour la chaleur (II, 969), la conductibilité électrique superficielle (1644).

M. Plucker a découvert, vers 1849, que des lames de tourmaline taillées parallèlement à l'axe du cristal se montrent magnétiques, à cause du fer qu'elles renferment, quand on les suspend verticalement entre les pôles d'un électro-aimant ; mais elles prennent la direction équatoriale quand leur axe est horizontal. D'où il conclut que l'axe est repoussé, et que la répulsion l'emporte sur l'attraction que tend à produire le magnétisme de la substance. Le spath calcaire, qui est diamagnétique, se tourne de manière que son axe prenne la direction axiale. La baryte, la diopase, qui sont magnétiques, se comportent comme la tourmaline.

Vers la même époque, Faraday découvrait l'influence de la structure de certains cristaux métalliques sur leur propriétés magnétiques<sup>1</sup>. Il remarqua qu'un barreau de bismuth suspendu entre les pôles d'un électro-aimant se comporte différemment suivant celles de ses arêtes qui se trouve en haut ; il

<sup>1</sup> *Bibl. univ. de Genève (Arch. des sc.)*, t. XII, 89 ; et *Ann. de ch. et de phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 247.

attribua cet effet à la cristallisation du métal. Ayant alors isolé un cristal cubique de bismuth, et ayant mis en évidence la direction du clivage le plus brillant, en abattant un des angles solides, il reconnut que ce cristal, suspendu de manière que le plan du clivage soit vertical, se place de manière que ce plan se tourne vers l'un des pôles. Si la face de clivage est horizontale, le cristal ne se dirige plus. Des cristaux d'antimoine et d'arsenic donnent les mêmes résultats. Il est à remarquer que : 1° la force qui agit sur le cristal est purement directrice, et ne peut déplacer son centre de gravité ; 2° la direction se produit sous l'influence d'un seul pôle magnétique ; 3° un cristal peut se placer indifféremment dans les deux positions diamétralement opposées. Pour observer ces phénomènes, il faut que les pièces polaires soient terminées par des plans constituant un champ magnétique uniforme. Si elles sont terminées en cônes, il se produit dans les points du cristal les plus rapprochés, des actions locales perturbatrices, à moins qu'on ne les rende insensibles, par l'éloignement. MM. Plucker et Beer ont étudié la direction que prennent un grand nombre de cristaux sous l'influence du magnétisme<sup>1</sup>.

La force qui dirige un cristal de bismuth est assez grande pour se manifester avec un aimant capable de porter une quinzaine de kilos, ou avec une hélice rhéophore, et alors la face de clivage se place perpendiculairement à l'axe de cette hélice. Faraday a même vu un cristal de bismuth se diriger sous l'influence de la terre, mais très-faiblement, et M. Plucker a découvert qu'un cristal de *cyanite* se dirige par la terre et de manière à présenter toujours le même point vers le nord ; un semblable cristal peut donc remplacer la boussole. Un cristal de *stannite* ou oxyde d'étain, présente ce phénomène d'une manière encore plus marquée ; son axe se dirige dans le méridien magnétique, et ce cristal peut dévier alors une petite aiguille aimantée très mobile.

**2385. Explication des phénomènes magnéto-cristallins.** — M. Plucker avait cherché à rapprocher ces phénomènes de ceux qui se produisent dans la double réfraction de la lumière ; l'axe des cristaux dits *positifs* tendrait à prendre la direction axiale, et l'axe des cristaux *negatifs*, la direction équatoriale. Dans les cristaux à deux axes de double réfraction, ce serait la bissectrice du plus petit des angles que les axes font entre eux, qui suivrait cette loi.

Faraday admettait deux forces différentes, l'une agissant sur la masse du cristal, l'autre sur son axe ; et il supposait que cette dernière, qu'il nommait force *magnérocristalline*, ne variait pas de la même manière que la première, avec la distance.

MM. Tyndall et Knoblauch ont trouvé la véritable explication de ces phénomènes<sup>2</sup>. Ils ont constaté d'abord que beaucoup de cristaux prennent des

<sup>1</sup> Poggendorff Ann., LXXXI, 115 ; et Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XLIX, p. 221.

<sup>2</sup> Annales de chimie et de physique, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 375 ; et t. XXXVII, p. 76.

directions en opposition avec la loi, comme M. Plucker l'avait, du reste, reconnu lui-même. Après avoir remarqué que les résultats dépendent plutôt des plans de clivage que des axes de cristallisation, ils ont rattaché les phénomènes magnéto-cristallins aux effets ordinaires du magnétisme et du diamagnétisme, en admettant : 1<sup>o</sup> que l'intensité de l'action exercée sur une même matière est d'autant plus prononcée, à égal volume, que ses molécules sont plus rapprochées, et que dans les cristaux, les molécules sont plus serrées dans la direction du plan de clivage que perpendiculairement à ce plan ; 2<sup>o</sup> que la ligne de plus grande densité est celle suivant laquelle les forces magnétiques s'exercent avec le plus d'énergie. De sorte que, si la substance est *paramagnétique*, cette ligne, nommée *ligne de polarité élective*, prend la direction axiale, et si la substance est *diamagnétique*, la direction équatoriale.

**2386. Expériences à l'appui.** — Pour mettre en évidence ce principe, MM. Tyndall et Knoblauch l'ont d'abord vérifié sur des corps disposés artificiellement de manière à présenter une direction de plus grande densité. Ayant mêlé de la poudre d'oxyde de fer, ou de bismuth, à une pâte faite avec de l'eau et de la gomme, ils en formèrent des barreaux, qui prirent, le premier la direction axiale, et le second la direction équatoriale. Ayant ensuite comprimé ces barreaux de manière à les transformer en disques aplatis, celui qui contenait la substance magnétique prit la direction équatoriale, l'autre se plaça suivant l'axe. C'est que la ligne suivant laquelle les parcelles métalliques sont le plus rapprochées, est perpendiculaire au plan des disques. Un prisme formé de feuilles de papier d'émeri superposées, se dirige de manière que le plan des feuilles soit parallèle à la ligne des pôles de l'électro-aimant, que ce plan soit dirigé suivant la hauteur ou suivant la base du prisme. Si l'on réunit de même des feuilles de papier fin non magnétique, sur lesquelles on a fait adhérer de la poudre de bismuth, les feuilles prennent la direction équatoriale. Or, c'est bien suivant le plan de ces feuilles que les parcelles magnétiques ou diamagnétiques sont le plus rapprochées.

Des cubes de bismuth comprimés dans un sens, se sont toujours placés de manière que la ligne de compression fût équatoriale. Matteucci, qui a répété cette expérience, a aussi opéré sur des cubes de soufre et d'acide stéarique, et est arrivé aux mêmes résultats. Des cubes et des barreaux, formés avec des lames très-minces de bismuth, obtenues en laissant tomber le métal fondu goutte à goutte sur un plan de marbre, se sont toujours dirigés de manière que les lames fussent équatoriales.

Les corps à structure fibreuse, chez lesquels les molécules sont plus rapprochées suivant les fibres, que, dans la direction transversale, donnent des effets semblables. Des cylindres diamagnétiques d'ivoire ou de gutta-percha fibreuse, se dirigent de manière que les fibres soient perpendiculaires à la ligne des pôles de l'aimant.

Il n'y a pas jusqu'à l'action de la terre sur certains cristaux qui ne puisse être reproduite par des systèmes artificiels. M. Rieu a formé un prisme

rectangulaire au moyen de bandes de papier un peu magnétique superposées verticalement suivant la longueur du prisme, et serrées les unes contre les autres par des rubans de soie. Ce système, suspendu par un fil de cocon, se dirige dans le méridien magnétique. Un prisme semblable formé de feuilles perpendiculaires à la longueur du prisme, se dirigea de l'est à l'ouest, de manière que les lames étaient toujours dans le méridien magnétique.

Tous ces faits permettent d'interpréter les phénomènes que présentent les cristaux. Dans les lames que sépare le clivage le plus facile, les molécules sont plus rapprochées que dans le sens perpendiculaire à ces lames. Si donc la substance est magnétique, comme le sulfate de nickel, le beryl, la tourmaline....., le plan de clivage le plus facile prendra la direction axiale; si, au contraire, le cristal est diamagnétique, comme les sulfates de magnésie et de zinc, le salpêtre, la topaze....., ce plan prendra la direction équatoriale. S'il y a trois plans de clivage perpendiculaires, comme dans le sel gemme, le cristal ne se dirigera pas. Il en sera de même s'il n'existe pas de plan de clivage, comme dans le cristal de roche. M. Tyndall a reconnu aussi, par la méthode de torsion, que les cristaux attirés ou repoussés par l'un des pôles d'un électro-aimant, le sont plus fortement suivant la direction de plus grande densité que suivant la direction perpendiculaire.



FIN DU TROISIÈME VOLUME.



## ERRATA POUR LE TROISIÈME VOLUME

---

Page	ligne	au lieu de	mettre
29,	6, en remontant,	en B	en A
53,	2,	pour $t^0$	pour $1^0$
133,	11, en remontant,	(1715)	(1654)
183,	15,	(I, 330)	(I, 394)
189,	dernière,	(1271)	(1597)
287,	11, en remontant,	(fig. 1229)	(fig. 1228)
350,	4, en remontant,	(1407)	(1790)
448,	14, en remontant,	(fig. 1131)	(fig. 1329)
454,	12,	(II, 1062)	(II, 1081)
496,	4,	affaiblis avaient	avaient affaibli
566,	7, en remontant,	1394	1934
585,	9,	$D = \frac{Ld}{(l+d)L-d^2}$	$D = I \frac{Ld}{(l+d)L-d^2}$
<i>Id.</i> ,	2, en remontant,	$D = \frac{I}{l}$	$D = I \frac{L}{l}$
682,	14, en remontant,	(fig. 1455)	(fig. 1475)
707,	5, en remontant,	(fig. 1502)	(fig. 1493)



# TABLE DES MATIÈRES

## DU TROISIÈME VOLUME

### LIVRE V

#### ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

##### CHAP. I. — DU MAGNÉTISME

§ 1. — Propriétés générales des aimants. — Pôles. Théorie de Coulomb. Force coercitive.....	6
§ 2. — Action de la terre sur les aimants. — Déclinaison. Inclinaison. Action directrice et force magnétique du globe.....	17
§ 3. — Comparaison des forces magnétiques.....	24
I. Lois des attractions et répulsions. — Balance magnétique.....	24
II. Comparaison des forces des aimants. Distribution du magnétisme dans les aimants. Constitution des aimants.....	28
§ 4. — Aimantation et force des aimants.....	35
I. Procédés d'aimantation; par les aimants; par la terre.....	35
II. De la force des aimants. — Influence de la trempe. Faisceaux. Armatures. Aimants feuilletés. Influence de la chaleur.....	41
§ 5. — Étude du magnétisme terrestre.....	54
I. Modes d'observations.....	54

II. De la déclinaison. — Boussoles de déclinaison. — Lignes isogoniques. Pôles magnétiques.....	58
III. De l'inclinaison. — Équateur magnétique. Lignes isoclines.....	69
IV. Intensité. — Lignes isodynamiques.....	74
V. Variations de l'aiguille aimantée. — Déclinomètres; magnétomètres. Variations périodiques. Perturbations.....	78
VI. Hypothèses sur le magnétisme terrestre.....	92

##### CHAP. II. — ÉLECTRICITÉ STATIQUE

§ 1. — Électricité par frottement; théories électriques.....	97
I. Développement par frottement. — Bons et mauvais conducteurs.....	97
II. Théories électriques. — Décomposition par influence.....	102
III. Explication des attractions et répulsions. Électromètres. Étincelle.....	111
§ 2. — Machines électriques.....	120
I. Machines à frottement. — Machines hydro-électriques.....	120
II. Machine d'induction. — Electro-phore. — Machines de rotation.....	128

§ 3. — Lois des forces électriques. Distribution dans les conducteurs. ....	437
I. Lois des attractions et répulsions. — Balance électrique. ....	137
II. Distribution de l'électricité sur les conducteurs. — Tension. Distribution à la surface. Potentiel électrique. ....	143
III. Pouvoir des pointes. ....	156
§ 4. — Déperdition de l'électricité. Propagation dans les mauvais conducteurs. ....	160
I. Déperdition à travers les gaz. ....	160
II. Propagation dans les solides isolants. — Influence de la température. Cristaux. ....	165
III. Polarisation des corps diélectriques. Pouvoir inductif. ....	170
§ 5. — Condensateur. Décharge. ....	177
I. Théorie du condensateur. — Électricité dissimulée. Décharge du condensateur. Bouteille de Leyde. Batteries. ....	177
II. Applications aux électromètres. ....	192
§ 6. — Effets de la décharge. ....	200
I. Conditions de la décharge. ....	200
II. Lumière électrique. — Étincelle; durée. Aigrettes. Pouvoir isolant du vide. ....	205
III. Effets physiologiques. ....	218
IV. Effets calorifiques. — Résistance des fils. Lois de l'échauffement. ....	220
V. Effets mécaniques. ....	229
VI. Effets chimiques et magnétiques. ....	235
<b>CHAP. III. — MÉTÉORES ÉLECTRIQUES</b>	
§ 1. — Du tonnerre. ....	239
I. Origine du tonnerre. — Éclair, roulement. ....	239
II. De la foudre et de ses effets. — Foudre globulaire. Induction des nuages orageux sur la terre. ....	245
III. Paratonnerres. ....	258

§ 2. — Formation des orages. Grêle, trombes. ....	265
I. Formation des nuages orageux. — Répartition des orages. ....	265
II. De la grêle. — Théories de la grêle. ....	274
III. Des trombes. ....	280
§ 3. — Électricité atmosphérique. Aurores polaires. ....	286
I. Appareils et méthodes d'observation. ....	286
II. Distribution de l'électricité dans l'atmosphère. — Origine. ....	293
III. Aurores polaires. ....	300

#### CHAP. IV. — SOURCES D'ÉLECTRICITÉ. PILES

§ 1. — Sources mécaniques. ....	307
I. Frottement. ....	307
II. Pression, clivage, etc. ....	316
§ 2. — Électricité produite par les actions chimiques. ....	321
I. Galvanisme. — Pile de Volta. — Piles à un liquide. Courant. ....	321
II. Électricité dans les actions chimiques : Combustions. — Réactions des dissolutions. Décompositions. Action sur les métaux. ....	343
III. Théorie chimique de la pile. ....	354
IV. Affaiblissement de la pile. — Piles à deux liquides. ....	364
V. Piles secondaires. Batteries à gaz. ....	378
VI. Du contact comme source d'électricité. ....	387
§ 3. — Électricité produite par la chaleur. ....	391
I. Pyro-électricité des cristaux. ....	391
II. Courants thermo-électriques. — Piles thermo-électriques. Applications à la thermométrie. ....	396
§ 4. — Électricité physiologique. ....	417
I. Poissons électriques. ....	417
II. Courant musculaire. ....	422
III. Électricité des végétaux. ....	427
<b>CHAP. V. — EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE</b>	
§ 1. Effets physiologiques. ....	430

I. Effets sur les animaux morts.....	430
II. Effets sur les animaux vivants. — Applications médicales.....	435
III. Effets sur les végétaux.....	443
§ 2. — Effets calorifiques.....	444
I. Effets calorifiques dans les bons conducteurs. — Chaleur aux solides. Lois de l'échauffement des fils, des liquides.....	444
II. Arc voltaïque. — Effets.....	463
§ 3. — Effets mécaniques des courants. — Transport des liquides.....	474
§ 4. — Effets chimiques.....	479
I. Décompositions.....	479
II. Transports aux électrodes.....	488
III. Polarisation des électrodes. — Phénomènes électro-capillaires..	493
IV. Lois de l'électrolyse. — Équivalent d'électricité. De la conductibilité propre des liquides. Voltmètres.	503
V. De l'ozone. — Ozonométrie.....	522
VI. Applications de l'électro-chimie. — Galvanoplastie. Dorure, etc.	531

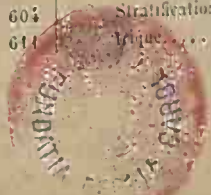
## CHAP. VI. — ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. PROPAGATION

§ 1. — Mode de propagation...	550
I. Constitution du courant.....	550
II. État variable et effets statiques d'un courant.....	554
III. Vitesse de l'électricité.....	560
§ 2. — Lois des intensités des courants.....	566
I. Méthodes de mesure. — Rhéomètres.	566
II. Lois d'Ohm et Pouillet. — Courants dérivés.....	576
§ 3. — Mesure des conductibilités.....	593
I. Fils métalliques. — Unités de résistance.....	593
II. Conductibilité des liquides. — Lois de la résistance au passage.....	604
III. Conductibilité des gaz.....	611

§ 4. — Comparaison des forces électromotrices, et des quantités d'électricité....	613
I. Force électromotrice des divers couples. — Force élémentaire.....	613
II. Des quantités d'électricité.....	632

## CHAP. VII. ÉLECTROMAGNÉTISME ET ÉLECTRODYNAMIQUE

§ 1. — Action des courants sur les aimants.....	635
I. Lois des actions électromagnétiques.	635
II. Aimantation par les courants....	641
III. Electro-aimants. — Lois.....	646
IV. Actions moléculaires produites par les aimants. — Sons.....	656
§ 2. — Électrodynamique.....	667
I. Actions mutuelles des courants....	667
II. Lois mathématiques des phénomènes électrodynamiques.....	682
III. Actions des aimants et de la terre sur les courants. — Théorie du magnétisme terrestre.....	688
§ 3. — Théorie électrodynamique du magnétisme.....	696
I. Aimants et solénoïdes.....	696
II. Rotation des courants par les aimants et réciproquement. — Rotation des liquides.....	701
§ 4. — Courants d'induction... ..	709
I. Induction par les courants; par les aimants; par la terre.....	709
II. Lois des courants induits.....	719
III. Induction par les courants instantanés. Différents ordres. Induction par la décharge.....	730
IV. Induction réfléchie. — Extra-courant.....	740
V. Magnétisme par mouvement. — Disques. Masses de forme quelconque. Chaleur par induction.....	747
VI. Appareils d'induction électro-magnétiques. Bobine de Ruhmkorff. — Stratification de la lumière électrique.....	759



VII. Appareils d'induction magnéto-électriques. — Générateurs dynamo-électriques.....	783
§ 6. — Applications de l'électromagnétisme.....	801
I. Moteurs électro-magnétiques.....	801
II. Télégraphes électriques. — Récepteurs et transmetteurs divers. Communications. Câbles sous-marins. Applications.....	810
III. Téléphone, microphone, phonographe.....	854
IV. Horloges électriques et chronoscopes.....	861
V. Applications scientifiques et industrielles.....	870
VI. Éclairage électrique. — Par l'arc voltaïque. Régulateurs. Bougies. Par incandescence.....	874

### CHAP. VIII. — UNIVERSALITÉ DU MAGNÉTISME

§ 1. Magnétisme et diamagnétisme.....	887
I. Faits généraux. Diamagnétisme....	887
II. Influence du milieu.....	894
III. Polarité diamagnétique. Explication du diamagnétisme.....	899
§ 2. — Magnétisme spécifique.....	904
I. Corps magnétiques proprement dits. — Actions mécaniques.....	904
II. Corps diamagnétiques ou peu magnétiques.....	910
§ 3. — Magnétisme et diamagnétisme des cristaux. Explication des phénomènes magnéto-cristallins.....	916

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TROISIÈME VOLUME

