

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.*

Int. 57470

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 a prof. P. Stroescu

QUATRIÈME ÉDITION

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

1707

TOME DEUXIÈME



PARIS
LIBRAIRIE CH. DELAGRAVE
RUE SOUFFLOT, 15

TOULOUSE
LIBRAIRIE PAUL PRIVAT
RUE DES TOURNEURS, 45

1878

Droits de reproduction et de traduction réservés.

1961

1956

rc 203/00

BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITĂRĂ
BUCUREȘTI
COTA 22 190

ERRATUM

Pages :	Lignes :	Au lieu de :	Mettre :
50	44	fig. 552	fig. 646
114	46	(893)	(894)
121	12 en remont.	pression	progression
277	9 id.	(1059)	(1060)
307	21 et 25	supprimer le facteur V	
333	4 ^e ligne du tableau	azotate de potasse	azotate d'ammoniaque
363	13 en remont.	chaleur de fusion	chaleur d'évaporation
401	11	+ cy^{t2} +	+ cy^t +
il.	3 en remont.	465,6; 47,390	4651,6; 47390
436	dernière	(I, 482)	(I, 492)
471	2	(fig. 7)	(fig. 883)
il.	3	(fig. 759)	(fig. 884)
533	18	$t' = \frac{0,22}{t}$	$t' = \frac{t}{0,22}$
521 et 523	passim	Rumford	Rumford
534	20	(1087)	(page 413)
533	6	(887)	(1058)
621	9 en remont.	(842)	(1005)
677	9	(I, 785)	(I, 25)

B.C.U. Bucuresti



C27021

LIVRE IV

DE LA CHALEUR

812. Fluides impondérables. — Nous avons vu (I, 11) comment, en embrassant l'ensemble des phénomènes naturels, les physiiciens ont été conduits à admettre deux sortes de matière : l'une tangible et pesante, pouvant se présenter sous les trois états, *solide, liquide et gazeux*, et dont les fragments ont une tendance à se rapprocher, comme s'ils s'attiraient ; l'autre impalpable, sans pesanteur appréciable, d'une mobilité et d'une subtilité extrêmes, et produisant les phénomènes de *chaleur, de lumière et d'électricité*. La matière *pondérable* est disséminée dans l'espace en masses isolées, placées à des distances immenses les unes des autres ; les mouvements s'y propagent avec des vitesses qui ne dépassent pas 5000^m par seconde, comme dans la propagation du son à travers les solides. L'autre espèce de matière est répandue partout ; il n'y a pas de vide pour elle, et les mouvements s'y transmettent avec une rapidité extrême, par exemple, avec une vitesse de 77000 *lieues* par seconde, comme pour la lumière. Cette grande mobilité a fait comparer cette espèce de matière à un fluide, et on lui a donné le nom de *fluide impondérable*, parce que l'on n'a pas pu lui trouver de poids. La répulsion est un de ses principaux caractères.

Hypothèse de l'éther. — On a considéré longtemps les phénomènes de *chaleur, de lumière et d'électricité*, comme dus à des fluides impondérables particuliers, de sorte que, dans ce système, la chaleur était une espèce de matière, la lumière une autre espèce, etc. Mais à mesure que les horizons de la science se sont étendus, on a trouvé à faire des rapprochements de plus en plus nombreux entre ces différents ordres de phénomènes, et aujourd'hui on les regarde généralement comme produits par des mouvements imprimés à une substance unique, très-élastique et d'une densité excessivement petite, répandue dans tout l'espace, même dans le vide le plus parfait, et remplissant les pores qui séparent les molécules des corps pondérables. La *chaleur, la lumière*, ne sont

plus alors des substances, mais les résultats de mouvements vibratoires particuliers imprimés à ce fluide universel; de même que le son n'est pas une matière, mais un mouvement imprimé à la matière. L'électricité n'est aussi qu'un mouvement du même fluide, dont nous aurons plus tard à rechercher la nature. Le fluide universel a reçu le nom d'*ether*. Ce mot a été emprunté aux anciens, qui, du reste, n'y attachaient pas généralement le même sens que nous. Orphée l'emploie pour désigner le premier élément du monde; Anaxagore appelle éther le principe du feu, et Platon le qualifie de matière plus pure et plus légère que l'air.

L'éther étant répandu dans tout l'espace, on voit qu'on ne peut reconnaître par l'expérience s'il est pesant. Nous sommes relativement à cette substance comme si nous cherchions à peser l'air dans des vases criblés de trous. Il est cependant probable que l'éther est pesant, c'est-à-dire qu'il obéit à l'attraction de la matière pondérable; car les modifications qu'éprouve un rayon de lumière en traversant un cristal transparent à élasticité inégale, montrent que l'éther accumulé autour de ses molécules y possède des densités différentes suivant différentes directions; ce que l'on attribue à l'attraction inégale des groupes moléculaires sur l'éther.

L'hypothèse de l'éther, à cause de sa grande simplicité et de la facilité avec laquelle elle se prête à l'explication des phénomènes, a été généralement adoptée. Du reste, elle devient nécessaire dès qu'on renonce à la matérialité des agents impondérables. C'est surtout dans l'étude de la lumière qu'on a pu en suivre avec détail toutes les conséquences, et l'on a toujours trouvé l'accord le plus satisfaisant entre les déductions théoriques et les résultats de l'expérience.

Dans ce livre et les deux suivants, nous allons nous occuper des phénomènes de la *chaleur*, de l'*électricité* et de la *lumière*, et nous mettrons en regard, toutes les fois que l'occasion s'en présentera, les faits et les lois observées, avec les explications théoriques qui s'y rapportent.

CHAPITRE PREMIER

DE LA CHALEUR EN GÉNÉRAL

MESURE DES TEMPÉRATURES

La chaleur est une agitation vive des parties insensibles du corps qui agit sur nous de manière que nous disons qu'il est chaud. De sorte que ce qui, dans la sensation, est *chaleur*, n'est dans le corps que du *mouvement*.
LOCKE.

§ 1. — DE LA NATURE DE LA CHALEUR

813. Définition et effets généraux de la chaleur. — Les impressions de chaud et de froid sont familières à chacun de nous. La cause qui les détermine par son action plus ou moins intense a reçu le nom de *chaleur*. La chaleur est un agent universel répandu dans toute la nature; elle remplit l'espace, qu'elle traverse dans tous les sens, après avoir jailli du soleil, des étoiles, et s'accumule dans les corps. C'est elle qui anime l'univers, car sa présence est nécessaire à l'existence des êtres organisés. Les pays du globe dans lesquels l'influence de la chaleur ne se fait sentir que faiblement, languissent dans un état de désolation frappant; le voyageur n'y rencontre que des amas de neiges et de glaces, et çà et là quelques végétaux inférieurs, et quelques animaux privilégiés errant au milieu de solitudes glacées, comme pour attester la puissance de fécondité de la nature.

Les êtres organisés ne sont pas les seuls à ressentir l'influence de la chaleur : les corps bruts eux-mêmes cèdent à son action; elle les décompose, en séparant les molécules d'espèce différente réunies dans les combinaisons, ou bien elle détermine l'union de ces molécules, qui, sans son intervention, resteraient mélangées sans se combiner; effets que la chimie étudie tout particulièrement. La chaleur peut encore changer l'état des corps; elle détermine la fusion des solides, fait passer les liquides à l'état de gaz, et quand elle ne produit pas des effets aussi intenses, elle agit encore pour écarter les molécules, tandis que ces molécules se rapprochent quand son action diminue d'intensité. Enfin, c'est par un effet de la chaleur que les molécules sont retenues à distance les unes des autres, et ne peuvent venir jusqu'au contact en obéissant à la force de cohésion (I, 172).

L'industrie tire chaque jour parti des effets variés que produit la chaleur, et une multitude d'arts dépendent de la connaissance de ses propriétés; aussi, les hommes qui ont ignoré l'usage du feu, sont-ils restés ignorants et sauvages. Certains peuples, saisis d'admiration pour les effets merveilleux produits par cet agent, soit sur les êtres vivants, soit sur les corps bruts exposés à son action, l'ont adoré sous le nom de *feu*. D'autres ayant remarqué que le soleil, par sa chaleur, préside au développement de la vie végétale et animale, engendre les grands mouvements de l'atmosphère, alimente les lacs et les rivières en élevant l'eau des mers à l'état de vapeur pour la laisser ensuite retomber sous forme de pluie, ont vu dans cet astre la manifestation la plus éclatante et la plus palpable de la divinité, et le culte du soleil, sous le nom de Sabéisme, est devenu un des plus purs et des plus élevés de l'antique Orient.

814. De la nature de la chaleur. — Il résulte de l'expérience que la chaleur peut se propager de deux manières différentes : 1^o à distance, à travers l'espace vide ou rempli par certains milieux qui ne s'opposent pas à son passage, comme l'air, qui laisse arriver jusqu'à nous la chaleur du soleil ou celle qui émane de nos foyers; 2^o à travers la substance même des corps, de molécule à molécule, comme lorsque la chaleur de l'eau bouillante versée dans un vase, en traverse les parois pour arriver à sa surface extérieure. La chaleur est donc un agent très-subtil, de plus très-élastique, comme le prouve la facilité avec laquelle elle se réfléchit sur les corps polis.

Quand la chaleur pénètre et chauffe les corps, elle n'augmente pas leur poids; c'est pourquoi on l'a qualifiée de *fluide impondérable*. On a fait un grand nombre d'expériences à ce sujet. Boyle ayant vu certains métaux augmenter de poids par la calcination, supposait que l'agent de la chaleur était pesant; mais nous savons aujourd'hui que cette augmentation de poids est due à l'absorption de l'oxygène de l'air, qui se combine avec les parties superficielles de ces métaux. Nollet avait, dès l'abord, soupçonné quelque cause de ce genre. Boerhaave avait trouvé qu'un boulet de fer rouge ne pesait pas plus que lorsqu'il était froid; mais, comme le mouvement ascendant de l'air dilaté autour de ce corps pouvait soulever la balance, l'expérience n'était pas concluante. Lavoisier, Rumford, Guiton de Morveau, ayant renfermé une certaine quantité d'eau dans un matras de verre scellé hermétiquement, lui trouvèrent le même poids, quand l'eau était congelée et quand elle était à l'état liquide. Or, quand l'eau se congèle, elle abandonne une quantité énorme de chaleur, dont nous donnerons une idée en disant qu'elle ferait rougir à blanc un poids égal d'or; et cette quantité de chaleur n'avait pas de poids appréciable.

Citons encore l'expérience suivante, faite en 1811 : on réunit deux cornues par le col, et l'on ferma hermétiquement les joints. L'une des cornues contenait de l'acide sulfurique concentré, et l'autre de l'eau. On pesa exactement cet appareil, puis, en l'agitant, on mélangea peu à peu les deux liquides. Il se dégagait alors une énorme quantité de chaleur, qui se dissipa bientôt, et la déperdition de cette chaleur ne modifia pas le poids de l'appareil.

815. Sources de chaleur. — La chaleur, qui est impondérable, ne peut

ependant se manifester sans l'intervention de la matière pondérable, et un effet calorifique provient toujours d'un corps pondérable qui contient cette chaleur ou dans lequel elle prend naissance, comme le soleil, les corps en combustion. La chaleur ne peut se produire dans le vide; quand on l'y rencontre, c'est qu'elle y a été lancée par quelque corps; la chaleur n'y peut donc exister qu'à l'état de rapide propagation; on ne la connaît pas isolée et en repos.

Les corps d'où émane la chaleur se nomment *sources de chaleur*. Il y a des sources permanentes comme le soleil. Il en est d'autres que l'on peut faire naître à volonté; par exemple, en frottant vivement deux corps l'un contre l'autre, en les comprimant fortement, ou en les soumettant à des chocs, on fait apparaître de la chaleur. En général, il y a mouvement de chaleur, ordinairement augmentation, toutes les fois que les molécules ou les atomes d'un corps sont déplacés les uns par rapport aux autres. C'est surtout pendant les actions chimiques, dans lesquelles les atomes éprouvent des déplacements relatifs considérables, qu'il se dégage de grandes quantités de chaleur. C'est aussi aux actions chimiques, et particulièrement à la combustion, que nous demandons la chaleur nécessaire à l'industrie et aux usages domestiques.

816. De la chaleur dans les corps. — Les corps chauds envoient de la chaleur en tous sens, et cette chaleur peut être reçue et absorbée par les corps plus froids qui sont à proximité. Ces corps présentent des aptitudes différentes à laisser pénétrer la chaleur par leur surface pour s'échauffer, ou à la laisser sortir pour se refroidir; à la laisser cheminer à travers leur masse, et enfin à en contenir des quantités plus ou moins grandes. Ce qu'on exprime en disant qu'ils ont des *capacités* différentes pour la chaleur.

Nous voyons par ce qui précède, que l'on peut considérer la chaleur, d'après sa manière d'être : 1^o hors des corps et en mouvement rapide à travers l'espace, auquel cas elle constitue ce que l'on nomme la *chaleur rayonnante*; 2^o dans les corps, où elle peut être en mouvement en se propageant de molécule à molécule à travers leur substance; ou bien en repos apparent. L'état d'équilibre calorifique, dans lequel un corps ne perd ni ne gagne de chaleur, constitue la *température* de ce corps.

817. Hypothèses sur la nature de la chaleur. — Les anciens, qui ne connaissaient que les effets les plus communs de la chaleur, n'ont formulé sur sa nature que des idées vagues ou erronées. Il est même souvent assez difficile de démêler leur véritable pensée au milieu des explications confuses qu'ils ont données. Epicure et Démocrite regardent la chaleur comme une matière particulière; c'est la substance du feu même, réduite en atomes. Homberg, Lemery, Sgravesande et principalement Boerhaave, la considèrent comme une substance disposée en corpuscules flottant dans tout l'espace, et ne se manifestant que dans certaines circonstances favorables; par exemple, quand ces corpuscules sont rassemblés, comme dans le frottement, ou quand ils sont disposés en trainées ou en *rayons*, de manière que, poussés à la suite les uns des autres, ils viennent choquer les corps exposés à leur action. Bacon, Boyle, Descartes, Newton ne considèrent

plus la chaleur comme une matière, mais, à ce qu'il semble, comme un mouvement vibratoire. Aujourd'hui, il ne reste plus en présence que deux systèmes : celui de l'émission et celui des ondulations.

Systèmes de l'émission. — Dans ce système, le plus ancien, adopté spécialement par les chimistes de la fin du dernier siècle, la chaleur est attribuée à une substance particulière impondérable, qui est lancée par les corps chauds avec une grande vitesse, rebondit sur la surface des corps qu'elle rencontre, ou les pénètre et se combine avec leurs molécules en proportions diverses. Les parties de cette substance se repoussent mutuellement. Lors de la réforme de la nomenclature chimique, on lui a donné le nom de *calorique*.

Système des ondulations. — Dans le second système, développé par Bernouilli, Euler et surtout par Rumford, puis soutenu par Davy, et adopté généralement aujourd'hui, la chaleur n'est plus une matière, mais un mouvement. Rumford fut surtout amené à cette opinion par des expériences, publiées en 1798, dans lesquelles il vit le frottement de deux corps développer indéfiniment de la chaleur. Ce système, est connu sous le nom de *système des ondulations*; on y regarde la chaleur comme le résultat de mouvements vibratoires excités dans l'éther (812) par les molécules des corps chauds, qui sont elles-mêmes dans un état d'agitation particulier. Ces mouvements se propagent à travers l'éther extérieur, avec une vitesse prodigieuse, et se communiquent aux molécules des corps plus froids, qui alors sont échauffés. Dans ce système, on conçoit facilement pourquoi la chaleur n'augmente pas le poids des corps, et comment elle se dégage en quantité inépuisable quand on ébranle leurs molécules par le frottement, ou par tout autre moyen. Il existe un système semblable pour les phénomènes lumineux. Or, les lois suivant lesquelles la chaleur se propage au dehors des corps sont exactement les mêmes que celles que suit la lumière. Si donc le système des ondulations doit être adopté pour les phénomènes lumineux (et nous verrons dans l'optique qu'il en est ainsi), on doit aussi l'adopter pour expliquer les phénomènes de la chaleur.

Quant aux effets que la chaleur produit dans les corps, ils n'ont pas d'analogue en optique, mais la liaison entre les deux ordres de phénomènes n'est pas pour cela rompue; car la chaleur est souvent associée à la lumière, et forme alors ce qu'on appelle la *chaleur lumineuse*. Quand les vibrations de l'éther libre sont assez intenses pour produire sur nos organes la sensation de chaleur, ou pour augmenter l'amplitude des vibrations des atomes des corps, il y a effet calorifique. Si ces vibrations sont trop faibles pour produire de semblables effets sur les corps, et si elles n'ébranlent au plus que l'éther interposé entre leurs atomes, elles ne peuvent agir que sur l'organe de la vue et constituent la lumière dépourvue de chaleur.

Quand un corps cède de la chaleur à un autre plus froid, il lui communique une partie de la force vive de vibration de ses propres molécules, qui dès lors vibrent moins fortement; de même qu'un diapason cesse bientôt de résonner quand on l'appuie sur un corps élastique auquel il communique une partie de son mouvement vibratoire.

Si l'on développe de la chaleur dans un corps par un moyen mécanique, frottement, choc, compression, une partie du travail mécanique semble disparaître; mais il n'en est rien, il n'a fait que se transformer, et on en trouve l'équivalent dans le mouvement vibratoire constituant la chaleur engendrée. Réciproquement, quand la chaleur produit du travail mécanique extérieur, comme le fait celle que contient la vapeur, ce n'est qu'en s'affaiblissant, c'est-à-dire en perdant de sa force vive calorifique.

L'étude des phénomènes de la chaleur peut être poursuivie sans qu'on ait besoin d'adopter l'un ou l'autre des deux systèmes en présence; c'est ainsi que nous procéderons d'abord, tout en rappelant, quand l'occasion s'en présentera, comment les faits se concilient avec l'idée que la chaleur est un mouvement. Après avoir fait connaître les moyens de mesurer les températures, nous nous occuperons de la propagation de la chaleur, soit à travers l'espace, soit dans la masse même des corps, nous étudierons son action sur les corps, pour les dilater ou changer leur état, et nous évaluerons les quantités de chaleur nécessaires pour produire ces divers effets. Après avoir ensuite exposé la théorie des vapeurs, nous examinerons quels sont les divers moyens de produire de la chaleur; c'est alors que nous appuierons de preuves convaincantes la théorie mécanique de la chaleur, dont nous n'avons fait qu'indiquer les principaux traits, et que nous montrerons comment cette théorie rapproche de la manière la plus heureuse les divers phénomènes que produit la chaleur dans les corps.

§ 2. — MESURE DES TEMPÉRATURES

I. De la température en général.

818. Définition de la température. — *Nous définirons la température d'un corps, un état d'équilibre particulier, dans lequel ce corps ne perd ni ne gagne de chaleur, et auquel correspond un certain volume déterminé de ce corps.* Si l'on pouvait évaluer à chaque instant le volume du corps, on aurait un moyen d'apprécier les températures successives qu'il posséderait. On fait varier la température d'un corps, en lui ajoutant ou en lui retirant une certaine quantité de chaleur. La température d'un espace vide, qui ne peut posséder de chaleur par lui-même (815), est produite par la chaleur qui le traverse, après avoir été lancée par les corps environnants; c'est la température que prendrait un corps plongé dans cet espace. C'est ainsi que la température d'un point des espaces célestes provient de la chaleur qui passe par ce point, après avoir jailli du soleil et des étoiles.

Plusieurs corps sont à la même température quand, plongés dans le même milieu, ils ne perdent ni ne gagnent de chaleur. Il ne faudrait pas croire qu'on pût constater cette égalité, en touchant successivement ces corps avec la main, et comparant les impressions qu'ils produisent; car, pour qu'il y ait impression, il

faut que la température de la main soit différente de celle du corps touché, et alors il n'y a plus équilibre de chaleur, et l'effet produit dépend de la facilité avec laquelle la chaleur se transporte de l'intérieur du corps à sa surface, et, de celle-ci à la main, ou suit la route inverse, facilité qui dépend de la nature de la substance et de l'état de sa surface.

On ne peut pas davantage juger, avec la main, de la température d'un corps; l'effet dépendant de l'état momentanément de l'organe, de sorte qu'un même corps peut paraître chaud ou froid, suivant que la main est froide ou chaude. Par exemple, si, après avoir plongé la main droite dans de l'eau glacée et la main gauche dans de l'eau brûlante, on les plonge ensuite toutes les deux dans de l'eau tiède, la main droite éprouvera une impression de chaleur, et la main gauche une impression de froid. Les impressions de chaud et de froid sont donc relatives; un corps paraît chaud quand il cède de la chaleur à nos organes, et froid, quand il leur en enlève; et cela dépend de leur état actuel.

819. Dilatation. — Quand plusieurs corps différents sont placés dans un espace dont la température est plus basse ou plus élevée que la leur, ils perdent ou gagnent de la chaleur jusqu'à ce que la température soit partout la même. En même temps leur volume change; il augmente si la température s'élève, et diminue quand il y a refroidissement. L'augmentation de volume par la chaleur se nomme *dilatation*.

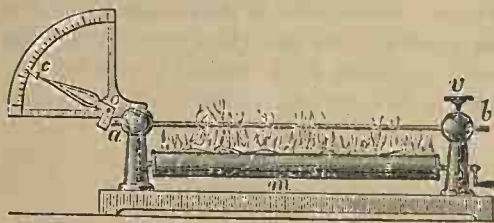


Fig. 612.

Pour mettre en évidence la dilatation d'une barre suivant sa longueur, on se sert du *pyromètre à levier ou à cadran* (fig. 612). La barre *ab* est supportée par deux colonnes *a, b*; en *b* elle est fixée invariablement par la vis de pression *v*, tandis que, en *a*, elle peut se mouvoir librement à travers la colonne. L'extrémité *a* s'appuie sur le petit bras d'un levier coudé *aoc*. Si l'on chauffe la barre *ab* au moyen d'une lampe à alcool *m*, elle se dilate, l'extrémité *a* pousse le levier *ao*, et fait monter le bras *oc*, dont l'extrémité *c* parcourt un arc divisé. Quand on éteint l'alcool, la barre se contracte et le bras *oc* redescend par son propre poids.

Pour prouver la dilatation dans tous les sens, on se sert du *pyromètre de Sgravesande*, déjà décrit. La dilatation des liquides et des gaz se montre au moyen de tubes soudés à des réservoirs remplis, de liquide ou de gaz, comme nous l'avons déjà expliqué (I, 37).

L'expérience montre que les variations de volume produites par un même échauffement ne sont pas les mêmes pour tous les corps. Par exemple, si l'élévation de température est telle que du mercure augmente de $\frac{1}{5500}$ de son volume, du cuivre augmenterait de $\frac{1}{20300}$; du verre, de $\frac{1}{38700}$; de l'air, de $\frac{1}{273}$.

Capacité pour la chaleur. — De plus, il ne faut pas la même quantité de chaleur pour élever également la température de poids égaux de différentes substances. Si, par exemple, on plonge dans l'eau des poids égaux de fer et d'antimoine pris à une même température plus basse que celle de l'eau, les deux corps s'échaufferont aux dépens de la chaleur du liquide, qui se refroidira, jusqu'à ce que la température soit partout la même. Le fer prendra, dans cette expérience, les $\frac{2}{3}$ de la chaleur enlevée à l'eau, et l'antimoine, l'autre tiers. On appelle *capacité des corps pour la chaleur*, la faculté qu'ils possèdent d'absorber et de retenir ainsi des quantités plus ou moins grandes de chaleur, quand on élève leur température dans une proportion déterminée. On peut comparer les corps qui ont même température, à des vases remplis d'un liquide s'élevant au même niveau, et pouvant contenir des quantités très-différentes de ce liquide. Pour élever les niveaux d'une même hauteur dans ces vases, il faut ajouter des quantités différentes de liquide, suivant leur diamètre.

De la mesure des températures. — Les températures s'évaluent au moyen des effets que la chaleur produit sur les corps. L'effet le plus général est la dilatation; c'est aussi le plus facile à observer; la plupart des instruments destinés à mesurer les températures sont donc basés sur ce phénomène. Les solides se dilatent très-peu, on ne les emploie que pour les très-hautes températures. Les gaz se dilatent beaucoup, ce qui donnerait aux instruments des dimensions embarrassantes; on ne les emploie généralement que pour les faibles variations de température. Cependant, on en fait aussi usage pour celles qui sont très-élevées, parce qu'ils ne peuvent plus changer d'état. Pour les températures modérées, on se sert de liquides, qui se dilatent plus que les solides et dont la fluidité se prête facilement à la mesure des variations de volume.

II. Thermomètres de dilatation.

820. Du thermomètre. — L'instrument employé le plus souvent à la mesure des températures est le *thermomètre*. Le thermomètre à liquide consiste essentiellement en un réservoir de verre auquel est adapté un tube capillaire divisé. Le liquide remplit le réservoir et une partie du tube. Quand ce liquide se dilate, l'augmentation se porte tout entière dans le tube, où le niveau se déplace d'autant plus que ce tube est plus étroit et la capacité du réservoir plus grande.

Quand on veut prendre la température d'un fluide, on y plonge le thermomètre jusqu'à ce que son niveau reste stationnaire; et la température indiquée par l'instrument est celle du milieu et des corps qui y sont plongés. S'il s'agit d'un corps solide, on y creuse une cavité, on la remplit de mercure et l'on y plonge l'instrument.

Dans cette manière d'opérer, il y a une cause d'erreur provenant de ce que le thermomètre, qui est ordinairement plus froid ou plus chaud que le corps, lui enlève

ou lui cède de la chaleur ; la température indiquée est donc celle qui existe après la modification, à moins que cette température ne se rétablisse à chaque instant. S'il n'en est pas ainsi, il faut employer des thermomètres dont la masse soit insensible, ou au moins très-petite, par rapport à celle du corps, ou faire une correction par une méthode que nous indiquerons plus tard (1058).

Les liquides que l'on emploie le plus souvent, dans la construction des thermomètres, sont le *mercure* et l'*alcool*.

821. THERMOMÈTRE A MERCURE. — Pour construire un thermomètre à mercure, on choisit un tube capillaire, aussi bien calibré que possible, à l'un des bouts duquel on soude, à la lampe, un réservoir cylindrique de verre, ou bien on souffle une boule.

Pour introduire du mercure dans ce réservoir, il faut employer des artifices particuliers, l'air de l'intérieur ne pouvant diviser la colonne capillaire pour s'échapper. On soude donc à

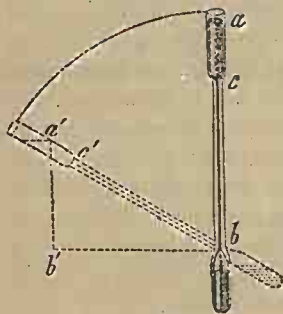


Fig. 613.

l'extrémité *c* (fig. 613), un gros tube *ac*, servant d'entonnoir, dans lequel on verse du mercure bien pur. L'air contenu dans l'instrument supporte alors la pression atmosphérique augmentée du poids de la colonne *ac*; il cède, le mercure descend dans le tube jusqu'en *b*, puis tombe dans le réservoir, jusqu'à ce que l'air qui s'y trouve ait acquis, par diminution de volume, un excès de pression équivalent à la pression de la colonne de mercure *ab*. Si alors on incline l'instrument dans la



Fig. 614.

position *ba'*, l'air du réservoir ne supporte plus, en sus de la pression atmosphérique, que la pression d'une colonne égale à *a'b'*; il refoule le mercure de *b* en *c'*, et sort en partie à travers le gros tube *c'a'*. Si l'on redresse l'appareil, l'air resté dans le réservoir cède, et une certaine quantité de liquide pénètre encore dans l'intérieur. En inclinant de nouveau le tube, on fait sortir une nouvelle portion d'air. En continuant ainsi, on parvient à remplir presque entièrement le réservoir; mais non totalement, parce que le peu d'air qui reste à la fin, ne peut refouler le mercure jusqu'en *c'*; l'augmentation qu'éprouve cet air étant alors très-grande par rapport à son faible volume.

Pour achever de remplir le thermomètre, on fait bouillir le mercure, en plaçant l'instrument sur une grille inclinée, *ac* (fig. 615), et en mettant des charbons ardents autour du réservoir, et quelques-uns sous l'entonnoir *a*. Quand on laisse ensuite refroidir l'appareil, les vapeurs de mercure se condensent, et le liquide chaud de l'entonnoir, poussé par la pression atmosphérique, remplit totalement l'instrument. On a en même temps purgé l'intérieur de l'humidité et de l'air qui adhéraient aux parois.

On peut encore procéder comme il suit : On soude à l'extrémité du tube, une ampoule de verre *a* (fig. 614), dans laquelle on introduit du mercure en l'échauffant pour en chasser l'air, puis plongeant la pointe *o* dans du mercure, qui y pénètre pendant le refroidissement. On fait ensuite sortir l'air du réservoir *r* en l'échauffant à son tour, on le laisse refroidir ; du mercure s'y introduit, et on achève en portant l'appareil à l'ébullition, comme ci-dessus.

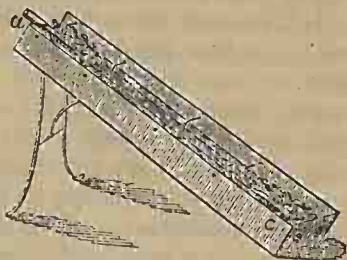


Fig. 615.

Quand le thermomètre est rempli, il faut en régler la course, c'est-à-dire en faire sortir une quantité de mercure telle que le niveau ait la faculté de se déplacer entre certaines limites. Pour cela, on chauffe le réservoir ; le mercure dilaté sort en partie, et l'on arrive par tâtonnement à en laisser la quantité convenable. On ferme ensuite le thermomètre, pendant qu'il est rempli par le mercure dilaté, en fondant au chalumeau son extrémité qu'on a eu soin d'effiler préalablement. On évite ainsi de laisser de l'air, qui aurait l'inconvénient de fausser les indications quand, la colonne de mercure arrivant près de l'extrémité du tube, cet air comprimé ferait distendre le réservoir en réagissant par son élasticité. Souvent on souffle au-dessus de la pointe effilée, une petite ampoule, *a* (fig. 622), dans laquelle le mercure se rend quand la température est trop élevée, ce qui évite la rupture de l'instrument ; avec cette addition, on laisse quelquefois un peu d'air. Il peut arriver alors que cet air divise la colonne de mercure, lorsque l'instrument éprouve des secousses. Quand cet accident arrive, on attache le thermomètre à une ficelle, et on le fait tourner comme une fronde ; la force centrifuge pousse le mercure vers le réservoir, et l'air qui divise la colonne revient vers l'extrémité opposée, si le tube n'est pas trop fin.



Fig. 616.

822. Graduation du thermomètre. — Il reste à appliquer au tube, une graduation suivant des règles fixes, de manière que tous les thermomètres soient comparables entre eux, c'est-à-dire donnent les mêmes indications dans les mêmes circonstances. Pour cela, on a adopté deux températures déterminées qu'on marque sur le tube, et l'on divise ensuite l'intervalle entre les deux points qui leur correspondent, en un nombre déterminé de parties égales. Les températures adoptées sont celle de la *glace fondante* et celle de l'*eau bouillante* ; on les nomme les *points fixes* du thermomètre.

Point de la glace fondante. — Les académiciens de Florence avaient reconnu que la glace pure fond toujours à la même température, qui reste invariable pendant tout le temps de la fusion. Pour marquer cette température,

on plonge le thermomètre dans un vase assez profond pour que l'instrument y soit entièrement entouré de glace fondante (*fig. 616*). Celle-ci doit être pilée très-fin, pour que le thermomètre soit partout en contact avec elle; et, comme l'eau de fusion pourrait prendre une température supérieure à celle de la glace, on la laisse sortir par un trou pratiqué au fond du vase. Quand le niveau du mercure ne varie plus, on le marque sur le tube, que l'on soulève hors de la glace, en ayant soin d'observer le sommet de la colonne dans une direction perpendiculaire au tube, pour éviter l'erreur provenant de son épaisseur. Pour cela, on emploie une petite lunette mobile, disposée comme celle du cathétomètre. On se sert encore d'un coulant, dont on amène le plan du bord inférieur à paraître tangent au ménisque qui termine la colonne de mercure.

Point d'ébullition. — Amontons a remarqué que la température de l'eau bouillante reste la même pendant tout le temps de l'ébullition, quelle qu'en soit la vivacité. Cette remarque, qui paraît avoir été aussi faite vers la même époque par Renaldini, de Padoue, a fourni le second point fixe du thermomètre. Mais il faut observer que la température de l'eau bouillante n'est pas invariable comme celle de la glace fondante; elle peut changer d'une expérience à une autre, car Fahrenheit a découvert qu'elle dépend de la *pression atmosphérique*, et augmente en même temps qu'elle. On est alors convenu de prendre pour point fixe la température de l'ébullition de l'eau sous la pression de 0^m,76. De plus, Gay-Lussac ayant reconnu que la nature du vase a aussi une légère influence sur cette température, qui est plus élevée dans un vase de verre que dans un vase métallique, on est d'abord convenu de se servir d'un vase de métal. Mais depuis que Rudberg a découvert que la température de la vapeur de l'eau bouillante, pour une même pression extérieure, est indépendante de la nature du vase, on plonge le thermomètre à graduer dans cette vapeur sans lui faire toucher l'eau, qui n'a plus besoin même d'être distillée, les petites quantités de sels que l'eau commune tient en dissolution n'ayant pas d'influence sur la température de la vapeur.



Fig. 617.

On opère ordinairement avec une petite chaudière *nn* (*fig. 617*), fermée par un couvercle que surmonte un tube portant à son extrémité supérieure deux ouvertures latérales par lesquelles s'échappe librement la vapeur d'eau. Le thermomètre *t*, est soutenu dans cette vapeur qui l'enveloppe par un bouchon, de manière à être très-près de la surface de l'eau, sans la toucher. On attend que le niveau du mercure ne change plus, ce que l'on vérifie en retirant de temps en temps le tube à travers le bouchon; et, seulement un quart d'heure après, pour plus de sûreté, on marque le point où se tient ce niveau, en prenant toutes les précautions employées pour marquer le point de la glace fondante.

L'appareil (*fig. 617*) ne donne pas des résultats très-précis, la température

du cylindre étant moindre que celle de la vapeur, à cause du contact de l'air extérieur, et le thermomètre rayonnant vers cette enveloppe, de sorte que sa température peut être un peu trop basse. Pour éviter cette cause d'erreur, M. Regnault emploie l'appareil (fig. 618), qui porte une seconde enveloppe *ee*, que la vapeur est forcée de parcourir avant de s'échapper par l'ouverture *a*. Un manomètre à eau *m*, sert à constater qu'elle possède à chaque instant la même pression que l'air extérieur.

Après qu'on a marqué les points fixes, on divise l'espace qui les sépare en 100 parties d'égale capacité, qui sont aussi d'égale longueur si le tube est partout de même diamètre, et que l'on nomme les *degrés* du thermomètre. On se sert, pour cela, de la machine à diviser (I, 23). On marque *zéro* au point de la fusion de la glace, 100 au point d'ébullition de l'eau, et l'on porte des divisions de même grandeur au delà de 100 et au-dessous de zéro, et l'on compte les degrés en montant et en descendant, à partir de ce dernier point. L'échelle thermométrique ainsi établie se nomme *échelle centigrade* ou *centésimale*.

823. Correction du point d'ébullition. —

Quand la pression atmosphérique n'est pas de 760^{mm} pendant l'opération, il faut faire une correction, indiquée par Fahrenheit. Wollaston a constaté par l'expérience que, pour une différence de 27^{mm} de pression au-dessus ou au-dessous de 760^{mm}, la température d'ébullition s'élève ou s'abaisse de 1^o centigrade; et, pour les faibles variations qu'éprouve la pression atmosphérique, on peut admettre qu'il y a proportionnalité dans ces effets, et que pour chaque millimètre de pression en dehors de 760^{mm}, la température d'ébullition varie de $\frac{4}{27}$ de degré. Si donc la pression atmosphérique est de 760^{mm} ± *m*, il faudra marquer $100 \pm \frac{4}{27} m$, au point d'ébullition.

Quand on veut une plus grande précision, on consulte des tables dont nous parlerons plus tard dans lesquelles se trouvent indiquées, en dixièmes de degré, les températures d'ébullition de l'eau, pour les différentes pressions atmosphériques.

Après avoir marqué le point d'ébullition $100 \pm n$, il faudrait diviser l'espace qui le sépare du zéro, en $100 \pm n$ parties égales, ce qui serait fort incommode, *n* étant presque toujours une fraction. Il est plus simple de chercher la longueur à diviser en 100 parties. Or, si *L* est la distance, en millimètres, entre le zéro et le point d'ébullition $100 \pm n$, la longueur d'une division sera $\frac{L}{100 \pm n}$, et l'espace occupé par cent divisions $\frac{100 L}{100 \pm n}$, qui représente la longueur à diviser en 100 parties égales.

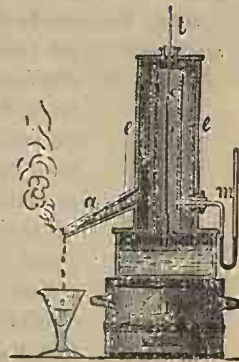


Fig. 618.

12057



Influence de la latitude. — La pression absolue de l'air n'est pas la même aux différentes latitudes, quand la colonne barométrique y marque 760^{mm}, à cause des variations de la pesanteur (I. 137). A l'équateur, la température d'ébullition, le baromètre marquant 760^{mm}, serait de 0°,082 supérieure à ce qu'elle est à Paris. M. d'Abbadie a proposé, pour les thermomètres très-précis, d'adopter la température d'ébullition pour la pression de 760^{mm}, sous la latitude moyenne de 45°. Sous une autre latitude λ , on prendrait le point d'ébullition, pour une hauteur barométrique h donnée par la formule

$$h = 760 + 1,98 \cos 2\lambda + 0,000238 H,$$

dans laquelle H est l'altitude du lieu où l'on opère. Pour Paris, on aurait $h = 759^{\text{mm}},75$.

824. Degrés de température. — Chaque division se nomme *un degré centigrade* : c'est l'unité de température. On prend donc pour cette unité la centième partie de la dilatation du mercure dans le verre, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante. Nous voyons que les températures indiquées ainsi ne sont pas absolues; ce ne sont que des différences, puisque le point de départ est choisi arbitrairement. Quand on dit d'une température qu'elle est double, triple d'une autre, on n'énonce donc qu'un résultat numérique et non un résultat physique, et l'on n'exprime pas qu'il y a deux fois, trois fois plus de chaleur dans le corps.

L'échelle du thermomètre est tracée, tantôt sur une plaque de verre, d'ardoise, de métal, sur laquelle on fixe le tube T (fig. 619), tantôt sur une bande de papier renfermée dans un gros tube de verre fixé au thermomètre, qui prend alors le nom de *thermomètre à chemise* (fig. 620), et sert principalement pour les liquides. L'échelle des thermomètres de précision est toujours tracée sur le tube même de l'instrument.

Le terme de la glace fondante sert de point de départ pour les températures; les températures inférieures se comptent en descendant, et s'indiquent en mettant le signe (—) devant les nombres qui les expriment. Ce point de départ est heureusement choisi,

car il répond à un état de crise dans la nature, dans lequel l'eau répandue partout passe de l'état liquide à l'état solide ou *vice versa*, ce qui change du tout au tout les conditions d'existence d'une foule d'êtres organisés, et les conditions d'une foule de phénomènes dans le règne inorganique.

825. Différentes échelles thermométriques. — L'échelle centigrade est



Fig. 619.



Fig. 620.

attribuée à Celsius; on en a adopté d'autres qu'il faut connaître. Dans l'échelle de Réaumur, on partage l'intervalle entre les points fixes en 80 parties égales, qui sont plus grandes que celles du thermomètre centigrade. En Angleterre et en Allemagne, on se sert principalement de l'échelle de Fahrenheit : l'intervalle entre les points fixes est divisé en 180 parties; ces divisions sont portées au-dessous du point de la glace fondante, et à la 32^e on marque 0°; de manière que, au point de la glace fondante se trouve 32°, et à l'eau bouillante $32 + 180 = 212$ °. Ce point de départ a été choisi par Fahrenheit, parce qu'il correspondait au froid le plus intense qu'il eût observé à Dantzick ¹. Il y a encore une quatrième échelle, usitée en Russie, celle de Delisle : l'intervalle des points fixes est partagé en 150 parties, et le zéro est à l'eau bouillante, de manière que le point de la glace fondante porte le numéro 150.

On voit qu'il est essentiel, quand on énonce une température, d'indiquer de quelle échelle on s'est servi. L'échelle centésimale a été spécialement adoptée par les savants français, c'est celle que nous emploierons ordinairement dans tout le cours de cet ouvrage. Du reste, il est facile de passer des indications données dans une des échelles, à celles qui leur correspondent dans une autre. Par exemple, soient C et R les nombres correspondants de *degrés centigrades* et de *degrés de Réaumur*; on a évidemment

$$100 : 80 = C : R; \quad \text{d'où } C = R \cdot \frac{5}{4}, \quad \text{et } R = C \cdot \frac{4}{5}.$$

Si l'on donne des degrés Fahrenheit, F, il faut commencer par en retrancher 32°, pour avoir le même point de départ, et l'on a, pour passer, par exemple, aux degrés centigrades :

$$180 : 100 = (F - 32) : C; \quad \text{d'où } C = (F - 32) \frac{5}{9}, \quad \text{et } F - 32 = C \cdot \frac{9}{5}.$$

La seconde formule donne le moyen de passer de l'échelle centigrade à celle de Fahrenheit; on voit qu'il faudra ajouter 32° au nombre obtenu, pour se conformer au point de départ particulier de cette dernière échelle. Si l'on fait $F = 0$, on trouve $C = -17^{\circ},777$; le zéro du thermomètre de Fahrenheit est donc à 17°,777 centigrades au-dessous de la glace fondante.

Enfin, s'il s'agit de l'échelle de Delisle, soit D le nombre de degrés donné, on le remplace par $150 - D$, pour avoir le même point de départ que pour l'échelle centigrade; et le nombre de degrés centigrades correspondant sera $C = (150 - D) \frac{3}{2}$. On aura de même le nombre $150 - D$ au moyen du nombre C; et le nombre D, en retranchant de 150, la quantité $150 - D$.

826. Thermomètres de précision. Division des tubés. — Quand on

¹ Fahrenheit obtenait d'abord son point de départ, au moyen d'un mélange de glace et de sel ammoniac, et ce n'est que plus tard qu'on a reconnu que la température de la glace fondante correspondait à 32°.

veut construire un thermomètre très-précis, la division du tube en parties d'égale capacité demande des précautions particulières. On choisit d'abord un tube aussi bien calibré que possible, ce qu'on vérifie en y faisant marcher une petite colonne de mercure, qui doit avoir partout à peu près la même longueur. On y introduit ensuite une colonne de mercure nm (fig. 621), dont on marque sur le tube les extrémités m et n ; on la pousse ensuite en $n'm'$, et l'on marque les points n' et m' . Les volumes compris dans les longueurs mn , $m'n'$ sont évidemment égaux. Si maintenant la colonne de mercure a été choisie assez longue pour que la distance mm' soit très-petite, on pourra regarder le tube comme parfaitement cylindrique dans cet espace; et en divisant la longueur mm' en deux parties égales, le point de division o partagera le volume nm' en deux portions aussi égales. On divisera de même chaque moitié on , on' en deux parties d'égale capacité, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on obtienne des subdivisions assez petites pour qu'on puisse les partager en parties d'égale longueur qui soient en même temps d'égale volume.

— Ce procédé est de Gay-Lussac. Despretz en a imaginé un autre, qui consiste à faire mouvoir une petite colonne de mercure dans le tube, de manière que son extrémité de droite vienne prendre la place qu'occupait celle de gauche, et à marquer dans chaque position les extrémités. On fait mouvoir la colonne de mercure, en imprimant des secousses au tube, ou en comprimant de petites vessies attachées à ses extrémités.

M. Regnault a notablement perfectionné cette méthode¹. Le tube, choisi avec soin et bien propre en dedans², est placé sur la machine à diviser (I, 23), de manière à pouvoir tourner bien exactement sur lui-même. Une petite lunette à réticule, fixée au chariot qui porte le tracelet, sert à déterminer exactement les extrémités de la colonne de mercure contenue dans le tube. On prend note des positions de la tête de la vis quand on vise à ces extrémités, que l'on marque avec un pinceau fin. On fait ensuite marcher la colonne de manière que son extrémité de droite coïncide avec le point qu'occupait celle de gauche, on vise ces deux extrémités avec la lunette transportée de l'une à l'autre par le mouvement de la vis, on les marque sur le tube, et l'on prend note du nombre de tours; et ainsi de suite, jusqu'à ce que le tube soit entièrement divisé. On le recouvre ensuite d'un vernis de graveur, qui est assez transparent pour laisser voir les marques faites au pinceau, et l'on divise l'intervalle entre ces marques en un nombre déterminé de parties égales, en portant d'abord le tracelet sur l'une des marques, et plaçant la tête de la vis dans la position qu'elle avait lorsque cette marque a été faite, position dont on a pris note. Les traits marqués au pinceau n'ont d'autre objet que de faciliter la recherche des limites des intervalles d'égale capacité que

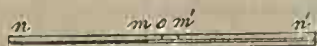


Fig. 621.

¹ Voir l'exposé fait par M. I. Pierre, *Ann. de ch. et de phys.*, 3^e série, t. V, p. 42.

² Quand le tube n'est pas trop fin, on y fait passer de l'acide nitrique pur et concentré, puis de l'eau distillée. Cette opération devient difficile quand le tube est très-capillaire.

l'on a déterminés. Le tracelet marque les traits de division sur le vernis ; on grave les numéros avec une pointe, puis on expose le tube, dans une cuve de plomb, aux vapeurs de l'acide fluorhydrique. Partout où le vernis a été rayé, les vapeurs attaquent le verre, et les traits se trouvent gravés. On vérifie ensuite la division, au moyen d'une colonne de mercure que l'on fait mouvoir dans le tube, et qui doit, dans toutes les positions, contenir le même nombre de divisions.

Capacité du réservoir. — Le tube une fois divisé, on souffle une boule à son extrémité, ou bien on y soude un réservoir cylindrique dont les dimensions doivent être calculées, de manière que le tube contienne le nombre de *degrés* que l'on désire. Pour faire ce calcul, il faut connaître la fraction de son volume à 0° dont se dilate le mercure dans le verre, pour un degré centigrade, et chercher le volume d'une division du tube, ou, ce qui revient au même, le poids du mercure qui la remplirait. Pour cela, on pèse le tube vide, puis contenant une colonne de mercure qui s'étend dans un nombre n de divisions. La différence des pesées donne le poids p du mercure seul ; alors $p : n$ est le poids du mercure qui occupe une seule division. Veut-on que les 100 degrés soient compris dans N divisions ? le mercure qui remplirait ces N divisions pèserait $N \frac{p}{n}$, et son volume serait

$N \frac{p}{nd}$, en appelant d son poids spécifique à la température de l'expérience.

Cette quantité représente l'augmentation que devra éprouver le mercure contenu dans le réservoir, quand sa température passera de 0° à 100°. Soit V le volume inconnu de ce mercure, et k la fraction de son volume dont il se dilate dans le verre, pour 1° ; la dilatation du volume V , entre 0° et 100°, sera $k \cdot V \cdot 100$; on aura donc

$$k \cdot V \cdot 100 = \frac{Np}{nd} ; \quad \text{d'où} \quad V = \frac{Np}{100 ndk} .$$

Quand le réservoir est sphérique, on a $V = \frac{4}{3} \pi D^3$, d'où l'on déduit le diamètre D ; et, s'il est cylindrique, on a $V = \frac{1}{4} \pi D^2 h$, d'où l'on tire approximativement la longueur h , en se donnant le diamètre D .

Les divisions du thermomètre ainsi construit ne représentent pas des degrés, mais il est toujours facile, par la méthode que nous avons indiquée (825), de traduire les indications de cette échelle arbitraire en degrés centigrades, quand on sait combien il y a de divisions entre les deux points fixes. Ordinairement on calcule une table, dans laquelle la transformation se trouve faite d'avance pour chaque division du tube. Les fractions se calculent au moyen d'une simple proportion.

L'échelle des thermomètres de précision est tracée sur le tube même, comme on le voit (fig. 622). Quand on observe l'instrument, il faut, pour se mettre à l'abri des effets de parallaxe produits par l'épaisseur du tube, se servir d'une petite lunette à micromètre, dirigée perpendiculairement à la tige, et mobile sur une règle divisée. Le cathétomètre convient bien à cet usage, et, de plus, son

vernier permet d'évaluer les fractions de division du tube. Il y a des thermomètres qui donnent, par ce moyen, les centièmes de degré. L'emploi d'une lunette permet aussi d'observer de loin, ce qui éloigne l'influence que pourrait avoir sur le mercure, la chaleur rayonnée par l'observateur.

827. Graduation par comparaison. — Quand on a construit un bon thermomètre étalon, on peut s'en servir pour en graduer d'autres par comparaison. Pour cela, on plonge l'étalon, avec l'instrument à graduer, dans un même bain dont on change successivement la température, en ayant soin de la maintenir constante pendant quelque temps, et l'on marque au niveau du mercure, sur l'instrument à graduer, le nombre de degrés indiqués par l'étalon. Quand on a obtenu ainsi un certain nombre de points assez rapprochés, on divise les espaces qui les séparent en parties égales. Ce moyen s'emploie principalement quand on veut des thermomètres ne comprenant qu'un petit nombre de degrés, auxquels on donne de grandes dimensions, pour pouvoir en apprécier les petites fractions.

Dans la pratique, il est très-difficile de conserver pendant quelque temps une température constante et uniforme dans le bain, surtout quand cette température dépasse notablement celle de l'air extérieur, quoiqu'on ait soin d'agiter vivement le liquide, d'entourer le vase de matières laissant passer difficilement la chaleur, et qu'on cherche à remplacer celle qui se perd, au moyen d'une lampe à alcool placée en dessous à une distance convenable. On voit donc que, toutes les fois qu'on voudra avoir un thermomètre précis, il faudra le graduer directement.

828. Dilatation du mercure dans le verre. — Voici comment on mesure la dilatation du mercure dans le verre, quantité dont nous avons fait usage pour le calcul du réservoir. On emploie pour cela un tube thermométrique muni de son réservoir et divisé en parties d'égale capacité. On évalue le rapport entre le volume du réservoir et celui d'une division prise pour unité, par la même méthode que pour le piézomètre (I, 343); on remplit l'appareil de mercure, et l'on y marque les points fixes. Le nombre de divisions compris entre ces deux points donne le nombre d'unités de volume

dont s'est dilaté le mercure, de 0° à 100°. Par exemple, si ce nombre est n , et si N représente le nombre de divisions qui correspond au volume du réservoir jusqu'au point où s'arrête le niveau dans la glace fondante, on aura $n : N$, pour la dilatation rapportée à l'unité de volume, et $\frac{n}{100 \cdot N}$, pour une augmentation de température de 1° seulement. Ce calcul suppose que la dilatation est la même pour chaque degré, ce qui a lieu à fort peu près, comme nous le verrons en étudiant les dilatations.

Thermomètre à poids. — On peut arriver au même résultat par des pesées,



Fig. 622.

au moyen d'un instrument sans graduation, qui peut en même temps servir de thermomètre, et que l'on nomme *thermomètre à poids*. Il consiste en un simple réservoir r (fig. 623), terminé par un bec capillaire recourbé o . Après avoir pesé l'instrument, on le remplit de mercure que l'on fait bouillir, et on le plonge dans la glace fondante en tenant l'orifice o enfoncé dans du mercure pur et sec. Bientôt l'appareil est entièrement rempli de mercure à la température de 0° . On le pèse alors : soit P le poids du mercure seul. On plonge ensuite l'instrument dans un liquide dont la température t est connue, et l'on recueille le mercure que la dilatation fait sortir. Soit p le poids de ce mercure, $P - p$ sera le poids du mercure restant. Or ce mercure, étant supposé ramené à 0° , laissera au-dessus de lui un espace vide on , dont le volume représente sa contraction dans le verre, en passant de t° à 0° , ou sa dilatation de 0° à t° . Or les volumes peuvent être représentés par les poids de mercure à 0° qui les occupent. p représente donc la dilatation dans le verre, du volume $P - p$ pour t° ; et $\frac{p}{(P - p)t}$ représente cette dilatation pour 1° et pour l'unité de volume. On a trouvé ainsi, pour le verre ordinaire,

$$\frac{p}{(P - p)t} = \frac{1}{6480}.$$

Si l'on suppose connue la dilatation du mercure dans le verre, l'équation précédente donnera la valeur de t , supposée inconnue. On pourra donc évaluer la température au moyen d'un instrument sans graduation, et en se servant de la balance. Le thermomètre à poids a été imaginé par Dulong et Petit. Son usage repose sur une donnée numérique dont la valeur devra être établie au moyen de l'instrument lui-même, parce que cette valeur dépend de la nature du verre, comme nous allons le voir.

829. Influence du verre sur la marche des thermomètres. — Les mouvements de la colonne du thermomètre sont le résultat des dilatations combinées du mercure et du verre qui le contient. Or, les différentes espèces de verre ne se dilatent ni également ni suivant la même loi. C'est pourquoi des thermomètres construits avec soin peuvent n'être pas d'accord, surtout dans les hautes températures. M. Regnault a trouvé, par exemple, les résultats suivants avec deux thermomètres en verre et en cristal :

Thermomètre en cristal.	0°	100°	491,66	254,57	282,50	315,28	340,07
Thermomètre en verre.	0	100	490,51	251,87	279,08	310,69	333,72
Différences.	0	0	1,15	2,70	3,42	4,59	6,35

Jusqu'à 100° , les deux instruments sont d'accord; les différences augmentent ensuite avec la température. M. I. Pierre a reconnu que des différences peuvent



Fig. 623.

se manifester au-dessous de 100° ; car il a vu un thermomètre à réservoir de cristal être toujours en avance de quelques centièmes de degrés sur un thermomètre à réservoir de verre. Les différences ne pouvaient provenir des erreurs de graduation; car, ayant changé les tiges de réservoir, le résultat est resté le même, les indications avec le réservoir de cristal étant toujours les plus élevées. Il faut donc, autant que possible, former les thermomètres avec la même espèce de verre, si l'on veut qu'ils restent d'accord dans les hautes températures.

330. Déplacement du zéro. — Quand on plonge dans la glace fondante un thermomètre construit depuis longtemps, on voit le mercure se tenir un peu au-dessus du point marqué zéro; la différence peut aller à 2° . Ce fait a été bien établi, vers 1823, par Bellani, en Italie, et par Flaugergues, en France. Jusque-là on l'avait attribué à des erreurs de graduation. On a ensuite invoqué la pression atmosphérique qui, ne se faisant sentir qu'à l'extérieur du réservoir, le comprimait de manière à diminuer, à la longue, sa capacité. Mais Despretz ayant laissé le tube ouvert, le résultat fut le même. Legrand a trouvé la véritable explication du phénomène dans la trempe du verre, refroidi assez rapidement après l'ébullition du mercure. Cette trempe augmente la capacité du réservoir, et il se fait un travail moléculaire qui diminue peu à peu cette capacité, travail intime dont nous avons déjà fait mention (I, 548). Legrand a constaté que ce mouvement intérieur, d'abord rapide, se continue de plus en plus lentement, pendant des mois et même des années. Si alors on porte l'instrument à la température de l'ébullition du mercure, le zéro reprend sa première position. On peut éviter son déplacement, en faisant bouillir le mercure dans un bain d'huile, dans lequel on le laisse refroidir, l'huile se refroidissant très-lentement dans un bain de sable, qui a servi à la chauffer.

Despretz a remarqué que le déplacement du zéro peut continuer pendant quatre à cinq ans. De plus, il a constaté ce fait important, que les variations de température auxquelles est soumis un thermomètre, suffisent pour déplacer le zéro, surtout quand elles s'écartent beaucoup de la moyenne. Le déplacement peut être

de $\frac{1}{2}$ degré, quand l'instrument est porté à 100° . Un froid prolongé fait monter le zéro; la chaleur le fait descendre, et l'effet produit disparaît peu à peu. Il faut donc vérifier fréquemment la position du zéro, principalement quand le thermomètre a été exposé longtemps à des températures très-basses ou très-élevées. M. I. Pierre a reconnu que ces effets sont plus prononcés avec le cristal qu'avec le verre ordinaire, et que, si l'on marque le point d'ébullition avant le point de fusion de la glace, la distance entre les deux points fixes change moins avec le temps. M. Regnault a obtenu des thermomètres dans lesquels le zéro ne varie pas de $0^{\circ},01$ quand on les porte à 100° , en faisant souffler les boules sur des tubes de cristal, dans la verrerie même, immédiatement après qu'ils venaient d'être fabriqués.



Fig. 623.

Quand le zéro s'est élevé après que l'échelle a été établie, il suffit, pour corriger les résultats observés, d'en retrancher la fraction de degré dont le zéro s'est déplacé; car la masse de mercure n'a pas varié dans l'instrument, le réservoir seul a changé de capacité.

831. Thermomètre à réservoir intermédiaire. — La nécessité de vérifier le zéro de temps en temps, et, d'un autre côté, l'inconvénient d'avoir des thermomètres trop longs quand ils doivent mesurer spécialement des températures élevées et présenter des degrés de grande étendue, a fait imaginer les thermomètres à réservoir intermédiaire. Au-dessous des divisions dont on a besoin, on ménage un réservoir R (fig. 624), dont on évalue le volume par rapport à celui d'une des divisions arbitraires du tube, au moyen du poids du mercure qu'il contient, comparé au poids contenu dans un certain nombre de divisions. On sait alors à combien de divisions correspond ce réservoir, et, par conséquent, quel numéro il faudra inscrire près de la première division qui le suit. — On peut encore trouver par comparaison avec un bon thermomètre étalon, le nombre de degrés qui correspond à ce réservoir, de manière à trouver ensuite la grandeur de ces degrés. Cette espèce de thermomètre, imaginée par Person et par M. Walferdin, chacun de leur côté, peut donner les centièmes de degrés dans le voisinage du point d'ébullition, avec une longueur de 2 décimètres, et en conservant le zéro.

832. Limites du thermomètre à mercure. — Le thermomètre à mercure ne peut servir que jusqu'à 360° au-dessus de zéro : au-delà, le mercure entrerait en ébullition et l'instrument serait brisé. Au-dessous de zéro, on ne peut s'en servir que jusqu'à 36°; à la température de — 40°, le mercure se solidifie, et dès — 36°, et même — 35°, il éprouve des contractions irrégulières qui rendent les indications fautives. Pour les températures plus élevées que 360°, on se sert d'appareils désignés sous le nom de *pyromètres* (844); et, pour les températures inférieures à — 36°, du *thermomètre à alcool*.

M. Walferdin, remarquant que l'emploi du signe (—) pour les températures inférieures à celle de la glace fondante peut occasionner des erreurs dans les observations courantes, a proposé de placer le zéro au point de congélation du mercure (— 40°), de sorte que son point d'ébullition porterait le nombre 400°; et il a calculé des tables pour passer des indications de cette nouvelle échelle, qu'il nomme *tétra-centigrade*, à celles des autres échelles usitées ¹.

833. THERMOMÈTRE A ALCOOL. — L'alcool pur ne se congèle pas, quel que soit le froid qu'on lui fait subir; ce liquide peut donc servir à former un thermomètre destiné aux basses températures. Pour l'introduire dans le tube, on ne peut, à cause de sa faible densité, employer le même moyen que pour le mercure. On fait chauffer le réservoir, puis on le laisse refroidir pendant qu'on tient l'extrémité du tube plongée dans de l'alcool. Ce liquide monte dans le réservoir, à mesure que l'air se contracte par le refroidissement; on fait alors bouillir, les vapeurs

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XLI, p. 422.

achèvent de chasser l'air, et l'instrument se remplit quand elles se condensent pendant que le tube plonge dans le liquide. Il reste seulement une petite bulle de gaz, qui provient de l'air dissous dans l'alcool, lequel s'en sépare en arrivant dans le réservoir échauffé (1, 454). On chasse cette bulle d'air en faisant tourner, comme une fronde, le tube thermométrique attaché à une ficelle. On règle ensuite la course, puis on ferme l'extrémité, en ayant soin de laisser de l'air, qui doit s'opposer, par sa pression, à l'ébullition de l'alcool, qui a lieu à une température peu élevée. Le liquide est coloré avec de l'orseille, pour qu'on puisse facilement distinguer la colonne capillaire; on marque ensuite les points fixes comme pour le thermomètre à mercure. Pour les points intermédiaires, il faut graduer par comparaison, en prenant des points assez rapprochés, au moyen d'un bon thermomètre à mercure; sans cela les instruments ne seraient pas d'accord, comme il résulte de ce qui suit.

834. Comparaison des thermomètres. — Des thermomètres construits avec des liquides différents, et gradués indépendamment les uns des autres, ne sont pas d'accord quand on les expose à la même température. Par exemple, Deluc a trouvé les résultats suivants, en degrés Réaumur, sur des thermomètres remplis de mercure, d'huile d'olive, d'alcool et d'eau :

Thermomètre à mercure. . .	— 10°	— 5°	0°	20°	40°	60°	80°
— à huile. . .	»	»	0	19,3	39,2	59,3	80
— à alcool. . .	— 7,7	— 3,9	0	16,5	35,1	56,2	80
— à eau. . . .	»	»	0	4,1	20,5	45,8	80

On voit qu'il n'y a accord que pour les points fixes. Dès lors, il se présente la question importante de savoir s'il y a un liquide qui indique des nombres de degrés proportionnels aux quantités de chaleur ajoutées, et quel est ce liquide. Cette question, soulevée par Taylor, en 1723, fut étudiée par lui en mêlant des poids égaux d'eau froide et d'eau chaude. La température du mélange doit être évidemment la moyenne des températures t et t' des deux masses égales d'eau, c'est-à-dire $\frac{1}{2}(t + t')$; car la chaleur gagnée par l'eau froide est précisément celle que perd l'eau chaude¹, et un thermomètre comparable avec lui-même sera celui qui indiquera précisément cette température $\frac{1}{2}(t + t')$. Or ces expériences, répétées par Black, Deluc, Crawford, ont prouvé que le thermomètre à mercure remplit sensiblement cette condition jusqu'à 200°, c'est-à-dire que, jusque-là, il est comparable avec lui-même. Au delà, il indique des températures trop élevées, ce qui prouve qu'il faut moins de chaleur pour le faire monter de 1°, dans ces hautes températures qu'au-dessous de 200°. Le thermomètre à mercure est donc préférable à ceux qui sont construits avec d'autres liquides. Ce qui justifie encore cette préférence, c'est que les indications de ce thermomètre sont

¹ Cela suppose qu'on néglige la chaleur que peut recevoir ou perdre le vase dans lequel on opère. Nous verrons, chap. V, comment on peut tenir compte de cette circonstance.

d'accord avec celles du thermomètre à air, comme nous le verrons en étudiant la dilatation des gaz, depuis -36° jusqu'à 200° . A 300° , la différence peut n'être que de 1° . Or, nous verrons qu'on a de bonnes raisons pour croire que l'air se dilate de quantités sensiblement proportionnelles aux additions de chaleur qu'il reçoit.

835. Du thermomètre préférable pour les basses températures. —

Le thermomètre à mercure ne pouvant être employé pour les températures inférieures à -36° , on emploie alors le thermomètre à alcool; mais on n'a plus d'indications comparables, à cause de l'irrégularité de la dilatation de ce dernier liquide. Il y a plus, différents thermomètres à alcool ne sont pas même d'accord entre eux, ce liquide étant plus ou moins concentré. Ainsi, Parry a trouvé à Port-Bowen, une différence de 10° entre plusieurs thermomètres à alcool construits par les meilleurs artistes. Le capitaine Franklin a observé des différences de 8° , par un froid de -25° à -30° . De plus, à ces basses températures, l'alcool absolu se sépare en partie de l'eau; le liquide n'est plus homogène, et perd de sa fluidité. M. Muncke a alors proposé, vers 1836, de remplacer l'alcool par le sulfure de carbone, qui ne se congèle pas par les plus grands froids, et qu'il est facile d'obtenir pur.

M. I. Pierre, dans un grand travail sur la dilatation des liquides, dont nous parlerons plus loin, a comparé au thermomètre à mercure, des thermomètres gradués séparément, et faits avec douze liquides différents. Il a trouvé que le thermomètre à eau est le plus défectueux de tous; vers 53° , la différence avec le thermomètre à mercure s'élève à plus de 22° . Les thermomètres à sulfure de carbone et à alcool viennent ensuite; le premier marque -28° quand le thermomètre à mercure marque -34° . Les thermomètres faits avec l'éther ordinaire, le chlorure d'éthyle et le bromure de méthyle, seraient les moins défectueux.

Comme c'est surtout pour les températures inférieures à 0° qu'il est important d'avoir des thermomètres comparables au thermomètre à mercure, on pourra les graduer en prenant pour second point fixe, au lieu de 100° , une température moins élevée donnée par un bon thermomètre à mercure; les différences seront alors moins prononcées pour les autres températures. Par exemple, si l'on marque directement le point de 40° sur un thermomètre à sulfure de carbone, la différence avec le thermomètre à mercure n'est plus que de $1^{\circ},98$, quand ce dernier marque -35° . Si donc on prenait pour terme de comparaison, le point -30° , par exemple, indépendamment du point de la glace fondante, pour déterminer la grandeur des degrés; en portant ces degrés au-dessous de -30° , on pourrait, pour les températures beaucoup plus basses, compter sur des indications comparables, à très-peu près, avec celles qui sont données par les divisions comprises entre -30° et 0° . Il est évident que l'instrument ainsi gradué ne sera plus aussi sûr pour les températures notablement supérieures à 0° .

836. De la sensibilité du thermomètre. — Il y a deux espèces de sensibilités, l'une relative à la petitesse des fractions de degré que peut indiquer l'instrument; l'autre, à la rapidité avec laquelle il prend la température du milieu

environnant, pour en accuser les variations. Pour obtenir la première, on emploie de grands réservoirs, de manière que chaque degré occupe une grande longueur sur le tube. Pour l'autre, il faut que l'instrument ne contienne qu'une faible masse de mercure, et présente relativement une grande surface. Un réservoir cylindrique est donc préférable à un réservoir sphérique, et d'autant plus qu'il est plus allongé. Quand il est très-long, on l'enroule en spirale pour qu'il occupe moins de place.

On peut, au reste, concilier les deux genres de sensibilité, en employant, avec un réservoir de faible volume, un tube très-fin. Alors, pour que la colonne de mercure soit facile à voir, on donne à sa section intérieure la forme d'une ellipse très-allongée, de manière que la colonne, dont l'aire de la section est très-petite, forme une lame, visible quand on la regarde par ses larges faces. On applique aussi sur le tube, en le fabriquant, une bande d'émail blanc, sur laquelle la colonne de mercure se distingue plus facilement.

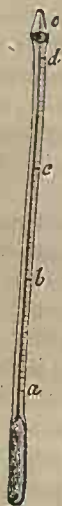


Fig. 625.

Thermomètres métastatiques. — M. Walferdin a imaginé des thermomètres qu'il nomme *métastatiques* et qui donnent les variations de température, en très-petites fractions de degré, quoiqu'ils n'aient que de faibles dimensions. Le thermomètre métastatique à mercure est formé d'un tube tellement capillaire qu'il ne contient que quelques degrés *ab*, *bc*, *cd* (fig. 625) divisés en un très-grand nombre de parties égales. A la partie supérieure est un réservoir *o*, contenant un peu de mercure, et dans lequel le tube pénètre par une pointe effilée, qui doit plonger dans le mercure quand on reverse l'instrument. — Pour se servir de ce thermomètre, il faut, chaque fois, en régler la course; pour cela on l'échauffe, de manière à faire sortir par la pointe autant de mercure qu'il est nécessaire pour que le niveau se tienne entre *a* et *d* quand la température diffère peu de celle que l'on veut mesurer. Quand cette température est basse, on fait, au contraire, entrer du mercure par la pointe, en tenant l'instrument renversé pendant qu'il se refroidit, après avoir fait arriver le mercure jusqu'à la pointe par un échauffement convenable. Une fois la course réglée, on porte le thermomètre dans un bain dont la température connue diffère peu de celle que l'on veut évaluer; on prend note de la position du niveau du mercure, puis on porte l'instrument dans le milieu dont on veut connaître la température, et le nombre de divisions dont le niveau s'est déplacé indique la différence entre la température que l'on cherche et celle du bain. — Par exemple, veut-on connaître les différences de températures d'ébullition de l'eau, sous différentes pressions; on réglera la course de l'instrument de manière que le niveau soit entre *a* et *d* dans l'eau bouillante, on observera sa position, et en même temps on mesurera la pression atmosphérique *P*. Si la position du niveau dans le thermomètre est plus élevée de 15 divisions sous une pression plus forte *P'*, et s'il y a 1000 divisions par

degré, on saura que la température d'ébullition est plus élevée de $\frac{45}{1000}$ de degrés sous la pression P' que sous la pression P . — Quelquefois, au lieu d'une pointe effilée à l'extrémité du tube, on se contente d'y pratiquer un étranglement vers le point d , et quand le mercure est convenablement dilaté, on sépare la colonne en ce point par une petite secousse, et l'on observe les positions successives de l'interruption, quand elle descend au-dessous de l'étranglement.

Le thermomètre métastatique à alcool ne présente pas de pointe effilée dans le réservoir supérieur, qui contient de l'alcool et une très-petite goutte de mercure. Si l'on chauffe l'instrument et qu'on le laisse ensuite refroidir, la goutte de mercure s'engage dans le tube, et l'on en règle la position de manière que, pour les températures que l'on veut observer, elle se trouve à peu près au milieu de la tige, où elle sert d'index.

On opère ensuite comme avec le thermomètre métastatique à mercure.

Il est à remarquer que la quantité de liquide qui forme le thermomètre est différente, suivant la manière dont on en a réglé la course; il faut donc, pour chaque état de l'instrument, évaluer en degrés centigrades la valeur d'une de ses divisions.

837. THERMOMÈTRES A AIR.

Quand on veut constater rapidement de faibles variations de température, on emploie des ther-

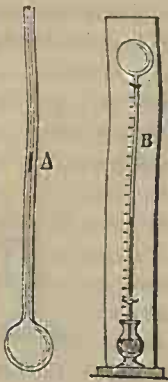


Fig. 626.

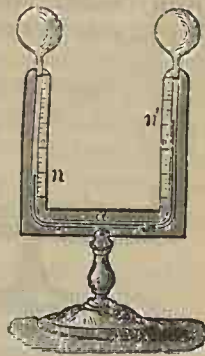


Fig. 627.

momètres à air. Le plus simple est représenté en A (fig. 626). Une goutte de liquide ou *index* sert à séparer le gaz intérieur de l'air atmosphérique, et ses mouvements indiquent les variations de température. On voit en B une autre disposition : l'extrémité du tube plonge dans un vase ouvert contenant un liquide ; on fait sortir une partie de l'air en chauffant le réservoir, et le liquide monte dans le tube par le refroidissement. Les variations de niveau indiquent les changements de température. On gradue ces instruments, en marquant sur le tube deux températures t , t' données par un thermomètre à mercure, et l'on divise l'espace compris entre les points marqués, en $t' - t$ parties égales. Ces thermomètres à air sont évidemment influencés par les variations de la pression atmosphérique, mais ils sont commodes pour attester les changements rapides de température ; ils ont été répandus surtout par Pictet.

838. Thermomètres différentiels. — Leslie a imaginé un thermomètre à air indépendant de la pression extérieure. Cet instrument consiste en un tube recourbé (fig. 627), dont les deux branches sont surmontées de deux boules égales. Le tube renferme une colonne *nan'* d'acide sulfurique concentré coloré

avec du carmin, liquide qui ne donne pas de vapeurs sensibles à la température ordinaire. On introduit ce liquide, avant de souder les deux branches l'une à l'autre à l'un des angles. En chauffant l'une des boules, l'air s'y dilate et pousse la colonne du côté opposé, et l'on peut refouler tout le liquide dans une des boules, et y faire passer de l'air à travers ce liquide. On peut ainsi, par tâtonnement, arriver à avoir les niveaux n et n' à la même hauteur, quand les températures des deux boules sont égales. On marque zéro au niveau commun. On porte ensuite l'une des boules à une température supérieure à celle de l'autre, en l'enveloppant d'un vase que l'on remplit d'eau chaude dont la température est donnée par un thermomètre à mercure. Le vase est fendu pour laisser passer le tube, et l'on ferme ensuite la fente avec de la cire. Supposons que la température de l'eau dépasse de 10° , celle de l'air qui entoure l'autre boule, on marquera 10 au niveau du liquide, dans les deux branches, et, partageant l'intervalle entre ce point et le point zéro, en 10 parties égales, on aura la grandeur des degrés;

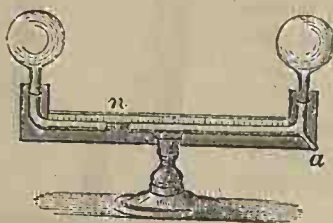


Fig. 628. — 1/10.

que l'on portera ensuite, sur chaque branche, au-dessus et au-dessous de zéro. Tant que les niveaux ne quittent pas les parties verticales du tube, les indications sont d'accord avec celles du thermomètre à mercure; l'expérience le prouve, et cela résulte aussi, comme nous le verrons, des lois de la dilatation des gaz. — L'instrument



Fig. 629.

donnera des températures absolues, si l'on porte une des boules à 0° , en l'enveloppant de glace fondante.

Une autre disposition due à Howard, et fréquemment employée, est celle que représente la figure 629. Si l'on fait en sorte que les variations de volume de l'air contenu dans le réservoir r soient négligeables, les indications sont comparables entre elles.

Thermoscope de Rumfort. — Leslie a donné au thermomètre différentiel une autre forme, imaginée en même temps par Rumfort, qui a donné à l'instrument le nom de *thermoscope*. Les deux boules (fig. 628) sont réunies par un long tube horizontal, dans lequel se trouve une goutte d'acide sulfurique concentré, n , qui sert d'index. Quand la température des deux boules est la même, l'index doit se trouver au milieu. Pour remplir cette condition et régler l'instrument, on pousse l'index dans un petit appendice a , et l'on fait passer de l'air d'une boule dans l'autre, en chauffant celle qui en contient trop. En inclinant ensuite le tube horizontal, on y fait rentrer l'index et on lui donne la position convenable. On marque zéro aux deux extrémités de l'index, et l'on détermine un second point, pour avoir la grandeur des degrés, par le même moyen que pour le

thermomètre différentiel. Tant que l'index reste dans le tube horizontal, les indications du thermoscope sont comparables entre elles.

En renversant l'instrument, et ayant soin que la partie moyenne soit toujours horizontale, on peut en faire usage dans les liquides. M. Matthiessen a rendu le thermomètre différentiel de Leslie également propre à être employé dans les liquides, en repliant sur elles-mêmes les deux colonnes verticales, de manière que les boules se trouvent aux extrémités de deux branches pendantes.

839. De l'invention du thermomètre. — C'est sous la forme du thermomètre à air que cet instrument précieux a été inventé. Auparavant on n'avait que des idées vagues sur l'intensité du chaud et du froid. On en attribue généralement la découverte à Cornélius Drebbel, fils d'un paysan de Nort-Hollande suivant les uns, né, suivant d'autres, à Alcaer, d'une famille opulente. On en fait aussi hommage à Galilée, en 1597, à Bacon, Sanctorius, Fludd, Sarpi, Borelli. Il est probable que, les esprits étant tournés vers la même idée, le thermomètre a pris naissance entre les mains de divers physiciens. Cependant, la question paraît devoir être décidée en faveur de Galilée, les dates que l'on donne pour les autres prétendants, étant postérieures à l'année 1597. Le thermomètre de Galilée avait la forme que l'on voit en A (*fig.* 626), et celui de Drebbel, celle que l'on voit en B. C'est sous cette dernière forme que le thermomètre se répandit en Flandre et en Angleterre, ce qui explique pourquoi Drebbel a passé pour en être l'inventeur.

Les académiciens de Florence construisirent le premier thermomètre à liquide ; ils employèrent l'alcool. Halley, Roemer, Fahrenheit, se servirent de mercure, vers 1680, et Newton, d'huile de lin. D'abord l'échelle étant arbitraire, les différents thermomètres n'étaient pas comparables entre eux¹. Le premier qui paraît avoir tenté d'établir une échelle fixe est Renaldini, vers 1694 ; il plongeait l'instrument dans la glace fondante, puis dans des mélanges d'eau froide et d'eau bouillante en proportions déterminées. Newton marquait 0° à la glace fondante et prenait pour second point fixe la température du sang de l'homme, à laquelle il marquait 12°. Fahrenheit fit aussi des instruments comparables ; on ne sait pas au juste par quel moyen. Vers le même temps, Réaumur graduait des thermomètres de grandes dimensions, en y mettant de l'eau, dans laquelle il versait des mesures égales de mercure correspondant à la centième partie du volume du réservoir, et il marquait l'élévation de niveau produite par chaque addition de mercure ; puis il remplaçait l'eau par de l'alcool. Il graduait ensuite, par comparaison, des thermomètres de moindres dimensions. Plus tard il remarqua que 1000 volumes à 0°, de l'alcool dont il faisait usage

¹ Cependant les académiciens de Florence construisaient des thermomètres divisés en 50 parties, qui marchaient à peu près d'accord entre eux, parce qu'ils s'appliquaient à leur donner exactement les mêmes dimensions. On a retrouvé quelques-uns de ces instruments ; ils marquent 13°, 5 pour la température de la glace fondante. Leur zéro correspondait à la température des caves à Florence (*Ann. de ch. et de phys.*, 2^e série, t. XLV).

devenaient 1080, à la température de l'eau bouillante, ce qui le porta à prendre $\frac{1}{80}$ de cette dilatation pour la valeur du degré. Celsius, à Upsal, vers 1744, adopta le point de la fusion de la glace et celui de l'eau bouillante, et la division en 100 parties; ce que l'on attribue quelquefois à Newton. Mais il résulte des recherches de M. Lafon¹ que l'échelle centigrade avait été établie dès 1737 à Lyon par Christin, de l'Académie de cette ville, qui avait vu le mercure de son thermomètre occupant 600 volumes dans la glace fondante en occuper 100 de plus dans l'eau bouillante. L'instrument ainsi gradué se répandit rapidement en France et en Angleterre sous le nom de *thermomètre de Lyon*. C'est à partir de cette époque que le thermomètre est devenu un instrument exact; depuis, il a reçu de nombreux perfectionnements, et a été l'objet des travaux d'un grand nombre de physiciens, parmi lesquels il faut citer Dulong et Petit, Despretz, MM. Regnault, I. Pierre, etc.

III. Thermo-multiplicateur.

840. Notions préliminaires. — La dilatation n'est pas le seul effet de la chaleur qu'on ait utilisé pour la mesurer. L'appareil que nous allons décrire est fondé sur des effets *électriques* produits par la chaleur, effets que nous étudierons plus tard en détail sous le nom de *phénomènes thermo-électriques* (tom. III). Pour le moment, il nous suffira de connaître les deux principes suivants :

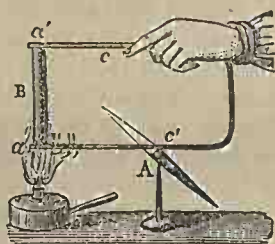


Fig. 630.

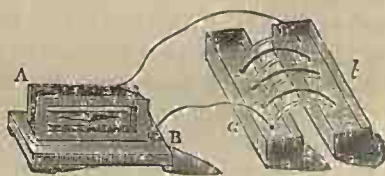


Fig. 631.

1° Une aiguille aimantée horizontale, mobile sur une pointe, prend une position d'équilibre dans laquelle son axe reste dirigé à peu près du *nord* au *sud*. Quand on la dérange de cette position, elle y revient après avoir accompli un certain nombre d'oscillations.

2° Si l'on forme un *circuit fermé*, avec deux métaux différents B, c' (fig. 630), soudés l'un à l'autre en a et a', et si on l'approche très-près de l'aiguille aimantée A, de manière qu'une partie du circuit lui soit parallèle,

¹ Recueil de la commission météorologique de Lyon (1872).

l'aiguille ne bougera pas, tant que les deux soudures *a* et *a'* seront à la même température. Mais si l'une d'elles est plus chaude que l'autre, l'aiguille sera déviée, et s'approchera d'autant plus de la position perpendiculaire au côté *c'*, que les températures des soudures différeront davantage. Cet effet est dû à un courant électrique développé par la chaleur, et qui circule dans l'arc métallique. Nobili et Melloni ont tiré parti de ce phénomène pour comparer les effets calorifiques, par les quantités dont est déviée l'aiguille aimantée.

Au lieu de former le circuit au moyen de deux arcs métalliques soudés l'un à l'autre, si on le forme de plusieurs arcs de deux métaux soudés, en alternant, les uns aux autres, et si l'on élève la température des soudures paires seulement, par exemple en les plongeant dans de l'eau chaude, en *b* (fig. 631), tandis que les soudures impaires sont plongées dans l'eau froide, en *a*, ou réciproquement, l'effet sur l'aiguille aimantée, pour une même différence de température, sera beaucoup plus prononcé que lorsqu'il n'y a que deux soudures. Ce système de métaux soudés se nomme une pile thermo-électrique.

On peut aussi rendre l'action du courant électrique sur l'aiguille aimantée beaucoup plus intense, en faisant passer une partie du circuit plusieurs fois autour de cette aiguille, avec la précaution de séparer les différents tours les uns des autres par de la soie, qui empêche

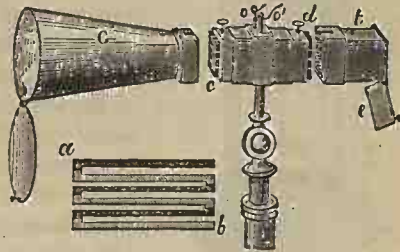


Fig. 632.

le fluide électrique de s'élaner d'un tour à l'autre, de sorte qu'il est forcé de parcourir tout le circuit. On a alors ce qu'on appelle galvanomètre, ou rhéomètre multiplicateur AB (fig. 631), ou simplement multiplicateur.

841. Description de l'appareil. — L'appareil de Nobili et Melloni se compose de deux parties essentielles : 1° une pile thermo-électrique ; 2° un rhéomètre-multiplicateur destiné à indiquer, par la déviation de l'aiguille aimantée, l'intensité du courant électrique, et par suite la différence de température entre les deux ordres de soudure de la pile.

1° **Pile thermo-électrique.** — La pile est composée de petits barreaux de bismuth et d'antimoine¹, de 2 ou 3 centimètres de longueur, soudés alternativement les uns aux autres, et repliés, comme en *ab* (fig. 632), de manière à former un parallélépipède rectangle *cd*, dont une des bases contient les soudures impaires. Cette pile, *cd*, est enveloppée d'une lame mince de laiton, qui en est séparée par

¹ M. E. Becquerel augmente la puissance de l'appareil, en remplaçant le bismuth par un alliage de 10 parties de ce métal et de 1 d'antimoine; et l'antimoine, par un alliage de 696 de cadmium, 806 d'antimoine, et 0,4 de bismuth pour diminuer la fragilité. Avec une trentaine de couples de barreaux, l'effet sur le multiplicateur est environ six fois plus grand.

une bande de papier. On aperçoit en *c* et *d*, les soudures des barreaux, formant les deux faces ou bases de la pile. Les deux extrémités de la chaîne métallique viennent aboutir aux chevilles de laiton *o, o'*, auxquelles on adapte des fils de cuivre que l'on met en communication avec le fil qui forme le rhéomètre multiplicateur. Enfin, les deux faces de la pile sont recouvertes d'une légère couche de noir de fumée, qui a la propriété d'absorber en très-grande proportion la chaleur incidente, comme nous le verrons plus loin. Un tube *t*, noirci en dedans et muni d'un écran mobile *e*, peut s'adapter à chaque extrémité, pour abriter les faces de la pile, de la chaleur qui pourrait venir latéralement.

2° **Rhéomètre multiplicateur.** — Cette seconde partie de l'appareil (fig. 633), est formée d'un fil de cuivre enveloppé de soie blanche¹, qui fait plusieurs tours sur un cadre *ab*. Une aiguille aimantée est suspendue dans l'intérieur du cadre; pour qu'elle soit très-mobile, elle est soutenue par un fil de soie sans torsion *f*. Une seconde aiguille *l*, fixée parallèlement à la première par l'intermédiaire d'une petite tige verticale qui traverse le haut du cadre *ab*, marque les déviations sur un limbe horizontal. On commence par orienter le rhéomètre de manière que les aiguilles aimantées soient dans le plan du cadre; auquel cas l'aiguille *l* correspond au zéro du limbe. Si, alors, après avoir fait communiquer, par des fils métalliques, les chevilles *o, o'* (fig. 632), avec les extrémités *n, n'* (fig. 633) du fil du rhéomètre, on vient à échauffer l'une des faces de la pile *cd* (fig. 632), on observe une déviation des aiguilles. Si, au contraire, on refroidit cette

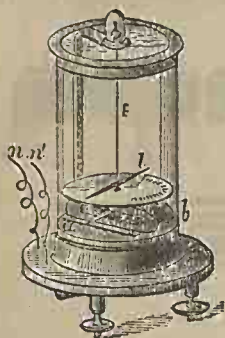


Fig. 633. — 1/6.

base, ou, ce qui revient au même, si l'on échauffe l'autre, les aiguilles sont encore déviées, mais en sens contraire.

C'est M. Becquerel qui a eu le premier l'idée d'employer les effets électriques de la chaleur pour en mesurer l'intensité. Nobili construisit ensuite une pile thermo-électrique destinée à apprécier la chaleur des corps par le contact d'une de ses bases; et Melloni la modifia et disposa l'appareil comme nous venons de le décrire. Cet appareil est surtout précieux pour constater les effets de la chaleur rayonnante; il est tellement sensible qu'il est affecté par la chaleur naturelle d'une personne placée à une distance de 8 à 10^m, surtout quand on garnit la face qui reçoit la chaleur, d'un cornet poli en dedans *C* (fig. 632), destiné à recevoir une plus grande quantité de chaleur. Au moyen du même appareil, Nobili et Melloni ont constaté que les insectes dégagent de la chaleur, en les renfermant dans le tube *t* (fig. 632) garni d'une toile métallique du côté de la pile. Ils ont reconnu que la faible lueur du phosphore est accompagnée de chaleur. Enfin, Melloni, en

¹ La soie teinte en vert par les sels de fer peut agir sur l'aiguille aimantée et altérer les résultats, avec les appareils très-sensibles.

concentrant les rayons de la lune sur une des faces de la pile, au moyen d'une lentille de 1 mètre de diamètre, a vu l'aiguille du rhéomètre dévier de 3° environ; ce qui prouve que ces rayons possèdent de la chaleur, ce dont on avait douté jusqu'alors. Du reste, la faible intensité de cette chaleur est en rapport avec celle de la lumière de la lune, qui est comprise entre 3 et 4 cent millièmes de celle que rayonne le soleil.

842. Tables de graduation. — Les déviations de l'aiguille du rhéomètre, sont proportionnelles aux intensités des rayons qui frappent la base de la pile, quand ces déviations n'atteignent pas 20°¹. Mais si elles dépassent cette limite, les intensités calorifiques croissent plus rapidement que les déviations. On construit alors, pour chaque appareil, une table donnant l'intensité du flux calorifique pour chaque déviation. Pour construire ces tables, Melloni a employé deux méthodes principales².

La première méthode consiste à faire agir de chaque côté de la pile, deux sources constantes de chaleur, que l'on place d'abord à des distances telles que l'aiguille du rhéomètre reste au zéro. On éloigne ensuite un peu l'une des sources, de manière à obtenir un écart de 5 ou 6 degrés, pour lequel la déviation est proportionnelle à la différence des effets calorifiques sur les deux faces. On intercepte alors, avec un écran, les rayons venant d'une des sources, et l'on observe la déviation produite par l'autre agissant seule; on cherche de même la déviation en sens opposé produite par celle-ci quand la première est cachée: et l'on trouve que, si la déviation la plus grande ne dépasse pas 20°, la différence de ces deux déviations est égale à la déviation observée sous l'influence des deux sources agissant simultanément. Par exemple, si l'une des sources produit seule une déviation de 15°, l'autre une déviation en sens contraire de 5°, la différence sera de 10°, et les deux sources agissant simultanément donneront aussi 10°.

Mais si l'une des déviations est plus grande que 20°, il n'en sera plus ainsi. Par exemple, les déviations successives étant de 42° et 44°, dont la différence est 2°, Melloni a trouvé une déviation de 8° quand les deux sources agissent ensemble. La différence calorifique nécessaire pour représenter 2° dans le voisinage du 42° degré est donc 4 fois plus grande que celle qui les ferait parcourir dans le voisinage de zéro. Il faut donc, vers le 42° degré, quadrupler le nombre de degrés observé, pour que les indications soient comparables à celles qui sont fournies par les faibles déviations.

Melloni a ainsi étudié la marche de l'aiguille, de 4° en 4°, jusqu'à 44°. Il a trouvé, par ce moyen, que les arcs compris entre 20° et 24°; 24 et 28°...; équivalent à 5°, 12; 6°, 44., pris près du zéro. Les valeurs intermédiaires, de 20° à 21, de 21 à 22, etc., ont été obtenues par construction graphique ou par interpolation. Il est ainsi facile de construire une table allant de degré en degré,

¹ Cette limite dépend de la manière dont le fil métallique du rhéomètre est enroulé sur le cadre. Elle varie donc d'un instrument à un autre.

² *Mém. de l'Ac. des Sc. de Paris*, p. 413 (1834); et *Ann. de ch. et de phys.*, 2^e sér., t. LIII, p. 5.

indiquant, par exemple, que la déviation de 20° équivaut à $31^\circ, 6$; celle de 36° , à $49^\circ, 5$; etc., des degrés pris dans le voisinage du zéro. Les tables ne vont que de degré en degré; pour les fractions, on pose une proportion, ce qui suppose que la courbe se confond avec sa tangente dans l'intervalle de deux ordonnées correspondant à deux degrés voisins.

Une autre méthode consiste à faire d'abord agir sur la pile une source produisant une petite déviation, de 10° par exemple. On interpose ensuite une lame de verre, qui intercepte une partie de la chaleur, et la déviation est moindre, par exemple, de 5° ; d'où l'on conclut que la lame de verre intercepte la moitié des rayons. On approche alors la source, de manière à obtenir une grande déviation, soit 30° ; on interpose la lame, et la déviation, au lieu d'être de 15° , sera, par exemple, de $17^\circ, 6$, nombre au-dessous de la limite de 20° . On en conclura que les 30° équivalent à $2 \times 17,6 = 35^\circ, 2$. Les résultats obtenus par ce moyen ont toujours été d'accord avec ceux qu'avait fournis l'autre méthode.

Pour établir ainsi des tables de graduation expérimentalement, il faut employer les soins les plus minutieux. Ces tables ne conviennent qu'à l'appareil avec lequel on les a construites. L'expérience prouve que les résultats qui y sont consignés restent les mêmes, quelle que soit la source calorifique. En outre, on peut s'assurer que les déviations données par les tables sont proportionnelles aux quantités de chaleur reçues, en faisant agir une même source, à différentes distances. On trouve que les déviations corrigées d'après les tables sont *en raison inverse des carrés des distances*; or, nous verrons que c'est précisément suivant cette loi que varie l'intensité des rayons d'une même source, reçus à différentes distances.

843. Tables d'impulsion. — Dès que la chaleur frappe la base de la pile, l'aiguille du rhéomètre se met en mouvement, et elle ne s'arrête à une position d'équilibre qu'après avoir oscillé pendant un temps assez long. Melloni abrège ce temps en plaçant au-dessous de l'aiguille aimantée un disque de cuivre, dont la présence a pour effet d'amortir les oscillations, comme nous l'expliquerons en traitant de *l'électro-magnétisme* (tome III).

Malgré cette précaution, les oscillations durent encore assez longtemps, la base de la pile s'échauffe à une certaine profondeur, et il faut, avant de continuer les expériences, attendre qu'elle se soit refroidie, pour que l'aiguille revienne à sa position première. On évite cette perte de temps de la manière suivante : dès que la chaleur frappe la pile, l'aiguille part, son extrémité décrit un arc maximum, nommé *arc d'impulsion*, puis revient sur ses pas et fait des oscillations d'amplitude décroissante. Or, Melloni a reconnu par l'expérience, que l'arc d'impulsion est toujours le même pour une déviation définitive donnée; mais qu'il change, d'une déviation à une autre. On forme alors, pour chaque appareil, une table dans laquelle l'arc d'impulsion se trouve à côté de chaque déviation correspondante. On n'a plus alors qu'à observer le premier arc, et la table fait connaître la déviation définitive qu'eût donnée l'aiguille, si on lui eût laissé le temps de prendre sa position d'équilibre.

Nous aurons occasion de faire connaître, par la suite, d'autres instruments thermométriques destinés à des usages spéciaux. Ceux que nous venons de décrire suffisent pour que nous puissions poursuivre l'étude de la chaleur.

IV. Pyromètres.

844. Nous avons vu (832) que le thermomètre à mercure ne peut supporter des températures supérieures à 360° . Quand on en veut évaluer de plus élevées, on se sert d'instruments spéciaux nommés *pyromètres*.

Pyromètre de Régnier. — Ce pyromètre, qui ressemble par sa forme au dynamomètre du même inventeur (I, 51), est fondé sur l'inégalité d'allongement du fer et du cuivre, dont les dilatations sont entre elles comme 2 : 3 environ. Cet instrument consiste en un arc de fer *acb* (fig. 634), dont les extrémités sont réunies par une verge de cuivre *ab*. Quand la température s'élève, le cuivre se dilatant plus que le fer, le point *c* se rapproche de la ligne *ab*, et une crémaillère fixée en *c* fait tourner l'aiguille *e* en agissant sur un pignon. Cet instrument doit être entièrement plongé dans le fourneau dont on veut évaluer la température, ce qui fait qu'il est peu commode à observer.

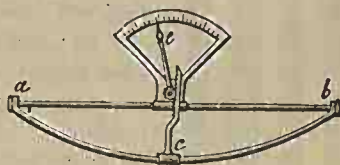


Fig. 634.

Pyromètre de Brongniart. — Ce pyromètre, dans lequel l'aiguille indicatrice est extérieure au fourneau, sert principalement dans les fabriques de porcelaine et de peinture sur verre. Une barre de fer *ff'* (fig. 635) est fixée dans une rainure d'une plaque *PP'* de porcelaine, substance qui se dilate à peine, même pour de très-hautes températures. L'extrémité *f* s'appuie contre l'extrémité de la rainure. Une barre de porcelaine *cf* passe à travers le mur du fourneau et presse l'extrémité *c* d'un levier dont les mouvements se transmettent à une aiguille *e*, qui peut parcourir les divisions d'un cadran. Un ressort agit sur cette aiguille, de manière que la barre *cf* soit toujours appuyée contre la barre *ff'*. Quand cette dernière barre se dilate, l'extrémité *f* pousse la barre *fc*, et l'aiguille se met en mouvement. Ce pyromètre, de même que le précédent, ne donne pas les



Fig. 635.

températures en degrés comparables à ceux du thermomètre à mercure, parce que les dilatations des solides vont en augmentant au delà de 100° . Mais, dans les applications industrielles, il suffit de pouvoir retrouver certaines températures qui conviennent aux opérations que l'on veut effectuer.

845. Pyromètre de Wedgwood. — Le célèbre potier anglais Wedgwood est l'inventeur du pyromètre le plus ancien, fondé sur la propriété qu'a l'argile desséchée d'éprouver dans le feu une contraction *permanente* d'autant plus prononcée que la température est plus élevée, et qui est due à un commencement de vitrification. L'appareil (fig. 636), consiste en deux règles métalliques A, B, faisant entre elles un angle très-petit, et fixées sur une table métallique. Pour donner moins de longueur à l'appareil, on place une troisième règle C formant avec B un angle égal à celui des deux autres règles, de manière que l'espace compris entre C et B représente celui qui existerait entre les règles A et B prolongées. La longueur totale des deux espaces angulaires est de 305^{mm}, et est divisée en 240 parties égales. La plus grande distance des règles est de 12^{mm},7, et la plus petite de 8^{mm},5¹. On prépare de petits cylindres d'argile pétriés avec soin, desséchés et usés à la lime, de manière à entrer dans les règles jusqu'au zéro de la division; on les calcine ensuite au rouge sombre pour les rendre moins fragiles. — Pour obtenir la température d'un foyer, on y plonge un des cylindres d'argile, et quand il en a pris la température, on le retire, on le laisse refroidir, puis on le fait glisser entre les règles, où il s'enfonce plus ou moins, suivant le retrait qu'il a éprouvé. S'il parvient ainsi à la division 35, on dira que la température était de 35° du pyromètre. Il est évident que, pour que les résultats soient comparables, il faut que les cylindres d'argile soient tous de même nature. Ceux que Wedgwood employait contenaient 47,35 de silice, 44,29 d'alumine et 8,36 d'eau; il en avait préparé un très-grand nombre et en avait envoyé à la plupart des savants et des industriels.



Fig. 636.

Wedgwood a cherché à rendre les degrés de son pyromètre comparables à ceux du thermomètre à mercure. Pour cela, il enfonçait dans une jauge en terre de pipe, qui était la reproduction d'une partie du pyromètre, un cylindre d'argent porté successivement à 360°, température du mercure bouillant, et à 100°. Il vit que le cylindre d'argent parcourait 23,4 divisions, en passant de 360° à 100°, c'est-à-dire pour 260° de variation de température; ce qui fait 11°,11 centigrades environ, pour un déplacement d'une seule division du pyromètre. Ayant ensuite porté la jauge dans un moufle, à côté d'un cylindre d'argile, il trouva que le cylindre d'argile s'enfonçait de 2,25 divisions, tandis que le cylindre d'argent devait être retiré de 66 divisions, qui valent $66 \times 11,1 = 733^\circ \text{C.}$ auxquels il faut ajouter 10° que possédait le cylindre d'argent au moment où il avait été placé dans la jauge. 743° C. correspondent donc à 2,25 divisions du pyromètre. — Dans une seconde opération, le cylindre d'argent recula de 92 divisions, et le cylindre d'argile s'enfonça

¹ Annales de chimie, 1^{re} série, t. LXXIV, p. 21.

de 6,25. Les 92 divisions parcourues par l'argent, équivalent donc à 1032° C., quand on y ajoute les 10° de température initiale. On conclut de là que la différence $1032^{\circ} - 743 = 289^{\circ}$ C. équivaut à $6,25 - 2,25 = 4$ divisions du pyromètre; ce qui fait une division de ce dernier pour 72° C. environ.

Pour connaître le nombre de degrés centigrades qui correspondent au zéro du pyromètre, il suffit de retrancher de 743° C. qui correspondent à 2,25 divisions du pyromètre, le nombre $72 \times 2,25 = 162$; ce qui donne 581° C. Ces nombres dépendent évidemment de la qualité de l'argile employé.

Cette méthode est ingénieuse, mais les résultats qu'elle donne ne sont exacts que dans la supposition que la dilatation de l'argent reste constante dans les hautes températures; ce qui n'est pas, cette dilatation allant en augmentant. Le pyromètre de Wedgwood ne donne donc pas plus que les autres des degrés comparables à ceux du thermomètre à mercure; mais il est précieux et d'un usage fréquent, à cause des petites dimensions du corps que l'on plonge dans le foyer, ce qui permet d'apprécier la température d'un point déterminé.

Wedgwood s'est servi du principe de son pyromètre pour reconnaître à quelle température ont été cuites les poteries antiques. Pour cela, il en a porté des fragments à des températures croissantes, et a observé, dans des essais successifs au pyromètre, à quelle température le fragment commençait à se contracter. Cette température est celle à laquelle la poterie a été soumise dans la cuisson. Il a reconnu ainsi que les vases étrusques ont été cuits à 32° au plus de son pyromètre.

846. Pyromètre thermo-électrique de Pouillet. — Cet appareil, dont le principe est le même que celui du thermo-multiplicateur (840), se compose d'un tube de fer, *ab* (fig. 637) dont une des extrémités *c* est fermée par un tampon de même métal, dans lequel est incorporé le bout d'un fil de platine *oo'*. Ce fil, tendu suivant l'axe du tube, est soudé à une lame de cuivre *r'* fixée sur un bloc de bois. Un second fil de platine *fr* incorporé dans un tampon de fer *f o'* foré, et que le premier fil traverse sans le toucher, est soudé à une autre plaque de cuivre *r*. Les plaques *r, r'* sont mises en relation avec les extrémités du fil d'un multiplicateur. On plonge la partie *ca*, dans le milieu dont on veut évaluer la température, en la préservant par une couche d'argile réfractaire quand cette température est très-élevée, et la déviation de l'aiguille du multiplicateur indique la différence de température des soudures du platine avec le fer, en *o* et *o'*. Comme cette différence n'est pas proportionnelle à la déviation, Pouillet a construit des tables, donnant les températures correspondantes de son pyromètre à air, dont nous allons parler. Avec l'appareil dont il faisait usage, une déviation de 4° à 5° de l'aiguille du rhéomètre correspondait à 100° centigrades.



Fig. 637.

8.17. Pyromètres à air. — Plusieurs physiciens, Dulong, Pouillet, M. Regnault,.... ont imaginé des pyromètres fondés sur la dilatation de l'air, et qui constituent les seuls instruments de ce genre qui donnent une évaluation réelle des températures élevées, l'air se dilatant, comme nous le verrons, d'une manière sensiblement uniforme même dans les plus hautes températures; de sorte qu'une addition constante de chaleur produit toujours la même augmentation de volume, quelle que soit la température d'où l'on part. L'air est renfermé dans un réservoir de verre, porcelaine, platine, placé à demeure dans l'enceinte dont on veut évaluer la température. Ce réservoir communique, par un tube sortant de l'enceinte, avec un appareil manométrique à mercure, dont nous décrirons la disposition et le rôle quand nous étudierons la dilatation des gaz. Remarquons seulement que le platine ne convient pas pour former le réservoir. D'abord, comme l'a remarqué Pouillet (I, 461), le platine condense à sa surface une mince couche d'air qui ne s'en sépare qu'à 100°; ce n'est donc qu'à partir de cette température qu'on peut regarder la masse de gaz comme constante; en second lieu, nous avons vu que le platine est perméable aux gaz produits par la combustion (I, 463).

La comparabilité entre eux, des degrés du pyromètre à air, pour les températures les plus élevées, l'a fait adopter dans les recherches de physique; et afin de pouvoir se servir du thermomètre à mercure, dont l'observation est beaucoup plus simple, divers physiciens ont calculé des tables donnant les températures du pyromètre à air correspondantes à celles du thermomètre à mercure au-dessus de 100°. Jusque-là, les deux instruments sont d'accord, mais au delà, les différences se montrent, et, à partir de 260°, le thermomètre à mercure se trouve en avance; comme on le voit dans le tableau suivant, construit par M. Regnault, pour deux thermomètres à mercure, l'un en cristal de Choisy-le-Roi, l'autre en verre ordinaire.

Températures du pyromètre à air.	Températures du thermomètre à mercure		Températures du pyromètre à air.	Températures du thermomètre à mercure.	
	Cristal.	Verre.		Cristal.	Verre.
100 ⁰	100 ⁰	100 ⁰	240 ⁰	242 ⁰ ,55	239 ⁰ ,90
120	110,05	109,98	260	263,44	260,20
140	140,29	139,85	280	284,48	280,52
160	160,52	159,74	300	305,72	301,08
180	180,80	179,63	320	327,25	321,80
200	201,25	199,70	340	349,30	343,00
220	221,82	219,80	350	360,50	351,00

On voit combien est grande l'influence du verre, que nous avons déjà signalée

(829). Le verre ordinaire donne les résultats les moins éloignés de ceux du pyromètre à air.

Les nombres donnés dans cette table, peuvent ne pas convenir à un thermomètre à mercure qui serait construit avec un verre différent de ceux qui ont été employés pour la calculer. Il faut donc, autant que possible, observer directement le thermomètre à air dans les hautes températures, la dilatation du vase n'ayant pas d'influence sensible sur ses indications, car les gaz se dilatent 160 fois plus que le verre, tandis que le mercure ne se dilate que 7 fois plus. Pour rendre la comparaison des thermomètres plus facile à saisir, nous joignons ici (*fig. 638*) une construction graphique, d'après M. Regnault, dans laquelle les abscisses représentent les températures absolues du thermomètre à air, et les ordonnées, les différences entre les indications de ce thermomètre et celles de différents thermomètres à mercure. La courbe *Onam* correspond aux températures déduites de la dilatation *absolue* du mercure, et les courbes *ac*, *av*, *as*, *ao* à celles qui sont

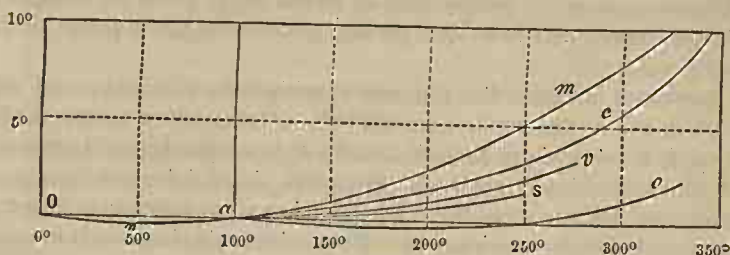


Fig. 638.

indiquées par des thermomètres à mercure construits avec du cristal de Choisy, du verre vert, du verre de Suède, et du verre ordinaire.

M. Magnan a aussi comparé le thermomètre à mercure au pyromètre à air; ses résultats diffèrent un peu de ceux de M. Regnault; ce qui tient en partie à la différence de nature des verres dont ces deux physiiciens ont fait usage.

848. Température des corps incandescents. — Les corps portés à une très-haute température deviennent incandescents, c'est-à-dire qu'ils répandent de la lumière plus ou moins brillante. On donne alors une idée de leur température en indiquant leur plus ou moins d'éclat. Pouillet a fait de nombreuses expériences pour exprimer en degrés de son pyromètre à air les températures qui correspondent à ces différents aspects. Voici les résultats auxquels il est arrivé :

Couleurs du platine.	Températures.	Couleurs du platine.	Températures.
Rouge naissant.	525	Orange foncé.	1100
Rouge sombre.	700	Orange clair.	1200
Cerise naissant.	800	Blanc.	1300
Cerise.	900	Blanc soudant.	1400
Cerise clair.	1000	Blanc éblouissant.	1500

Pouillet affirme que, avec un peu d'habitude, on ne se trompe pas de plus de 50° dans ces sortes d'évaluations. Dans ces expériences, le ballon de platine du pyromètre était renfermé dans un moufle de fer disposé au milieu d'un fourneau de briques. On faisait varier la température, en réglant la combustion au moyen de registres convenablement disposés.

849. Pyromètre clinique de M. Lamy. — Cet instrument, qui présente de grands avantages pratiques, est fondé sur la propriété du carbonate de chaux de se décomposer graduellement par la chaleur, en dégageant de l'acide carbonique, capable d'une tension maximum déterminée pour chaque température. Si cette température s'abaisse, de l'acide carbonique est repris par le carbonate de chaux, et la tension diminue et revient au maximum correspondant à la nouvelle température. Par exemple, du marbre chauffé dans le vide à une température de 860°, dégage de l'acide carbonique donnant une tension de 85^{mm}. A 1040°; cette tension atteint 250^{mm}. Si l'on revient à 860°, la tension revient à 85^{mm}. La tension maximum est indépendante du volume occupé par le gaz dégagé et de la température plus basse que peuvent présenter certaines parties de la masse gazeuse.

L'instrument est formé d'un réservoir cylindrique de porcelaine, verni sur les deux faces, et contenant du spath d'Islande ou du marbre en poudre. Après avoir porté ce réservoir au rouge blanc, afin de le remplir d'acide carbonique, on le fait communiquer avec un manomètre en siphon à longues branches, contenant du mercure, et on laisse refroidir; le gaz est absorbé; le mercure monte dans la branche intérieure, et s'élève au-dessus du niveau de la branche ouverte, d'une quantité égale à la hauteur du baromètre. L'instrument étant ainsi préparé, et le réservoir installé dans l'enceinte dont on veut suivre la température, les différentes pressions successives indiquent les variations de celle-ci. M. Lamy a construit, par comparaison directe, des tables donnant les températures du pyromètre à air correspondant à chaque tension du pyromètre à acide carbonique.

Le pyromètre clinique est beaucoup plus sensible que le pyromètre à air, car la pression du gaz augmente plus rapidement que la température, comme pour les tensions des vapeurs. Par exemple, si l'on cherche à maintenir la température à 1050°, la pression, dans le pyromètre à acide carbonique, oscille dans une amplitude de 16 à 21^{mm}, tandis que la colonne de mercure qui indique les températures dans le pyromètre à air, ne varie que de 1 à 2^{mm}.

CHAPITRE II

DE LA CHALEUR RAYONNANTE

Les corps et les rayons n'agissent-ils pas les uns sur les autres les rayons, sur les corps, en les échauffant; ou, si l'on veut, en imprimant à leurs parties ce mouvement de vibration qui constitue la chaleur

(NEWTON, *Optique*, question v.)

§ 1. MARCHÉ DES RAYONS DANS UN MÊME MILIEU.

I. Transmission de la chaleur à distance.

850. La chaleur se propage à distance. — La chaleur peut se propager de deux manières : dans la substance même des corps, de molécule à molécule, ou bien à travers l'espace, et à de grandes distances de la source dont elle émane. La chaleur en mouvement hors des corps se nomme *chaleur rayonnante* ; son existence est évidente pour la chaleur du soleil, qui nous arrive de 35 millions de lieues à travers l'espace. Mais cette chaleur est accompagnée de lumière ; elle constitue ce qu'on appelle la *chaleur lumineuse*, et l'on a longtemps douté que la *chaleur obscure* pût se propager de la même manière.

Leslie pensait que la transmission à distance était due à un mouvement vibratoire causé dans l'air par le contact du corps chaud, et transportant la chaleur de couche en couche. Il croyait même que les rayons du soleil n'avaient de chaleur qu'après avoir rencontré l'atmosphère, et il expliquait le froid des hautes régions, par la rareté de l'air qui s'y trouve. Mais Scheele a démontré que l'air ne joue aucun rôle actif dans la transmission à distance, en faisant voir que le renouvellement rapide de ce gaz, dans l'espace interposé, ne change rien aux effets produits. C'est à Scheele que sont dues les plus anciennes recherches sur la propagation à distance ; il opérait sur la chaleur sortant par la porte d'un poêle. Mariotte paraît avoir montré, le premier, que la chaleur obscure se propage par rayonnement, comme la lumière, et Lambert a ensuite fait une étude particulière de ce phénomène. Pour lever tous les doutes, il fallait opérer dans le vide. C'est ce qu'a fait Rumfort par la méthode suivante.

Rayonnement dans le vide. — Un ballon contenant un thermomètre, *a* (fig. 639), est soudé à un long tube *eb*. On remplit le ballon et le tube de mercure sec et purgé d'air, on ferme l'ouverture avec le doigt, et l'on renverse

l'appareil dans une cuvette pleine de mercure, comme pour faire un baromètre. Le mercure quitte le ballon et se tient dans le tube à la même hauteur que dans le baromètre. Le ballon est alors aussi complètement vide que possible. On pousse ensuite la flamme d'une lampe en *e*, au moyen d'un chalumeau, pendant qu'on fait tourner le tube sur lui-même. Le verre se ramollit, la pression atmosphérique produit un étranglement *e*, et le tube est bientôt obstrué. En tirant alors le ballon, on le sépare, hermétiquement fermé et parfaitement vide.

Si l'on plonge ce ballon dans l'eau chaude, on voit aussitôt le thermomètre monter par l'effet de la chaleur lancée par les parois. On peut objecter que cette chaleur est arrivée jusqu'au mercure du thermomètre, par l'intermédiaire de sa tige soudée en *a* au ballon; mais, si l'on ne plonge dans l'eau chaude que l'extrémité *a*, le thermomètre ne monte plus, ou ne monte que d'une quantité insignifiante.

Corps diathermanes. — La chaleur se propage donc dans le vide; elle peut aussi traverser directement certaines substances, sans être absorbée pour les échauffer. L'air, le verre sont dans ce cas, et en général les corps transparents pour la lumière. Mais comme les corps qui se laissent traverser par la chaleur ne donnent pas tous passage à la lumière, et *vice versa*, Melloni a désigné sous le nom de *diathermanes* ceux qui sont dans le premier cas. Ce mot correspond pour la chaleur, au mot *diaphane* relativement à la lumière. Nous étudierons en particulier les modifications qu'éprouvent les rayons de chaleur en traversant les substances diathermanes.



Fig. 639.

851. Rayonnement apparent du froid. — On fait, avec le ballon de Rumfort, une expérience qui prouve que le froid n'est pas un agent particulier, mais simplement le résultat d'une perte de chaleur. Si l'on plonge le ballon dans un liquide très-froid, le thermomètre baisse, ce que l'on pourrait être tenté d'attribuer à un rayonnement de froid. Mais si, après avoir tenu le ballon pendant quelque temps dans un liquide plus froid encore, on vient à le reporter dans le premier, le thermomètre remonte. Il reçoit donc alors de la chaleur, de ce liquide, qui d'abord semblait lancer du froid. Ainsi, les corps les plus froids émettent de la chaleur, et si le thermomètre baisse, dans la première expérience, c'est que, lui aussi, rayonne de la chaleur et en perd, quand il est dans une enceinte plus froide que lui. L'impression de froid que l'on ressent en approchant sa main d'un bloc de glace provient de même de ce que la main rayonne beaucoup de chaleur vers la glace, et non de ce que celle-ci rayonne du froid; car si l'on place le bloc près d'un thermomètre plus froid que lui, ce thermomètre monte aussitôt.

On doit conclure de là qu'il n'y a pas, comme on l'a admis longtemps, de *rayons frigorigènes*; le froid n'est que le résultat d'une perte de chaleur qui n'est pas compensée, d'où résulte une impression particulière, ou, dans le cas des corps bruts, une diminution de volume.

Nous ajouterons qu'il n'y a pas lieu de distinguer la chaleur, quant aux lois relatives à la marche des rayons, en chaleur lumineuse et chaleur obscure; ces lois étant exactement les mêmes dans les deux cas.

852. Propagation de la chaleur en ligne droite. — La chaleur se propage en ligne droite. Pour le prouver, il suffit de placer entre un foyer de chaleur et l'une des boules d'un thermoscope, ou la base de la pile du thermomultiplicateur, une suite d'écrans percés d'une petite ouverture. Ce n'est que lorsque toutes ces ouvertures sont sur une même ligne droite passant par la source de chaleur, que l'on voit l'appareil thermoscopique indiquer qu'il reçoit de la chaleur. Si l'on fait passer la chaleur par un tube, il faut qu'il ait une position et une forme telles qu'on puisse mener une ligne droite d'un point de la source de chaleur au thermomètre, sans toucher la surface intérieure de ce tube; autrement, il n'y a pas d'effet produit.

Rayon de chaleur. — On nomme rayon de chaleur toute direction prise à partir d'une surface qui émet de la chaleur, et suivant laquelle cette chaleur se propage. De là le nom de *chaleur rayonnante* donné par Scheele à la chaleur en mouvement hors des corps. Un faisceau de chaleur n'est autre chose qu'un espace conique ou cylindrique, dans tous les points duquel passent des rayons de chaleur qui partent du sommet du cône ou de la base du cylindre.

Un corps homogène dont tous les points sont à la même température, rayonne également dans tous les sens. Cependant, si l'on dispose autour d'un boulet rouge plusieurs thermomètres, on remarque que ceux qui sont en haut montent plus vite que les autres. Ce résultat est dû à l'air dilaté qui s'élève, rencontre le thermomètre supérieur et lui communique, par contact, la chaleur qu'il a empruntée au boulet. Les académiciens de Florence, ayant placé deux thermomètres dans la chambre d'un baromètre, l'un en haut et l'autre en bas, reconnurent qu'un corps chaud placé à côté du tube et à égale distance des deux thermomètres les échauffait autant l'un que l'autre.

Quand plusieurs faisceaux de chaleur venant de différentes sources, passent en même temps par une même ouverture, ils ne se gênent ni ne se modifient mutuellement; car un thermomètre *t* (fig. 640) placé sur le trajet d'un de ces faisceaux, ne varie pas quand on intercepte les autres au moyen d'écrans, *e*, *e'*, ou quand on enlève ces écrans. Ce résultat s'explique, dans le système des ondulations, par le principe de la coexistence des petites oscillations (I, 581).

853. Vitesse de la chaleur. — On n'a pu évaluer directement la vitesse de transmission de la chaleur. Toutes les fois qu'on lève un écran interposé entre une source et un thermoscope très-sensible, on voit ce dernier indiquer immédiatement l'arrivée de la chaleur, quelque éloignée que soit la source d'où elle émane. Pictet a opéré sur une distance de 69 pieds, au moyen des miroirs conjugués que nous décrivons plus loin (856). La chaleur semble donc se

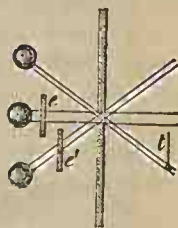


Fig. 640.

transmettre instantanément; mais on n'a opéré que sur des distances trop faibles. Nous verrons plus loin que la chaleur lumineuse n'est pas un mélange de chaleur et de lumière, mais que ce sont les mêmes rayons qui produisent en même temps les effets calorifiques et lumineux. Les vitesses de propagation doivent donc être les mêmes. Or la vitesse de la lumière est de 77000 lieues par seconde; la chaleur possède donc aussi cette vitesse, et l'on peut, pour les distances que l'on considère à la surface de la terre, la regarder comme se transmettant instantanément.

II. Réflexion de la chaleur.

854. Définition et lois de la réflexion. — Lorsque des rayons de chaleur rencontrent la surface de séparation de deux milieux différents, l'expérience montre qu'ils se divisent en deux parties; l'une qui passe au delà de la surface de séparation et pénètre dans l'intérieur du second milieu, l'autre qui revient dans le premier milieu. Ce retour des rayons, du même côté de la surface de séparation, constitue le phénomène de la *réflexion* de la chaleur.

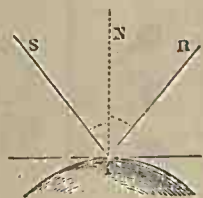


Fig. 641.

On nomme *rayon incident* un rayon calorifique, SI (fig. 641) avant sa rencontre avec la surface; et *rayon réfléchi*, le rayon, IR, après cette rencontre. Le point I se nomme *point d'incidence*. L'angle SIN, que fait le rayon incident avec la normale IN à la surface réfléchissante se nomme *angle d'incidence*, et l'angle RIN du rayon réfléchi avec la même normale, *angle de réflexion*.

Lois de la réflexion. — 1° *Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au point d'incidence sont dans un même plan.*

2° *L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.*

Pour démontrer ces lois directement, on fait tomber un faisceau cylindrique de rayons calorifiques, limité par son passage à travers des ouvertures pratiquées dans des écrans, sur une surface plane et polie qui les réfléchit, et l'on place la pile du thermo-multiplicateur (841) de manière qu'une de ses bases reçoive normalement le faisceau réfléchi. On trouve alors que la surface réfléchissante fait des angles égaux avec l'axe de la pile et avec la direction des ouvertures des écrans, et qu'elle est perpendiculaire au plan de ces deux directions. Mais ce moyen est peu précis, à cause de la nécessité d'employer un faisceau assez gros pour agir efficacement sur la pile, et alors il y a incertitude dans les directions des faisceaux incident et réfléchi. Cet inconvénient n'existe pas pour la lumière, notre œil pouvant être impressionné par un faisceau lumineux d'une finesse extrême; aussi les lois de la réflexion de la lumière, qui sont les mêmes que pour la chaleur, peuvent-elles se prouver directement avec une précision extrême. Cette circonstance nous offre un moyen d'établir les mêmes lois pour la chaleur

lumineuse, en constatant que la route suivie par les rayons calorifiques, après la réflexion, est la même que celle des rayons lumineux.

855. Miroirs paraboliques. — On peut prouver indirectement les lois de la réflexion de la chaleur, sans s'appuyer sur les propriétés de la lumière, au moyen des miroirs paraboliques, c'est-à-dire de surfaces polies ayant la forme d'un paraboloïde de révolution. Or, d'après les propriétés de la parabole, l'angle Sms (fig. 642) fait par une droite mS , parallèle à l'axe, avec une autre droite mf passant par le foyer de la courbe, est partagé en deux parties égales par la normale mn . Si donc nous plaçons un point rayonnant au foyer d'un miroir parabolique, et si les rayons, après s'être réfléchis sur ce miroir, forment un faisceau parallèle à son axe, nous devons en conclure que la réflexion s'est faite suivant les lois énoncées. Si, d'un autre côté, on reçoit sur le miroir un faisceau de rayons parallèles à son axe, ces rayons, après la réflexion, devront se croiser au foyer. Tous ces résultats sont d'accord avec l'expérience. Celle qui suit comprend les divers cas à vérifier.

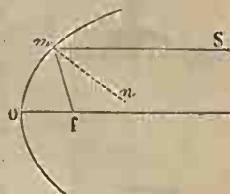


Fig. 642.

856. Miroirs conjugués. — On place en face l'un de l'autre, à une distance de 10 à 15 mètres, deux miroirs paraboliques m et n (fig. 643), de manière que leurs axes coïncident. Au foyer F de l'un d'eux, on dispose des charbons ardents contenus dans une corbeille métallique, et au foyer de l'autre, F' on place un corps facile à enflammer, comme de l'amadou ou du fulmi-coton.

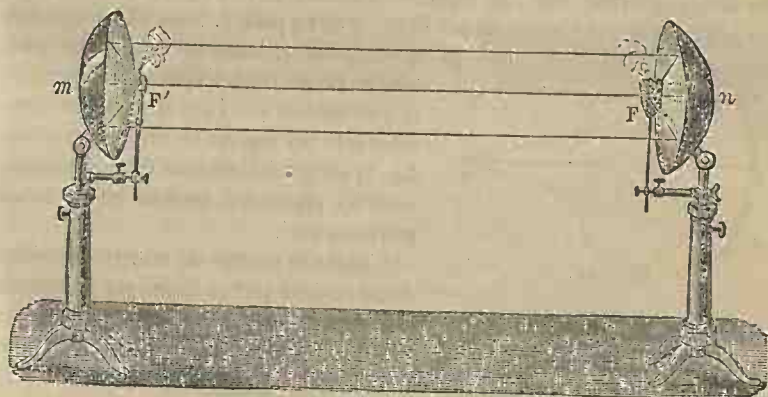


Fig. 643.

Au bout de quelques instants l'inflammation se produit. L'expérience ne réussit pas, quand le corps inflammable est à côté du foyer du miroir. Si l'on met en F une très-petite boule incandescente, en plaçant en F' le réservoir d'un très-petit thermomètre, on trouve qu'il ne monte que lorsqu'on le place exactement au

foyer. Enfin, si l'on met une bougie en F, on remarque que le point où se rassemblent les rayons lumineux coïncide avec le point F'.

Réflexion dans le vide. — H. Davy a montré au moyen de l'appareil (fig. 644) que les lois de la réflexion sont indépendantes de la présence de l'air. Les deux miroirs sont placés dans un même récipient dont on extrait l'air. Au foyer f du miroir supérieur est disposé un fil de platine très-fin, replié plusieurs fois sur lui-même, et soudé à deux fils de cuivre a et b qui sortent du récipient par deux tubulures. On fait passer un courant électrique à travers le fil ab , la portion f devient incandescente, et le thermomètre placé au foyer f' monte aussitôt.

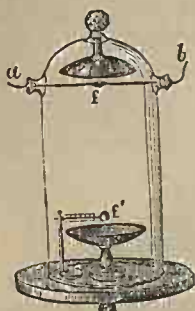


Fig. 644.

857. Miroirs sphériques à très-petite ouverture. — Les lois de la réflexion de la chaleur peuvent aussi se prouver indirectement au moyen de certaines conséquences fournies par les miroirs sphériques. Nous étudierons en détail, dans l'optique, les propriétés de ces sortes de miroirs; ici, nous ne parlerons que de celles sur lesquelles on s'appuie pour prouver les lois de la réflexion de la chaleur.

Soit S (fig. 645) un point qui rayonne de la chaleur, mm' la coupe d'un miroir sphérique par un plan passant par son centre de courbure o et par le point S . Si l'on joint ces deux points, on obtient l'axe du miroir par rapport au point S . Menons le rayon incident Sm , qui rencontre au point m , la surface polie du miroir sphérique mm' ; ce rayon se réfléchira suivant mf , en faisant l'angle omf égal à Smo , et viendra couper l'axe So en un point f . Nous allons faire voir que ce point de rencontre est le même pour tous les rayons réfléchis émanant du point S , si l'on suppose que l'arc mm' est extrêmement petit par rapport au rayon de courbure Ao . Il suffira évidemment de le démontrer pour les rayons qui tombent sur un même méridien mm' .

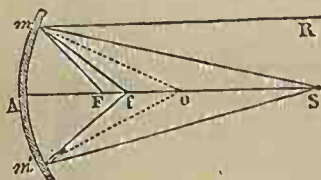


Fig. 645.

L'angle au sommet du triangle Smf étant divisé en deux parties égales par la normale mo , on a $mf : mS = of : oS$. Soit p la distance SA , que nous regardons comme égale à Sm , l'arc Am étant extrêmement petit; p' la distance fA , égale à fm par la même raison, et enfin r le rayon de courbure Ao ; la proportion devient

$$p' : p = r - p' : p - r, \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{2}{r}, \quad [1]$$

en faisant le produit des extrêmes égal à celui des moyens, et divisant tous les termes par $p'p$. L'expression [1] est la formule des miroirs sphériques. On en

tiré la valeur de p' ou de la distance fA . On voit que cette distance ne dépend pas de la position particulière du point m , et par conséquent qu'elle serait la même pour tout autre rayon incident.

Si le centre calorifique était au point f , il est évident, d'après les lois de la réflexion, que les rayons réfléchis iraient former leur foyer au point S . A cause de cette réciprocité, les points S et f se nomment *foyers conjugués*.

Quand l'arc mm' n'est pas excessivement petit, mais seulement très-petit par rapport au rayon oA , c'est-à-dire quand l'angle mom' , qu'on appelle l'ouverture du miroir, ne comprend qu'un petit nombre de degrés, les propriétés que nous venons de démontrer se vérifient encore approximativement, et l'espace où se croisent les rayons réfléchis est resserré dans une étendue d'autant plus petite que l'ouverture comprend moins de degrés.

L'expérience vérifie tous ces résultats. Quand la source de chaleur placée en avant du miroir occupe un espace assez grand, chacun de ses points possède un axe particulier et forme sur cet axe un foyer conjugué qui lui correspond. L'espace dans lequel on peut placer le thermomètre a donc lui-même une étendue en rapport avec celle du corps chaud.

§58. Foyer principal. — Dans le cas particulier des rayons parallèles, c'est-à-dire quand on a $p = \infty$, l'axe n'est autre chose que le rayon qui passe par le centre o . La formule donne alors $p' = \frac{1}{2} r$, c'est-à-dire que le foyer est au milieu du rayon de courbure.

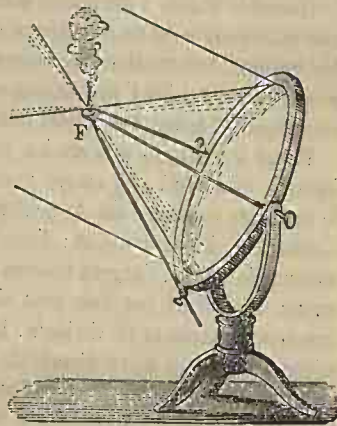


Fig. 646.

Ce résultat peut se trouver directement : soit Rm (fig. 645) un rayon parallèle à l'axe oA , et mF le rayon réfléchi qui lui correspond. Le triangle omF est isocèle; car les angles moF et Rmo sont égaux comme alterne-interne, et l'angle omF est égal aussi à Rmo , d'après les lois de la réflexion. Le côté oF est donc égal à mF , et comme mF est sensiblement égal à AF , l'arc Am étant extrêmement petit, le point F est le milieu de Ao . — Le foyer F formé par les rayons parallèles se nomme *foyer principal* du miroir sphérique.

Réciproquement, si le point rayonnant est placé au foyer principal, les rayons réfléchis forment un faisceau parallèle à l'axe Fo . Il résulte de là que l'expérience des *miroirs conjugués* (fig. 643) peut se faire avec des miroirs sphériques. Cette expérience, fort ancienne, est attribuée par Nollet aux jésuites de Prague. Pictet, le premier, l'a répétée avec la chaleur obscure; il plaçait à l'un des foyers un vase rempli d'eau bouillante, et à l'autre, un thermomètre à air.

Les miroirs conjugués sont ordinairement de laiton éroui. Depuis quelques

années, on en fait en verre argenté en dessus par les procédés électro-chimiques, qui produisent des effets bien supérieurs à ceux que donnent les miroirs métalliques.

859. Miroirs ardents. — Si l'on fait tomber les rayons du soleil sur un miroir sphérique concave, ils se croisent, après la réflexion, au foyer principal, les rayons du soleil étant très-sensiblement parallèles, à cause de la grande distance de cet astre. Si l'on met en ce point des matières combustibles, elles s'enflamment promptement, pour peu que le miroir ait 20 ou 30^{cm} de largeur. Destinés à cet usage, ces miroirs portent les nom de *miroirs ardents*. Ceux en glace étamée, et surtout en verre argenté en dessus, produisent les effets les plus énergiques.

Quand le miroir a un grand diamètre, et en même temps un grand rayon de courbure pour qu'il ne comprenne qu'un petit nombre de degrés, il peut fondre les métaux, les matières terreuses, etc. La figure 552 représente un de ces miroirs ardents. En F est un support qui sert à soutenir les corps que l'on veut soumettre à l'action des rayons solaires concentrés au foyer.

Parmi les miroirs ardents les plus célèbres, nous citerons celui de Tschisnhausen, vers 1687, en cuivre assez mince pour n'être pas très-lourd, et dont le rayon de courbure est de 2^m,32, et la largeur de 1^m,74. Au foyer, le bois s'enflamme instantanément; l'eau entre bientôt en ébullition et disparaît en vapeur; le cuivre, l'argent fondent en quelques minutes; l'ardoise se transforme en un verre noir que l'on peut tirer en fils; la brique, la pierre ponce, les creusets, fondent et se vitrifient. Bernière a construit pour le roi, en 1757, un miroir concave en verre étamé, de 1^m,16 d'ouverture, au foyer duquel l'argent et même le fer fondaient en quelques secondes; les cailloux se ramollissaient et coulaient comme du verre. On a fait de ces miroirs en bois vernis; on en a recouvert de lames de paille, et Mariotte a enflammé de la poudre avec un miroir de *glace* obtenue en congelant de l'eau bien purgée d'air. On a construit aussi des miroirs ardents paraboliques; le foyer est plus resserré, mais il faut que les rayons soient parallèles à l'axe du paraboloïde, ce qui est incommode à cause du mouvement du soleil.

Les propriétés des miroirs ardents étaient connues des anciens, Euclide en fait mention dans son optique. Tout le monde a entendu raconter comment Archimède incendiait, au moyen de semblables miroirs, les vaisseaux des Romains assiégeant Syracuse, et Proclus, en 514, ceux de Vitalien assiégeant Byzance. Depuis, ces faits ont été révoqués en doute, principalement par Descartes. Polybe, 50 ans après Archimède, n'en fait pas mention; il en est de même de Tite-Live et de Plutarque. Ce n'est que très-longtemps après, que Zonaras et Tzetzes, dans le douzième siècle, ont répandu cette histoire. Galien, plus près d'Archimède, dit bien que ce grand géomètre brûla les vaisseaux de l'ennemi, mais le mot *pyria* dont il se sert ne désigne pas spécialement un miroir ardent, mais simplement une *machine à feu*. Comme Archimède a traité des miroirs ardents et qu'il brûla la flotte, on a mêlé les deux faits. D'après les expressions

de Zonaras¹, nous pensons que l'on peut admettre qu'Archimède se servait d'un miroir pour enflammer des matières incendiaires qu'il lançait ensuite sur les vaisseaux. Le miroir n'était qu'un moyen commode de se procurer du feu. Il est bien vrai que Tzetzés décrit dans ses vers un appareil formé de miroirs plans, soutenus par des supports à charnière, et qu'Archimède disposait, dit-il, de manière à ce qu'ils fussent tangents à une même sphère. Mais ne peut-on pas voir là simplement le désir, facile à expliquer chez un poète, de rendre compte de la manière dont on dut opérer dans l'accomplissement d'un fait qu'il admet d'abord comme avéré. D'ailleurs n'y avait-il pas une foule de moyens plus simples de brûler des navires placés à une assez petite distance pour être à portée du foyer d'un miroir?

Quoi qu'il en soit, la possibilité de l'opération attribuée à Archimède n'est pas douteuse. Anthémios, architecte de l'église Sainte-Sophie de Constantinople, après avoir discuté l'histoire d'Archimède, avait construit une machine composée de 24 miroirs plans dirigés de manière que les faisceaux réfléchis se croisaient en un même point, où le bois s'enflammait. Il fit aussi tenir ces miroirs par des hommes, qui les dirigeaient à volonté.

Plus tard, le P. Kircher, guidé par la description de Tzetzés, produisit, avec cinq miroirs plans, une chaleur insupportable à une distance de 35 mètres.

Buffon, qui ignorait les essais faits avant lui, a obtenu des effets beaucoup plus intenses et passe généralement pour l'inventeur des miroirs articulés. La machine qu'il construisit était composée d'une centaine de miroirs plans en verre

étamé, de 280 centimètres carrés environ, ajustés à charnière sur un châssis, de manière que l'ensemble formât une surface sphérique. Cette machine constituait un miroir concave à foyer variable. Avec cet appareil, Buffon fit fondre du plomb à 50^m de distance, et de l'argent à 35^m. Le bois s'enflammait à 80^m.

On a songé à différentes époques, et tout récemment encore à utiliser la chaleur des rayons solaires ainsi concentrés au foyer de miroirs concaves. Nous reviendrons sur cette intéressante application en parlant du pouvoir conducteur des gaz pour la chaleur (980).

860. Réflexion diffuse. — Quand on détruit le poli d'un miroir concave, l'effet produit est considérablement affaibli. Ce résultat, constaté par Leslie, vient de la *diffusion* d'une partie de la chaleur par la surface dépolie. La diffusion

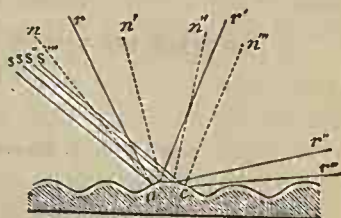


Fig. 647.

¹ « Archimède, dit Zonaras, ayant reçu les rayons du soleil sur un miroir, à l'aide de ces rayons rassemblés et réfléchis par l'épaisseur et le poli du miroir, il embrasa l'air et alluma une grande flamme qu'il lança tout entière sur les vaisseaux qui mouillaient dans la sphère de son activité..... »

consiste dans la réflexion, en chaque point du miroir, dans une foule de directions différentes, de manière que la chaleur réfléchie ne passe pas au foyer, qui ne reçoit que celle qui est réfléchie *spéculairement*, c'est-à-dire par les parties de la surface qui ont conservé leur direction et leur poli. Ce phénomène, étudié spécialement par Melloni, est analogue à la *réflexion diffuse* de la lumière sur les surfaces non polies, en vertu de laquelle nous distinguons la forme et la couleur des objets *éclairés*.

La chaleur diffuse est attribuée, comme la lumière diffuse, à la réflexion qui se fait, suivant les lois ordinaires, sur le contour des aspérités qui recouvrent les surfaces dépolies, de manière que les rayons réfléchis marchent dans des directions très-variées, à cause des directions très-différentes des normales aux divers points de la surface très-petite d'une même aspérité. Cela se voit sur la figure 647, dans laquelle s, s', s'', s''' représentent des rayons incidents parallèles; n, n', n'', n''' les normales aux points où ces rayons rencontrent une aspérité ac , représentée très-grossie pour la rendre distincte; et r, r', r'', r''' ... les rayons réfléchis, qui se trouvent distribués dans l'espace angulaire rr''' .

§ 2. PASSAGE DES RAYONS A TRAVERS LES CORPS. RÉFRACTION DE LA CHALEUR

I. Pouvoir diathermane.

861. Corps diathermanes. — Il y a des corps qui peuvent être traversés de part en part par la chaleur rayonnante, sans l'arrêter pour s'échauffer à ses dépens. C'est ainsi que la chaleur traverse l'air qui nous sépare d'un foyer en activité, que les rayons du soleil passent à travers des lames de verre, en ne perdant que peu de leur intensité. Ce fait était connu depuis des siècles; mais, pendant longtemps, on a cru que la *chaleur obscure* était arrêtée par une lame de verre. Mariotte avait reconnu, en effet, qu'une semblable lame empêche la chaleur venant du feu d'une cheminée et tombant sur un miroir sphérique, d'agir sur un thermomètre placé au foyer. De là l'explication de cette pratique, en usage dans les fonderies depuis un temps immémorial, consistant à regarder la matière en fusion, à travers une lame de verre, pour arrêter la plus grande partie des rayons calorifiques. Scheele arriva au même résultat que Mariotte. Cependant Pictet obtint un effet sensible au foyer de l'un de ses miroirs conjugués, quand, au foyer de l'autre il plaçait un vase plein d'eau bouillante séparé du premier miroir par un carreau de vitre. W. Herschell constata, au moyen d'un simple thermomètre, le passage de la chaleur obscure à travers certaines lames, en les plaçant très-près de la source calorifique.

Malgré ces expériences, la question resta longtemps douteuse. On prétendit que l'effet produit provenait de la chaleur absorbée par la lame interposée, qui,

après s'être échauffée, rayonnait vers le thermomètre. Mais P. Prevost¹ fit l'expérience avec une lame de *glace*, dans un espace dont la température était de -3° ; la chaleur franchit cet écran glacé de manière à faire marcher un thermoscope placé du côté opposé. En faisant mouvoir une lame de verre dans son propre plan, ce qui renouvelait à chaque instant la partie qui était en face de l'ouverture d'un écran placé devant un vase plein d'eau bouillante, il vit l'effet rester le même que lorsque la lame était en repos. Enfin, Prevost a vu les rayons se transmettre à travers une mince nappe d'eau tombant verticalement; la source de chaleur était un morceau de fer brûlant, mais obscur, et le thermomètre, dont la boule était noircie, indiquait environ $\frac{1}{2}$ degré. Delaroché a confirmé ces résultats par un moyen indiqué par Maycock : ayant recouvert de noir de fumée la face tournée du côté de la source, d'une lame de verre, cette lame s'échauffa davantage, et cependant le thermomètre placé du côté opposé ne monta plus, parce que le noir de fumée interceptait la chaleur rayonnante. Enfin, Melloni a répété la plupart de ces expériences avec le thermo-multiplicateur, et il a ajouté un dernier argument aux preuves de la transmission par rayonnement; il constata que, dès qu'on enlève l'écran qui abrite la pile, l'aiguille du rhéomètre se met immédiatement en mouvement et atteint sa position d'équilibre dans un temps très-court, indépendamment de l'intensité de la source et de l'épaisseur de la lame traversée par les rayons, et le même qu'en l'absence de cette lame. De plus, si les rayons traversent plusieurs ouvertures en ligne droite avant de tomber sur la lame, dès qu'on place la base de la pile en dehors du faisceau prolongé, elle n'indique plus aucune élévation de température, de quelque manière qu'on dirige son axe, tandis que la lame, si elle rayonnait, devrait toujours lui envoyer plus ou moins de chaleur.

Il est donc bien prouvé aujourd'hui que la chaleur rayonne à travers certains corps. Melloni a nommé *diathermanes* ou *diathermiques*, les substances qui peuvent ainsi être traversées par la chaleur rayonnante.

862. Banc de Melloni. — Melloni a fait un grand nombre d'expériences sur les *pouvoirs diathermanes* des corps, au moyen du thermo-multiplicateur; quand on veut les répéter, on se sert de l'appareil nommé *banc de Melloni* (fig. 648). La règle LL supporte différentes pièces que l'on peut déplacer, et fixer au moyen de vis de pression. P est la pile thermo-électrique, et r le rhéomètre; a, a' sont des écrans formés de deux ou trois lames de laiton, et pouvant tourner dans leur propre plan, de manière à s'abattre latéralement quand on veut découvrir la pile. On emploie alternativement différentes sources de chaleur : un cube plein d'eau chaude, C, dont on entretient la température au moyen d'une lampe; une hélice en fil de platine, que l'on rend incandescente dans la flamme d'une lampe à alcool; une *lampe de Locatelli* à mèche carrée et sans cheminée de verre... L'écran e est muni d'une ouverture dont on fait varier la grandeur au moyen du disque s qui porte sur son pourtour des trous circulaires de grandeur

¹ *Journal de Physique* de C. de Laméthérie (1811); t. LXXII, p. 168.

différente, que l'on amène successivement au milieu de l'ouverture de l'écran, pour délimiter le faisceau qui tombe sur la pile. Enfin, un support sert à soutenir, en *n*, les corps que l'on veut faire traverser par les rayons.

Pour évaluer la proportion de chaleur transmise à travers une lame placée à l'ouverture de l'écran *e*, on commence par disposer la source de chaleur à une distance telle que la déviation de l'aiguille du rhéomètre soit de 30° quand ses rayons tombent librement sur la base de la pile. On interpose ensuite l'écran *a'*, et l'on place la lame à l'ouverture de l'écran *e*. Quand la pile s'étant refroidie, l'aiguille du rhéomètre est revenue au zéro, on abat l'écran *a'*, on voit l'aiguille s'avancer, et l'on observe l'arc d'impulsion; d'où l'on déduit la déviation stable correspondante, puis l'intensité du rayonnement au moyen des tables (842). En divisant cette intensité par celle des rayons tombant librement sur la pile, on a la proportion de chaleur qui a traversé la lame diathermane.

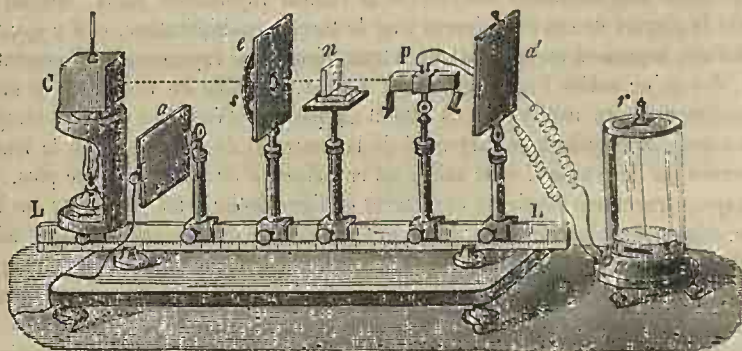


Fig. 648.

On représente ordinairement par 100 la quantité de chaleur envoyée directement à la pile, et l'on y rapporte, par une proportion, la quantité de chaleur qui a traversé la lame. Par exemple, si les effets déduits des déviations successives de l'aiguille sont 35 et 14, on écrira $35 : 14 = 100 : x$ d'où $x = 40$. On exprime souvent ce résultat en disant que, sur 100 rayons de chaleur, la lame en a laissé passer 40 ou en a arrêté 60.

863. Influence du poli sur le pouvoir diathermane. — Melloni a d'abord constaté que la quantité de chaleur qui traverse une lame diathermane est d'autant plus grande que ses faces sont mieux polies¹. Ayant pris huit fragments d'une même glace de $8^{\text{mm}},371$ d'épaisseur, dont la face tournée vers la pile était polie, ou usée avec du sable, de l'émeri ou d'autres poudres dures, il trouva que la déviation du rhéomètre, qui était de 30° pour les rayons directs de la source, était de $19^\circ,15$ pour la lame la mieux polie, et de $5^\circ,38$ pour

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LIII, p. 5.

celle dont la face avait été le plus altérée. La proportion des rayons calorifiques transmis est donc moindre, comme pour la lumière, quand la surface est moins polie.

864. Décroissement des pertes avec l'épaisseur. — Melloni a ensuite confirmé ce fait important, déjà signalé par Delaroche, que les rayons qui ont traversé une lame éprouvent moins de perte *proportionnellement*, quand ils en traversent une seconde de même substance. Au lieu d'employer les miroirs conjugués, comme le faisait Delaroche, Melloni s'est servi du thermo-multipliateur. Ayant pris quatre fragments d'une même glace, il les réduisit à des épaisseurs proportionnelles aux nombres 1, 2, 3, 4, et obtint les résultats suivants, en prenant pour source une *lampe d'Argent* donnant directement une déviation de 30° :

ÉPAISSEURS des lames.	DÉVIATIONS	RAYONS TRANSMIS sur 100.	RAYONS ARRÊTÉS sur 100.
2,068	21,625	61,9	38,1
4,136	20,312	57,6	42,4
6,204	19,687	55,8	44,2
8,272	19,375	54,9	45,1

Supposons la lame la plus épaisse divisée par la pensée en quatre couches d'égale épaisseur ; les quantités de chaleur qui se présentent pour traverser chacune d'elles sont

100, 61,9, 57,6, 55,8 ;

et les quantités arrêtées par chacune des couches successives en particulier,

38,1, 42,4 — 38,1 = 4,3, 44,2 — 42,4 = 1,8, 45,1 — 44,2 = 0,9.

En prenant le rapport avec la quantité qui se présente à chaque couche, on obtient les nombres de plus en plus petits

0,381, 0,069, 0,031, 0,016.

Cette loi a été vérifiée jusqu'à des épaisseurs de 54^{mm}. Si, comme le faisait Delaroche, on place à la suite les unes des autres des plaques de même substance et de même épaisseur, on arrive à la même conclusion. Seulement, comme à l'absorption il faut ajouter la perte constante due à la réflexion qui se fait à la face d'entrée et à la face de sortie de chaque lame, les pertes décroissent moins rapidement. Avec des lames de verre de 2^{mm},068 d'épaisseur, les pertes rapportées à la quantité reçue par chacune d'elles, furent de 0,381 ; 0,134 ; 0,087 ; 0,058.

Cas des liquides. — Les liquides ont donné des résultats semblables. Six auges ayant deux faces parallèles formées par des lames de verre mince séparées par des intervalles variant de 6^{mm},767 à 108^{mm},279, furent remplies d'huile de colza, et placées successivement en face de l'ouverture de l'écran *e* (fig. 648). La lampe était approchée de manière à donner une déviation de 30° à travers chaque auge vide, et le décroissement des pertes s'est manifesté comme dans le cas des lames solides.

865. Pouvoir diathermane des différents corps. — Prevost avait reconnu que l'eau et le verre ne laissent pas passer également la chaleur rayonnante. Delaroche avait aussi reconnu que du verre verdâtre en laissait passer une plus grande proportion que du verre incolore; mais les épaisseurs n'étaient pas égales. Melloni, par un grand nombre d'expériences faites sur des substances de natures très-diverses, a établi d'une manière indubitable que leurs pouvoirs diathermanes diffèrent notablement. Pour les liquides, il construisit des espèces d'auges, en taillant de larges échancrures dans une glace, et appliquant sur les deux faces des lames minces de verre qui adhéraient par juxta position et étaient maintenues par un encadrement. L'intervalle entre les deux lames était rempli du liquide à éprouver. Voici une partie des résultats obtenus par Melloni, avec une *lampe d'Argent à cheminée de verre*; les résultats pourraient être très-différents avec d'autres sources, comme nous le verrons (875), mais il ne s'agit ici que de prouver que le pouvoir diathermane change avec la nature des corps.

Verres incolores (épaisseur : 4^{mm},88).

Rayons directs.	100	Verre à vitre	de 58 à 50
Flint-glass de div. qualités. . .	de 67 à 64	Crown anglais.	59
Verre à glace.	de 62 à 59		

Liquides (épaisseur : 9^{mm},21).

Sulfure de carbone.	63	Acide sulfurique pur.	17
Chlorure de soufre (rouge brun). . . .	63	Alcool absolu, acide nitrique.	15
Huile de noix jaune, essence de téréb. .	31	Hydrate d'ammoniaque.	15
Huile de colza, d'olive.	30	Hydrate de potasse.	13
Naphte naturel.	28	Acide acétique rectifié.	12
Essence de copahu, de lavande, huile d'œillette.	26	Eau sucrée, salée, alunée.	12
Éther sulfurique.	21	Eau distillée, blanc d'œuf.	11

Substances cristallisées (épaisseur : 2^{mm},62).

Sel gemme (diaphane).	92	Tourmaline verte (diaphane).	27
Spath d'Islande, quartz (diaphanes). .	62	Chaux sulfatée (diaphane).	20
Quartz enfumé.	57	Chaux fluatée (translucide).	15
Topaze du Brésil incolore.	54	Alun de glace.	12
Carbonate de plomb (diaphane). . . .	52	Sulfate de cuivre bleu foncé (diaphane). .	0
Agate blanche (translucide).	35		

Dans les corps non cristallisés, le pouvoir diathermane augmente généralement avec le *pouvoir réfringent* pour la lumière, c'est-à-dire avec la propriété de dévier plus ou moins de leur direction les rayons lumineux qui passent obliquement de l'air dans la substance. Les corps cristallisés ne suivent pas la même loi; mais on n'a pas reconnu de relation entre la forme cristalline et le pouvoir diathermane, et des lames taillées suivant différentes directions dans un cristal de quartz, ou de spath d'Islande, laissent passer la même proportion de rayons calorifiques. La structure a pourtant une grande influence; car une plaque de sel marin ordinaire arrête tous les rayons de la lampe d'Argent, tandis qu'une lame de sel gemme en laisse passer 0,923. L'alun et le sel gemme laissent passer des quantités très-différentes, 0,12 et 0,923, de la chaleur incidente, et l'eau saturée de l'un ou de l'autre de ces sels en laisse passer la même proportion 0,12.

M. Wilhelmy avait cru que le verre était plus diathermane quand il était chaud que lorsqu'il était froid. Mais MM. de la Provostaye et Desains n'ont trouvé aucune différence, avec le verre et le sel gemme, froids ou à 150°

La *transparence* des corps n'est pas toujours en rapport avec leur *pouvoir diathermane*. Ainsi, l'eau laisse passer très-peu de chaleur rayonnante, et elle est plus diaphane que le chlorure de soufre et les huiles, qui en laissent passer beaucoup plus. Du verre bien transparent, coloré en vert par de l'oxyde de cuivre, est à peine diathermane, tellement qu'une lame de ce verre, pour peu qu'elle soit épaisse, intercepte toute la chaleur solaire concentrée au foyer d'un miroir ardent, pendant que la lumière y présente un éclat des plus vifs. L'alun, l'acide citrique, qui sont parfaitement transparents, laissent passer moins de chaleur, sous une épaisseur de 1^{mm},5, qu'une plaque de quartz enfumé de 86^{mm} d'épaisseur assez foncée pour empêcher de distinguer les lettres d'une page imprimée en gros caractères. Les rayons transmis à travers l'alun, ne produisant qu'une déviation de 6°, ceux qui traversent la plaque épaisse de quartz donnent 19°. Des lames de mica noir, complètement opaques, et de 0^{mm},9 d'épaisseur, laissent encore passer 0,20 des rayons de chaleur émanant d'une lampe de Locatelli; et des lames de verre noir de 1^{mm} d'épaisseur, à travers lesquelles on ne peut même distinguer le soleil, en laissent passer 0,26. Citons enfin la dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, qui, sous une épaisseur de 5 à 6 centimètres intercepte complètement la lumière la plus vive, et laisse passer jusqu'à 89 pour 100 de la chaleur qui l'accompagne.

La propriété de laisser passer la chaleur et celle de laisser passer la lumière ne marchent donc pas toujours ensemble. De là la nécessité d'employer des termes différents pour les désigner, et Melloni a nommé corps *diathermanes* ou *diathermiques* ceux qui se laissent traverser par les rayons de chaleur. Ceux qui, comme les métaux, le bois, ne laissent pas passer la chaleur sont dits *athermanes* ou *athermiques*.

Ces termes correspondent au mot *opaque*, pour la lumière. Au mot *transparence*, Melloni oppose celui de *diathermanéité* ou de *diathermansie*.

Remarquons que la chaleur qui ne traverse pas est retenue dans la lame, qui l'absorbe, et s'échauffe d'autant plus qu'elle est moins diathermane.

866. Propriétés du sel gemme. — Le sel gemme ou sel minéral possède le pouvoir diathermane le plus prononcé. Sur 100 rayons, une plaque de ce sel en transmet 92, 3, et cette proportion reste la même quand l'épaisseur augmente. Melloni a conclu de là que la plaque n'absorbe aucune partie de la chaleur incidente, et que la perte constante de 7, 7 provient de la réflexion aux faces d'entrée et de sortie de la lame. Cependant, MM. de la Provostaye et P. Desains ont reconnu que le sel gemme absorbe, sous une grande épaisseur, une très-petite proportion des rayons des sources faibles; de même que le verre le plus pur arrête un peu de lumière et lui imprime une teinte verdâtre quand il est très-épais. — Nous verrons plus loin (878) d'autres propriétés remarquables du sel minéral.

867. Pouvoir diathermane des gaz. — On a longtemps considéré les gaz incolores comme tellement diathermanes que la chaleur les traverserait sans

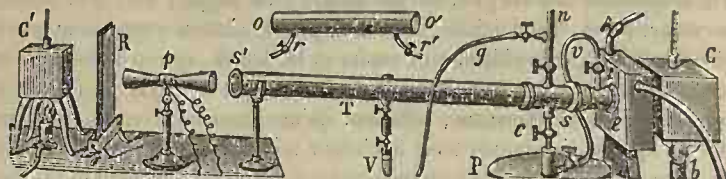


Fig. 649.

éprouver d'absorption sensible, quand le trajet n'est que de quelques mètres. Mais, M. Tyndall, en employant une méthode très-délicate, a prouvé qu'il n'en est pas ainsi, et même que certains gaz absorbent la plus grande partie des rayons qui les traversent¹. La figure 649 représente l'appareil principal employé par cet éminent physicien. T est un gros tube, de 1^m environ de longueur, fermé à ses extrémités par des plaques de sel gemme *s'*, *s* et destiné à contenir le gaz. En C, est un cube plein d'eau bouillante, auquel est soudé, sur le prolongement du tube T, un tube court *t*, dont on peut enlever l'air par le canal *v*, et dont on empêche l'échauffement au moyen d'eau circulant dans la caisse *e*. — Après avoir fait le vide dans le tube T par le canal *c*, on lance les rayons émis par la source C, à travers ce tube, et on les reçoit sur la pile *p* d'un thermo-multiplicateur (841). L'aiguille du rhéomètre est déviée; et on la ramène au zéro, position pour laquelle elle est le plus sensible, au moyen du compensateur C', que l'on démasque en retirant peu à peu l'écran régulateur R. On remplit ensuite le tube T, par le canal *g*, d'air ou d'un autre gaz, purifié avec le plus grand soin; les plus faibles

¹ *Philosophical Magazine*, 4^e série, t. XXIV (1862), pp. 270 et 337.

traces d'impuretés ayant une grande influence. On voit aussitôt l'aiguille du rhéomètre marcher et indiquer un affaiblissement dans les rayons transmis.

Avec l'appareil dont se servait M. Tyndall, l'air et les gaz simples permanents, produisaient une déviation de 1° environ. En prenant l'absorption correspondante pour unité, les autres gaz ont donné les résultats suivants, sous la pression commune de 760^{mm}.

Gaz.	Absorptions.	Gaz.	Absorptions.	Gaz.	Absorptions.
Air.....	1	Acide chlorhydrique ..	62	Acide sulfhydrique ...	390
Azote, oxygène.....	1	Oxyde de carbone....	90	Gaz des marais.....	403
Hydrogène	1	Acide carbonique	90	Acide sulfureux	710
Chlore	39	Bioxyde d'azote.....	355	Gaz oléfiant	970

On voit que les gaz composés produisent une absorption considérable. Le gaz ammoniac absorbe 1195 fois plus que l'air, on peut même dire qu'il est *athermane*; car l'interposition d'un écran ne fait pas bouger sensiblement l'aiguille du rhéomètre.

De plus, ces gaz composés possèdent, quand ils sont chauds, la faculté de rayonner avec une intensité comparable à leur pouvoir d'absorption; ce que l'on constate en faisant passer devant la pile, et sans la toucher, une colonne brûlante du gaz, obtenue en la faisant sortir par une couronne de trous, de manière qu'elle enveloppe une boule de cuivre très-chaude, mais au-dessous du rouge. L'aiguille du rhéomètre, à peine déplacée par les gaz simples, est d'autant plus déviée par les autres qu'ils sont moins diathermanes.

Sous des pressions plus faibles, les différences entre les pouvoirs diathermanes des gaz sont beaucoup plus prononcées; ainsi, sous une pression de 1 pouce anglais (25^{mm},4), les absorptions du *chlore*, du *brome*, du bioxyde d'azote, du gaz oléfiant ont été 60, 160, 1860, 6030; l'absorption par l'air étant prise pour unité. Celle-ci n'a pu être déterminée directement sous une aussi faible pression; elle était déduite de l'absorption 1 sous la pression de 760^{mm}, ou 30 pouces, en la divisant par 30, ce qui suppose que l'absorption est proportionnelle à la pression. M. Tyndall a reconnu qu'il en est ainsi pour un même gaz, quand on part d'une pression première extrêmement faible, et qu'on s'en tient aux petites pressions; au delà, l'absorption augmente plus vite que la densité.

868. Vapeurs. — Pour opérer sur une vapeur, on place le liquide qui doit la fournir, dans un petit flacon à robinet V (*fig.* 649) dans lequel on fait ensuite le vide, et qu'on ajuste au tube T, dont on extrait aussi l'air. On ouvre peu à peu les robinets qui surmontent le flacon V, la vapeur du liquide se répand dans le tube T, et l'on ferme les robinets quand le manomètre de la machine pneumatique indique la pression voulue. Voici quelques-uns des résultats obtenus par M. Tyndall sous diverses pressions, en prenant pour unité l'absorption de l'air sous la pression de 760^{mm}.

PRESSIONS	2 ^{mm} ,5 12 ^{mm} ,7 25 ^{mm} ,4			PRESSIONS	2 ^{mm} ,5 12 ^{mm} ,7 25 ^{mm} ,4		
Sulfure de carbone.	45	47	62	Éther sulfurique...	300	710	870
Iodure de méthyle..	35	147	242	Alcool.....	325	622	»
Chloroforme.....	85	182	236	Éther formique....	480	870	1075
Alcool méthylique..	109	390	590	Éther acétique....	590	980	1195
Amylène.....	182	535	823	Éther borique....	620	»	»

On voit combien est grande l'absorption produite par les vapeurs, sous des pressions de quelques millimètres.

Quand on ne veut pas obtenir de valeurs comparatives, on peut se contenter de faire passer, entre la source et la pile, une colonne de vapeur mêlée à un courant d'air et sortant par une lame criblée de trous. Dans ce cas, l'abondance des vapeurs étant en rapport avec la volatilité des liquides, on conçoit que l'ordre du tableau ci-dessus se trouvera modifié.

Odeurs. — L'odeur des fleurs, des parfums, exerce aussi une absorption considérable, quand on mêle leurs exhalaisons à l'air sec pendant qu'il s'introduit dans le tube T (fig. 649). Par exemple, les odeurs de *géranium*, *citron*, *lavande*, absorbent 33, 45 et 355 fois plus que l'air sous la pression de 760^{mm}. L'ozone absorbe aussi notablement, comme nous le verrons en traitant de ce mystérieux produit (T. III).

869. Absorption de la vapeur d'eau. — M. Tyndall a découvert que la vapeur d'eau communique à l'air auquel elle est mêlée un pouvoir absorbant qui joue un rôle important, comme nous le verrons, dans la distribution de la chaleur à la surface du globe. Si l'on remplit le tube T (fig. 649) d'air bien pur et bien sec, et qu'on ramène l'aiguille du rhéomètre au zéro au moyen du cube compensateur C', dès qu'on introduit ensuite dans le tube T, de l'air atmosphérique purifié mais non desséché, on voit l'aiguille du rhéomètre indiquer un notable affaiblissement dans l'intensité des rayons transmis à travers ce tube. L'absorption est environ 50 fois celle de l'air sec, et représente près de 8 pour cent de la chaleur incidente. Si l'air introduit a traversé un tube rempli de fragments de verre mouillés, l'absorption est encore plus grande. De l'air puisé en différentes localités a donné les mêmes résultats.

Magnus ayant objecté que les plaques de sel gemme qui ferment le tube T se couvraient d'humidité qui interceptait les rayons, M. Tyndall supprima ces plaques et fit passer l'air, sec ou humide, à travers un tube ouvert *oo'* (fig. 649), le gaz entrant en *r*, pendant que la machine pneumatique aspirait en *r'*. Magnus a ensuite supposé que l'humidité déposée dans l'intérieur du tube diminuait la réflexion, par ses parois, des rayons émis obliquement par la source C. M. Tyndall a alors simplement interposé entre celle-ci et la source une colonne d'air sortant verticalement après avoir traversé une caisse remplie de fragments de verre mouillés; l'absorption se manifesta encore nettement. Si la colonne d'air était desséchée, l'aiguille revenait promptement sur ses pas. On pourrait penser que l'évaporation

refroidissant l'air, la colonne ascendante pourrait exercer une action refroidissante sur la pile. Mais M. J. L. Hoorweg, qui a répété ces expériences, a constaté que le sulfure de carbone, qui se refroidit beaucoup en s'évaporant, produit cependant le plus petit affaiblissement des rayons.

870. Considérations théoriques. — Nous avons vu (867) que les gaz simples permanents laissent passer presque toute la chaleur, et ne rayonnent que très-peu quand ils sont chauds. On doit en conclure que les vibrations que reçoit l'éther interposé entre leurs molécules, ne se communiquent que très-peu à ces molécules, qui oscillent au milieu de cet éther sans que l'amplitude de leurs vibrations soit augmentée. Mais dans le cas des vapeurs et des gaz composés, la molécule, plus compliquée, offre mieux prise aux mouvements de l'éther, mouvements qui s'affaiblissent en se transmettant à ces molécules, c'est-à-dire en élevant leur température. M. Tyndall compare la molécule simple à un cylindre uni tournant sur l'eau sans la troubler beaucoup, et la molécule composée, à une roue à aubes qui ne peut tourner sans l'agiter fortement. C'est ainsi que l'acide chlorhydrique et l'acide bromhydrique absorbent beaucoup plus de chaleur que le chlore et la vapeur de brome¹.

Ces deux derniers corps présentent une anomalie remarquable. Quoique simples, ils absorbent, sous la pression de 25^{mm}, 4, 60 et 160 fois plus de chaleur que l'air sous celle de 760^{mm}. Faut-il en conclure que ces deux corps sont composés, comme le cyanogène, qui a tant d'analogie avec eux? Nous verrons, en étudiant les chaleurs spécifiques des gaz, d'autres anomalies présentées par le chlore et le brome, et qui ne font que confirmer cette supposition.

II. Réfraction de la chaleur.

871. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que les rayons de chaleur qui pénètrent dans une plaque diathermane la traversaient dans une direction normale. Quand il en est autrement, chaque rayon sI (fig. 650) est dévié, en restant dans le plan de l'angle d'incidence, d'une quantité qui dépend de la substance et de l'obliquité des rayons; et, au lieu de suivre la direction sIs' , prend une direction différente Ir . Ce phénomène, qui a lieu aussi pour la lumière, se nomme *réfraction*. Le rayon Ir est le *rayon réfracté*, et l'angle nIr , l'*angle de réfraction*. En général, le rayon réfracté se rapproche de la normale, quand il passe dans un milieu plus dense que celui d'où il vient, et il s'en écarte dans le cas contraire. Ainsi, quand un rayon rI sort, en I , du corps diathermane pour rentrer dans l'air, il s'écarte de la normale nn' , et prend la direction Is , au lieu de continuer dans la direction Ir' .

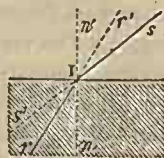


Fig. 650.

¹ La Chaleur, mode de mouvement, par J. Tyndall, trad. de M. l'abbé Moigno (1874).

Les lois de la réfraction pour la lumière seront développées avec détail dans l'optique. Ces lois sont les mêmes pour la réfraction de la chaleur, et les conséquences en sont aussi les mêmes. Parmi ces conséquences, nous citerons les effets des *prismes* et des *lentilles*.

Prismes. — Un prisme, quand il s'agit de la réfraction, consiste en un milieu terminé par deux plans qui se coupent suivant une droite, qu'on nomme l'*arête de sommet* ou le *sommet* du prisme. Un troisième plan parallèle à cette ligne termine le plus souvent le milieu, de manière à lui donner la forme du prisme triangulaire de la géométrie. Soit ABC (fig. 651), la section droite d'un prisme formé d'une matière diathermane, et si un rayon pris dans cette section et entrant par la face AB. Ce rayon sera dévié suivant IV', en se rapprochant de la normale nI. Arrivé en I', il s'écartera de la normale I'n', et il en résultera que le rayon émergent I'e sera dévié du côté opposé au *sommet* A du prisme.

Ce phénomène, connu depuis longtemps pour les rayons solaires, a été constaté

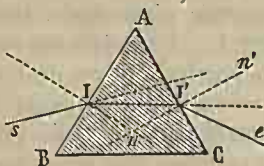


Fig. 651.

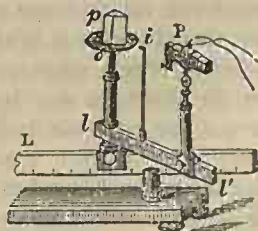


Fig. 652.

par Melloni dans le cas de la chaleur obscure, au moyen de l'expérience suivante¹. On place sur la règle du banc de Melloni (862), une seconde règle *l'* (fig. 652) portant la pile P, et mobile autour d'un axe vertical adapté à une pièce que l'on fixe sur la règle L au moyen d'une vis de pression. L'angle des deux règles est indiqué par l'index *i*, sur une division que porte le contour du plateau *o*. Sur ce plateau est fixé verticalement un prisme *p* de *sel gemme*. Un faisceau de rayons, émanant d'un vase plein d'eau bouillante, et limité par les ouvertures de plusieurs écrans, rencontre ce prisme, est dévié en le traversant, et vient tomber sur la pile, à laquelle on donne une position convenable en déplaçant peu à peu la règle *l'*. Si l'on enlève alors le prisme, l'aiguille du rhéomètre, qui avait été déviée, revient au repos; il en est de même si l'on retourne le prisme d'une demi-circonférence, de manière que son arête de sommet change de position; ce qui montre que l'effet produit sur la pile n'est pas dû à de la chaleur rayonnée par le sel gemme qui se serait d'abord échauffé.

872. Propriétés des lentilles. — On nomme *lentille* un milieu terminé par deux surfaces sphériques. La droite qui passe par les centres de courbure

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LV, p. 365.

de ces surfaces se nomme l'axe de la lentille. Soit mn (fig. 653), la section par un plan passant par son axe sf , d'une lentille de *sel gemme* à faces convexes, et supposons que chacune de ces faces ne soit qu'une portion très-petite de la sphère à laquelle elle appartient. Melloni a reconnu par l'expérience que, si l'on place un point échauffé, s , assez loin de cette lentille et sur son axe, les rayons, après l'avoir traversée, se rassemblent en un foyer f , où l'on reconnaît une élévation notable de température qui ne se manifeste pas en dehors de ce point. Ce phénomène est une conséquence des lois de la réfraction et peut s'en déduire par le raisonnement, comme nous l'établirons dans l'optique. Quand les rayons incidents s', s' sont parallèles à l'axe de la lentille, le foyer formé F se nomme *foyer principal*. Si le point rayonnant est placé au foyer principal F , les rayons qui traversent la lentille sortent suivant s', s' , parallèlement à son axe.

On savait depuis des siècles que les rayons calorifiques du soleil se concentrent, avec la lumière, au foyer principal des lentilles de verre ; mais on regardait la lumière qui accompagne ces rayons comme nécessaire au phénomène. Scheele croyait même que la chaleur du feu ne se concentrait pas au foyer des lentilles. Depuis, Herschell et Brande ont obtenu des effets marqués au moyen de flammes ou de solides incandescents, et Melloni a réussi avec la chaleur obscure, en employant une lentille de *sel gemme*.

873. Verres ardents. — Un verre ardent n'est autre chose qu'une lentille diathermane, destinée à concentrer à son foyer les rayons du soleil. Cet instrument était connu

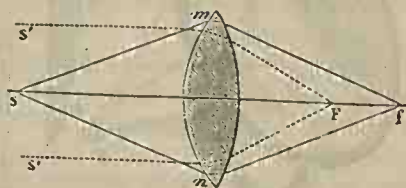


Fig. 653.

des anciens ; les vestales s'en servaient pour allumer le feu sacré ; les Romains en faisaient usage pour cautériser et pour se procurer du feu, comme il ressort d'un passage de la comédie des *Nuées*, d'Aristophane¹. Des lentilles de 5 ou 6 centimètres de diamètre peuvent brûler du bois. Avec de grands diamètres on obtient des effets intenses et supérieurs à ceux que produisent les miroirs ardents (859). Parmi les verres ardents les plus célèbres, on cite ceux de Tchernhausen, de près d'un mètre de diamètre ; toutes les matières combustibles s'enflamment instantanément au foyer ; les matières terreuses sont vitrifiées ; les métaux, l'or même, sont fondus.

Lentilles à échelons. — Une partie de la chaleur est absorbée par le verre de la lentille, qui est très-épais au milieu. Pour atténuer cet inconvénient, on se sert de *lentilles à échelons* (fig. 654) : une des faces est plane, et sur l'autre,

¹ « Avez-vous vu, chez les droguistes, la belle pierre transparente dont ils se servent pour allumer du feu? — Veux-tu dire le verre? — Oui. — Eh bien! qu'en feras-tu? — Le voici : Je prendrai le verre, et me mettant ainsi au soleil, je fondrai de loin toute son écriture (scène 1, acte 2). »

les différentes parties de la surface sphérique sont rentrées les unes par rapport aux autres, comme on le voit dans la coupe *aoa*, de manière que l'ensemble est composé de couronnes *aa*, *bb*, qui entourent une lentille centrale *o*.

L'idée des lentilles à échelons est due à Buffon ; mais il ne put en construire. Condorcet, dans son éloge du grand naturaliste, proposa de les former de plusieurs pièces de verre. Brewster appliqua le premier cette idée heureuse, en 1811, et forma un verre ardent de 1^m,52 de diamètre, le plus grand que l'on connaisse. Fresnel, vers 1820, en cherchant à appliquer les lentilles à l'éclairage des phares, imagina de son côté, et sans connaître les travaux antérieurs, les lentilles composées de plusieurs pièces, qu'il nomma *lentilles polyzonales*, et sur lesquelles nous reviendrons dans l'optique.

Buffon a aussi imaginé de former des verres ardents avec des liquides. Deux lames de verre courbées comme des verres de montre, et réunies par leur contour limitaient un espace que l'on remplissait entièrement de liquide. Un orifice pratiqué à la partie supérieure était surmonté d'un vase qui recevait l'excès du liquide, que la chaleur du soleil faisait dilater ; mais il ne réussit qu'imparfaitement. Depuis, Bernières et Trudaine construisirent une lentille à liquide, ayant 1^m,33 de diamètre, et dont les surfaces sphériques avaient 2^m,66 de rayon. Rempli d'essence de térébenthine, cet appareil produisait des effets prodigieux. Pour rendre ces effets encore plus intenses, on recevait le cône de rayons émergents sur une seconde lentille, afin de resserrer davantage le foyer formé par ces rayons, qui s'étendent dans un espace dépendant du diamètre apparent

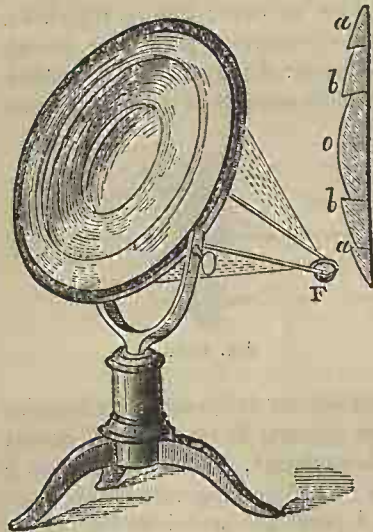


Fig. 654.

du soleil et de la distance du foyer à la lentille. L'appareil était installé sur un chariot et pouvait s'incliner plus ou moins suivant la hauteur du soleil.

Des ballons de verre remplis d'eau, des carafes de forme à peu près sphérique, peuvent aussi concentrer les rayons solaires en un foyer où l'on peut brûler des matières combustibles. En 1763 on a fait, en Angleterre, des expériences curieuses, au moyen d'une lentille taillée dans de la glace et ayant plus de 3 mètres de diamètre ; on put à son foyer enflammer de la poudre, du papier, etc. Scoresby, dans ses voyages aux mers polaires, a construit plus d'une fois de semblables lentilles, avec lesquelles il enflammait divers corps, au grand étonnement de ses matelots.

§ 3. — DE LA THERMOCHRÔSE

I. Thermochrôse des rayons calorifiques.

874. Nomenclature. — Il existe différentes espèces de rayons *lumineux*, qui se distinguent les uns des autres par la *couleur*; et l'on démontre, en optique, que la lumière blanche est composée d'un mélange d'une multitude de rayons colorés, qu'on peut séparer les uns des autres par divers moyens; par exemple en lui faisant traverser des lames de verre de différentes nuances, qui la tamisent pour ainsi dire, et ne laissent passer que les rayons de la couleur de la lame. Les rayons *colorés* passent tous avec la même facilité à travers les lames transparentes *incolores*, mais ils sont interceptés par les lames colorées, en proportion variable suivant la nuance. Nous allons voir que des phénomènes semblables se produisent avec la chaleur, et qu'il existe des *rayons calorifiques de différentes qualités*, comme des rayons lumineux de différentes couleurs.

Dans un Mémoire publié en 1811, Delaroché, après avoir montré que la chaleur qui a traversé une lame éprouve relativement moins de perte en en traversant une seconde de même matière et de même épaisseur, a prouvé que la proportion de chaleur qui traverse une même lame varie avec la source des rayons calorifiques; d'où il a conclu qu'il devait exister des rayons de chaleur de différente espèce¹. Cette découverte importante a été confirmée par les expériences multipliées de Melloni, qui en a considérablement étendu le champ, a découvert un grand nombre de faits nouveaux et en a développé les conséquences dans plusieurs mémoires remarquables. A la suite de ces nombreuses recherches, Melloni a senti la nécessité d'adopter des termes particuliers pour exprimer les faits, sans emprunter les dénominations employées pour la lumière. Par exemple, les mots *diaphane* et *diathermane* ne peuvent se remplacer mutuellement, puisque certaines substances non transparentes sont diathermanes et vice-versà (865). Voici les termes adoptés par Melloni, mis en regard de ceux qui leur correspondent pour la lumière :

Chaleur.	Lumière.	Chaleur.	Lumière.
<i>Thermochrôtiq.</i>	coloré.	<i>Diathermane</i> ou <i>diathermique</i> . } <i>Adiathermane</i> } <i>Thermochrôse</i> }	transparent
<i>Athermochrôtiq.</i>	incolore.		ou diaphane.
<i>Leucothermique</i>	blanc.		opaque.
<i>Mélanothermique</i>	noir.		coloration.

Cela posé, nous allons décrire les expériences qui ont fait découvrir les propriétés de la chaleur que suppose cette nomenclature.

¹ *Journal de physique*, de De Laméthierie (1812), t. LXXI, p. 201.

875. ABSORPTION DES RAYONS SUIVANT LA SOURCE. — Quand des rayons de chaleur qui traversent une même lame diathermane proviennent de sources différentes, les proportions que la lame laisse passer ne sont pas les mêmes. Melloni a mis ce résultat en évidence, au moyen de quatre sources différentes : une lampe de Locatelli ; une spirale de platine rendue incandescente dans la flamme d'une lampe à alcool ; une lame de cuivre noircie portée à une température constante, de 300° à 400°, par la flamme d'une semblable lampe placée par derrière (fig. 655) ; et enfin un cube rempli d'eau bouillante. Voici quelques-uns des résultats obtenus avec ces différentes sources, placées à des distances de la pile convenables pour produire, par rayonnement direct, une déviation commune de 30°. Les nombres du tableau expriment les quantités de rayons transmis, sur 100 (862).



Fig. 655.

ÉPAISSEUR COMMUNE des plaques : 2 ^{mm} , 6.	LAMPE	PLATINE	CUIVRE	CUIVRE
	de Locatelli.	Incandescent.	noirci à 300°.	noirci à 100°.
Sel gemme pur.....	92	92	92	92
Sel gemme louche.....	65	65	65	65
Spath d'Islande.....	39	28	6	0
Verre à glace.....	39	24	6	0
Cristal de roche.....	38	28	6	0
Tourmaline verte.....	48	16	3	0
Sulfate de chaux.....	44	5	0	0
Acide citrique.....	41	2	0	0
Alun.....	9	2	0	0
Glace très-pure.....	6	0	0	0

Avec les sources employées, et le sel gemme excepté, le nombre de rayons transmis est d'autant plus petit que la température absolue de la source est moindre. Sous l'épaisseur de 2^{mm}, 6, tous les rayons de la source à 100° sont absorbés. Remarquons encore que l'ordre des transmissions n'est pas toujours le même pour les différentes sources ; ainsi, le cristal de roche, qui transmet moins de chaleur que le spath d'Islande et le verre à glace quand les rayons viennent d'une lampe de Locatelli, laisse passer autant que le premier de ces corps et plus que le second, les rayons provenant du platine incandescent, et autant que ces deux corps, les rayons du cuivre à 390°.

Les liquides présentent des phénomènes analogues. La chaleur absorbée par les deux lames de verre entre lesquelles on les place, varie avec la source ; mais on remarque que les quantités absorbées, pour les différentes sources, sont toutes plus grandes que celles qu'absorbent les lames de verre seules. Pour les

couches liquides très-minces, Melloni employait des lames de sel gemme, même dans le cas de l'eau, le pouvoir diathermane de l'eau saturée de sel et contenue entre deux lames de verre, étant sensiblement égal à celui de l'eau pure.

M. Tyndall a vérifié, sur les liquides et les vapeurs, la diminution avec l'intensité de la source, de la proportion de chaleur transmise¹. Il se servait de l'appareil (fig. 649), en prenant entre autres, pour source de chaleur, une spirale de fil de platine plus ou moins échauffée par le passage d'un courant électrique. Une semblable spirale, placée au centre d'un ballon ouvert du côté de la pile, et préservée ainsi des agitations de l'air, conserve une température constante pendant des journées entières. Le tableau suivant donne les nombres de rayons absorbés sur cent, par certaines vapeurs, quand la spirale de platine présentait les températures indiquées :

Vapeurs de	Rouge sombre.	Rouge brillant.	Rouge blanc.	Près du point de fusion.
Sulfure de carbone.....	6,5	4,7	2,9	2,5
Chloroforme.....	9,1	6,3	5,6	3,9
Iodure de méthyle.....	12,5	9,6	7,8	»
— d'éthyle.....	21,3	17,7	12,8	»
Benzol.....	26,4	20,6	16,5	»
Amylène.....	35,8	27,5	22,7	»
Ether sulfurique.....	43,4	31,4	25,9	23,7
— formique.....	45,2	31,9	25,1	21,3
— acétique.....	49,6	34,6	27,2	»

M. Tyndall a aussi étudié l'absorption des liquides, qu'il plaçait entre deux lames de sel gemme, et il a reconnu que la liste de ces liquides, par ordre d'absorption, est la même que celle des vapeurs qu'ils fournissent. Cette loi, très-importante au point de vue théorique, ne s'applique à certains liquides qu'autant qu'on tient compte de leur densité et de celle de leur vapeur. En effet, les liquides ont été pris sous la même épaisseur, et les vapeurs, sous le même volume et la même pression de 760^{mm}. Mais des couches égales de divers liquides produisent des volumes de vapeur différents. Quand on passe d'une substance à une autre, on ne compare donc pas les absorptions de rayons ayant traversé des quantités de matière dans le même rapport sous les deux états. On rend les résultats comparables, en divisant les absorptions des liquides et des vapeurs par leurs densités respectives; c'est alors qu'on trouve les deux listes identiques.

Si l'on change la source, l'ordre des substances sous les deux états peut être modifié. Ainsi, les rayons émis par une face noircie d'un cube rempli d'eau à 100° sont absorbés en plus grande proportion par l'éther formique (60,4 pour 100) que par l'éther sulfurique (54,1); et par le chloroforme (21,6) plus que par l'iodure de méthyle (18,8).

¹ La chaleur mode de mouvement, trad. de M. l'abbé Moigno (1874), p. 374.

Beaucoup d'autres expériences faites sur l'absorption des vapeurs avec diverses sources, principalement des flammes, ont conduit M. Tyndall à constater que les rayons émis par ces sources sont surtout absorbés par les vapeurs qui contiennent les éléments chimiques de l'espèce de ceux qui rayonnent dans la flamme. Nous reviendrons plus loin sur cette loi, dont la portée théorique est considérable (892).

876. Influence de l'épaisseur. — Nous avons jusqu'à présent comparé des lames de même épaisseur. Quand l'épaisseur va en augmentant, l'absorption est de plus en plus prononcée. On remarque aussi que la quantité absorbée croît moins rapidement que l'épaisseur (864). Ces divers faits se vérifient dans le tableau suivant, donné par Melloni.

ÉPAISSEUR en millimètres.	VERRE de Saint-Gobain.			CRISTAL de roche limpide.			CRISTAL de roche enfumé.			HUILE de colza.		EAU distillée.	
	Lampe de Locatelli.	Platine Incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe de Locatelli.	Platine Incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe de Locatelli.	Platine Incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe de Locatelli.	Platine Incandescent.	Lampe de Locatelli.	Platine Incandescent.
0,5	77,5	62,1	44,4	78,6	69,5	44,7	81,7	70,0	45,4	64,0	32,0	25,1	8,7
1,0	73,3	51,5	9,9	76,8	65,1	44,3	78,6	65,0	42,3	48,3	22,7	19,3	5,7
1,5	70,4	46,1	6,7	74,8	62,5	9,7	„	„	„	41,0	18,6	16,0	4,2
2,0	68,2	42,8	5,0	73,3	60,6	8,7	75,1	60,3	9,2	36,1	16,3	13,9	3,2
2,5	66,5	„	„	72,5	„	„	„	„	„	32,7	„	„	„
3	65,3	38,3	2,9	71,8	57,6	7,3	73,1	57,4	7,8	30,6	13,6	11,4	2,0
4	63,4	35,8	2,0	70,8	55,3	6,6	71,4	54,8	7,0	27,8	12,0	10,0	1,5
6	60,9	32,3	1,4	69,8	51,4	5,4	„	„	„	23,9	9,8	8,6	1,0
8	59,2	29,6	1,1	69,3	48,4	4,6	„	„	„	21,8	8,1	8,0	0,6
10	„	„	„	„	„	„	„	„	„	21,7	7,1	7,7	0,4
11	„	„	„	„	„	„	„	„	„	20,9	6,7	7,7	0,3
50	„	„	„	„	„	„	„	„	„	12,5	2,1	2,4	0
86	„	„	„	„	„	„	59,0	35,0	0,7	„	„	„	„
100	„	„	„	„	„	„	„	„	„	8,1	1,2	1,3	0
150	„	„	„	„	„	„	„	„	„	6,1	„	0,7	0

Les proportions de chaleur transmise contenues dans ce tableau ont été corrigées de la perte due aux réflexions qui ont lieu sur les deux faces des lames. Tous ces nombres n'ont pas été obtenus directement par l'expérience, l'épaisseur n'ayant pas toujours été exactement celle qui est indiquée; mais en comparant des résultats obtenus pour des épaisseurs peu différentes, on a calculé, par interpolation, ceux qui correspondent à l'épaisseur donnée.

877. Thermochrôse. — Pour expliquer les propriétés qui précèdent, il est nécessaire d'admettre, comme l'avait déjà fait Delaroche (874), qu'il y a différentes espèces de rayons de chaleur; car les rayons lancés par différentes sources obscures ou lumineuses ne jouissent pas des mêmes propriétés

relativement à la transmission à travers une même lame diathermane; de même que les rayons lumineux de différentes couleurs passent en proportions différentes à travers une lame de verre bleu ou rouge.

La proportion de chaleur qui passe dépend de la nature de la source, plutôt que de son intensité, comme on l'a cru d'abord. Ainsi, une couche de noir de fumée appliquée sur une lame de sel gemme, laisse passer plus facilement les rayons des sources faibles que ceux de certaines sources plus intenses.

Il résulte aussi d'expériences de MM. de la Provostaye et P. Desains¹, que diverses sources à la même température, peuvent émettre des rayons inégalement absorbés. Ayant recouvert la moitié d'une des faces d'un vase cubique rempli d'huile à 173°, d'une couche de cinabre, et l'autre moitié de noir de fumée, le rapport des rayonnements directs des deux surfaces fut égal à 0,83; et quand les rayons eurent traversé une lame très-mince de verre, le rapport ne fut plus que 0,67; les rayons partant du cinabre étant absorbés en plus grande proportion. L'or et l'oxyde de cuivre, au rouge naissant, émettent aussi des rayons de nature très-différente; ceux de l'oxyde contiennent des éléments lumineux plus nombreux, car leur éclat est décuple. M. Knoblauch a vu, de son côté, les rayons d'une flamme d'alcool être beaucoup plus absorbés par une lame de verre que ceux d'une spirale de platine plongée dans cette flamme et ayant sensiblement la même température.

Le mot *thermochrôse* sert à désigner cette qualité particulière aux rayons de chaleur, qui les rend plus ou moins transmissibles à travers une même lame diathermane. Un faisceau ou *flux* de chaleur doit être considéré comme formé d'un mélange de rayons de différentes espèces, et sa composition dépend de la nature de la source d'où il émane. Chaque substance diathermane intercepte de préférence certains de ces rayons, de sorte que la perte dépend de la composition du faisceau, c'est-à-dire de la nature de la source; et les différentes substances interceptent en proportion différente les divers rayons d'une même source, suivant la manière dont elles sont *thermochrôïques*; de même que des lames de verre coloré interceptent plus ou moins les rayons d'une même couleur, suivant la nuance que possèdent ces lames.

878. Le sel gemme est athermochrôïque. — Le sel gemme pur présente une particularité remarquable : une plaque de ce sel n'absorbe aucune portion de la chaleur incidente, quand elle n'est pas trop épaisse (866), *quelle que soit l'origine de cette chaleur*. Quand il n'est pas tout à fait limpide, il absorbe un peu de chaleur, et à peu près la même proportion pour les différentes sources (901). Il se comporte donc, pour la chaleur, comme les substances transparentes et incolores pour la lumière; il est *athermochrôïque* (874), tandis que le cristal de roche, l'alun, le spath d'Islande... sont *thermochrôïques*, et comparables aux verres colorés par rapport à la lumière; ils ne laissent pas passer en même proportion les rayons calorifiques de différente *thermochrôse*.

¹ Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXIV, p. 951.

879. Transmission à travers plusieurs lames. — La théorie de la thermochrôse, développée par Melloni avec une rare habileté, explique pourquoi la chaleur qui a traversé une première lame diathermane éprouve moins de perte, proportionnellement, en traversant une seconde de même nature. En effet, le faisceau qui se présente à la seconde lame a été dépouillé par la première, de la plus grande partie des rayons que celle-ci peut intercepter. Il en est de même de la lumière qui a traversé un verre coloré ; elle traverse très-facilement ensuite une lame de la même couleur.

M. Tyndall a fait à ce sujet une expérience frappante : Il concentre un faisceau de lumière électrique au foyer d'une lentille *de verre*, et place à ce foyer l'une des boules d'un thermomètre différentiel. La colonne liquide de l'instrument ne bouge pas. C'est que les rayons de chaleur qui ont traversé la lentille sont ceux pour lesquels le verre et l'air sont très-diathermanes ; ils traversent donc la boule sans être absorbés. Mais si l'on dépose à sa surface un peu de noir de fumée, l'absorption a lieu et la colonne liquide est vivement déplacée.

Si les rayons qui ont traversé une première lame, en traversent une seconde *d'espèce différente*, celle-ci leur fait éprouver des pertes qui varient avec sa nature. Si la seconde lame restant la même, on change celle que traverse d'abord la chaleur, la perte à travers la seconde est encore modifiée. Ces résultats se voient dans le tableau suivant, dans lequel sont indiqués les nombres de rayons, sur 100 de chaleur incidente, qui sont transmis à travers des lames de 2^{mm},6 d'épaisseur, après que ces rayons ont traversé d'autres lames dont les noms sont en tête des cinq dernières colonnes.

SUBSTANCES placées immédiatement AVANT LA PILE	RAYONS directs de la lampe de Locatelli.	SUBSTANCES que la chaleur a d'abord traversées.				
		ALUN. ép., 2 ^{mm} ,6.	SULFATE de chaux, ép., 2 ^{mm} ,6.	CHROMATE de potasse, ép., 2 ^{mm} ,6.	VERRE vert, ép., 1 ^{mm} ,85	VERRE noir, ép., 1 ^{mm} ,85
Sel gemme.....	92	92	92	92	92	92
Spath d'Islande.....	39	91	89	56	59	55
Verre (épaisseur, 0 ^{mm} ,5).	54	90	85	68	87	80
Cristal de roche.....	38	91	85	52	78	54
Mica noir (épais. 0 ^{mm} ,9).	20	0,4	12	16	38	43
Tourmaline verte.....	18	4	10	14	24	30
Sulfate de chaux.....	14	59	54	22	9	15
Acide citrique.....	11	88	52	16	3	2
Alun.....	9	90	47	15	0,5	0,3

Les résultats inscrits dans ce tableau restent les mêmes quand on met les deux plaques traversées par les rayons à la place l'une de l'autre, en ne dérangeant pas la source. Si l'on avait plus de deux plaques, l'ordre dans lequel on les placerait

n'aurait pas non plus d'influence. On conclut de là que chaque rayon d'une certaine espèce se comporte toujours de la même manière dans chaque lame qu'il traverse, relativement aux pertes d'intensité qu'il y éprouve¹.

On voit dans ce tableau, que le sel gemme laisse passer la même proportion de rayons calorifiques, quelles que soient les lames que le flux de chaleur a d'abord traversées; il est donc bien *athermochrôïque* (878). Le mica noir ne laisse passer que 0,004 de la chaleur qui a traversé l'alun, et 0,43 de celle qui a traversé du verre noir. L'acide citrique, au contraire, ne laisse passer que 0,02 de la chaleur qui vient du verre noir, et 0,88 de celle qui a traversé l'alun, etc. En comparant ces faits avec ceux qui se passent quand la lumière traverse différents verres de couleur, nous dirons que l'alun et l'acide citrique ont à peu près la même *thermochrôse*, et que le mica noir et l'alun ont, au contraire, des *thermochrôses* très-différentes l'une de l'autre. Les verres différemment colorés ont généralement la même *thermochrôse*; car la chaleur qui a traversé un de ces verres en traverse facilement un autre. Le verre noir modifie en l'affaiblissant le faisceau qui le traverse, de manière qu'il passe facilement à travers une lame de verre limpide, tandis que cette dernière lame ne laisse passer que très-peu des rayons qui ont traversé le sel gemme recouvert de noir de fumée.

880. Loi de l'absorption dans une lame diathermane. — Voici comment Biot trouve cette loi². Considérons d'abord un seul rayon d'une certaine espèce, d'intensité I , et tombant normalement sur une plaque diathermane. Une partie de ce rayon sera réfléchié à la surface d'entrée, ce qui diminuera l'intensité dans un rapport r ; et l'intensité de la portion introduite sera $I(1 - r)$, quantité sur laquelle s'exercera la faculté absorbante. La fraction non absorbée sera une certaine fonction inconnue $\varphi(e)$ de l'épaisseur e . L'intensité du rayon, quand il se présentera à la seconde surface, sera donc $I(1 - r)\varphi(e)$. Là il se fera une nouvelle réflexion, qui arrêtera une fraction r' de la chaleur qui se présente pour sortir; de sorte que l'intensité du rayon sera

$$I(1 - r)(1 - r')\varphi(e). \quad [1]$$

Si le rayon rencontre une seconde plaque de même substance, d'épaisseur e' , l'intensité de la partie transmise à travers les deux plaques sera, à la sortie,

$$i = I(1 - r)^2(1 - r')^2\varphi(e)\varphi(e'). \quad [2]$$

Supposons maintenant que le même rayon traverse une seule lame de même substance, et d'épaisseur $e + e'$; l'intensité du faisceau émergent sera,

$$i' = I(1 - r)(1 - r')\varphi(e + e').$$

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LV, p. 337.

² Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut, t. XIV, p. 466.

L'expérience montre que l'on a $i = (1 - r) (1 - r') i'$, c'est-à-dire que l'absorption est la même dans les deux plaques, séparées ou réunies en une seule; les facteurs $(1 - r) (1 - r')$ représentant la perte éprouvée aux deux faces de plus, quand les lames sont séparées. On a donc

$$\varphi(e + e') = \varphi(e) \varphi(e').$$

Or, Poisson a démontré qu'une semblable égalité ne peut exister que si l'on a $\varphi(e) = a^e$, a étant une constante qui dépend de la nature de la plaque et de celle du rayon calorifique; et l'on a bien alors $\varphi(e) \varphi(e') = a^e \times a^{e'} = a^{e + e'}$. L'intensité du rayon qui sort d'une lame d'épaisseur e est donc

$$i = I(1 - r) (1 - r') a^e \quad [3]$$

équation qui représente une courbe *logarithmique*. On voit que l'intensité d'un rayon qui traverse une plaque varie en progression géométrique, quand l'épaisseur croît en progression arithmétique. La raison, a , de la première progression, nommée *coefficient de transmission*, dépend de la nature de la lame et de celle du rayon incident; elle représente la quantité de chaleur transmise, à travers une épaisseur de 1^{mm}. La valeur de a est plus petite que l'unité; car $a = 1$ supposerait que toute la chaleur traverse, comme pour le sel gemme. Plus a est petit, moins la substance est diathermane.

Les quantités absorbées par les tranches successives forment aussi une progression géométrique décroissante; car, en appelant I' la quantité qui n'a pas été réfléchie, la première tranche absorbe $I' - I' a = I' (1 - a)$; la seconde absorbera $I' a - I' a \cdot a = I' a (1 - a)$; la troisième $I' a^2 (1 - a)$...; et la n^e , $I' a^{n-1} (1 - a)$. Ces lois ont été vérifiées par l'expérience, entre autres par MM. Masson et Jamin.

Considérons maintenant un faisceau composé de rayons de différentes thermo-chrôses, et ayant les intensités I, I', I'' ..., et soient a, a', a'' ... les *coefficients de transmission* qui leur correspondent, pour une certaine lame diathermane d'épaisseur e . L'intensité i'' du faisceau à sa sortie sera la somme des intensités de chaque rayon en particulier, et l'on aura

$$i'' = (1 - r) (1 - r') [Ia^e + I' a'^e + I'' a''^e + \dots] \quad [4]$$

On voit que cette intensité dépend de la composition du faisceau incident, et par conséquent de la nature de la source; elle dépend aussi des valeurs de a, a', a'' ... ou de la nature de la lame. Le faisceau émergent sera composé autrement que le faisceau incident, et sa composition dépendra de l'épaisseur; conséquences conformes aux expériences de Melloni.

Nous trouverons des résultats semblables en étudiant l'absorption de la lumière par les milieux diaphanes.

881. DIFFÉRENTE RÉFRANGIBILITÉ DES RAYONS DE CHALEUR. — Les divers rayons lumineux colorés sont inégalement réfrangibles, et sont différemment déviés en traversant un même prisme; ceux qui sont le plus déviés étant produits par les vibrations les plus rapides de l'éther. Il en est de même des rayons de différente *thermochrôse*. Pour le prouver, Melloni a construit une pile dont tous les barreaux étaient dans un même plan, de manière que les soudures d'un même côté formaient une ligne droite verticale. Cette pile ayant été mise à la place de celle de la figure 652, il fit tomber sur un prisme de sel gemme un faisceau de rayons, délimité par son passage à travers une fente verticale étroite pratiquée dans un écran, et plaça la pile de manière à obtenir le maximum d'effet. Ayant changé ensuite la source, il reconnut que l'angle formé par la règle *W* (fig. 652) avec la règle *L* était d'autant plus grand que la température de la source était plus élevée. Comme les rayons des sources les plus intenses sont, généralement, le plus facilement transmis (875), on voit que *les rayons les plus transmissibles sont aussi ceux qui sont le plus déviés, et dont les vibrations sont les plus rapides.*

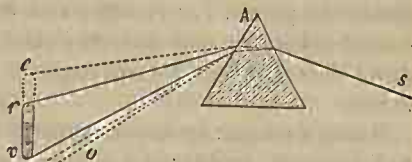


Fig. 656.

En conservant la même source, mais en faisant passer les rayons, avant leur incidence sur le prisme, à travers des lames qui modifient le flux calorifique (879), on obtient encore des déviations différentes.

Il y a donc toujours une analogie frappante avec les phénomènes lumineux.

882. Décomposition de la chaleur par réfraction. — On sait, depuis Newton, que la lumière blanche est composée d'une infinité de rayons colorés doués de réfrangibilités différentes, et que, si l'on fait passer un pinceau de rayons solaires, *s* (fig. 656) à travers un prisme *A*, les divers rayons colorés qui composent ce pinceau étant différemment déviés, se trouvent séparés les uns des autres. Le faisceau est donc étalé dans un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme, et il forme, sur un écran éloigné, une image allongée *rv*, présentant de vives couleurs. Parmi ces couleurs, on en distingue sept principales, qui sont, en commençant du côté de l'arête *A* du prisme : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet. L'image colorée *rv* se nomme *spectre solaire*; et le phénomène qui lui donne naissance constitue la *dispersion* ou la *décomposition* de la lumière, dont nous ferons une étude détaillée dans l'optique.

Spectre calorifique. — En même temps que la lumière, les rayons de chaleur solaire sont déviés par le prisme, et éprouvent aussi la décomposition, à cause de l'*inégaie réfrangibilité* de ceux qui ne sont pas de même *thermochrôse*. En effet, on trouve de la chaleur dans les différents points du spectre lumineux, et même dans l'espace obscur *rc* qui s'étend au delà du rouge. Autrefois, on croyait que la partie la plus brillante du spectre solaire était aussi la plus chaude. Mais W. Herschell, en 1800, ayant placé de petits thermomètres aux différents

points du spectre formé par un prisme de flint-glass, découvrit qu'il y avait de la chaleur dans la partie obscure au-delà du rouge, et constata même que le maximum calorifique se trouvait dans cette partie obscure. Dès lors, il regarda, à tort, les rayons de chaleur comme entièrement distincts des rayons de lumière tombant au même point du spectre.

On reconnaît que les rayons calorifiques sont d'espèce différente aux divers points du spectre, en constatant qu'ils sont absorbés en proportion différente par une même lame diathermane.

La chaleur obscure donne aussi, au moyen d'un prisme de sel gemme, un spectre calorifique invisible, dans lequel on peut reconnaître l'inégale thermo-chrôse des rayons inégalement déviés, par l'interposition d'une lame diathermane.

883. Effets de l'absorption par le prisme. — W. Herschell avait trouvé le maximum de chaleur du spectre solaire, au-delà du rouge; d'autres observateurs le trouvèrent dans le rouge, dans le jaune, etc. En 1828, Seebeck montra que tous ces résultats sont vrais, et que la position du maximum dépend de la matière du prisme. Par exemple, avec des prismes d'eau, d'acide sulfurique concentré, de crown-glass, de verre à glace, de flint-glass, le maximum se trouve dans le jaune, l'orangé, le rouge moyen, le rouge sombre, l'espace obscur qui suit le rouge.

Melloni a reconnu que ces changements de position du maximum, proviennent de l'absorption, en différentes proportions par les divers prismes, des rayons calorifiques de différentes réfrangibilités. Pour établir cette explication, il prend un prisme de crown, qui donne le maximum dans le rouge, et il isole, au moyen d'un écran percé, un pinceau de rayons violets, puis un pinceau de rayons obscurs pris du côté opposé du maximum, et dont la température, donnée par le thermo-multiplicateur, soit la même que celle du faisceau violet; il place ensuite une lame d'eau sur le chemin de ces deux faisceaux isothermes, et il trouve que le faisceau violet est à peine affaibli, tandis que l'autre est complètement intercepté. Un faisceau bleu et son isotherme donnent des résultats semblables; seulement, l'eau laisse passer un peu du second et absorbe une petite portion du premier. Des expériences faites sur les autres couleurs ont montré que la portion absorbée dans le faisceau calorifique qui est du côté du violet, et la portion qui passe dans son isotherme, sont d'autant plus grandes que les distances des faisceaux au maximum sont plus petites, c'est-à-dire que la température de ces faisceaux est en général plus grande. Les rayons calorifiques absorbés en plus grande proportion étant les moins réfrangibles, le maximum s'approche d'autant plus du violet que le prisme est moins diathermane, et que l'épaisseur traversée par les rayons est plus grande.

Ces résultats expliquent le déplacement du maximum quand on change de prisme. Ainsi, avec un prisme d'eau, les rayons calorifiques de même réfrangibilité que le rouge, étant plus absorbés que ceux qui correspondent au jaune, le maximum de chaleur descend dans cette dernière couleur.

Il résulte de là qu'un prisme de sel gemme doit donner le spectre calorifique

normal. La quantité de chaleur qu'il absorbe étant négligeable (866), les autres substances se comportent, par rapport aux rayons de chaleur, comme des prismes de verre coloré par rapport aux rayons lumineux; certaines couleurs étant plus absorbées que les autres, le maximum d'intensité lumineuse changerait de place. Dans la figure 657, les ordonnées des courbes représentent les intensités calorifiques aux différents points du spectre formé par des prismes de sel gemme *s*, de flint *f*, et de crown *c*. Avec le sel gemme, le maximum est à une distance du rouge, *r*, égale à celle qui sépare le rouge du jaune, *j*.

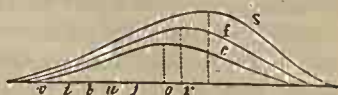


Fig. 657.

Un fait important a été constaté par Melloni, c'est que le maximum calorifique du spectre solaire donné par le sel gemme n'est pas toujours à la même place, l'air étant en apparence également pur, et le soleil à la même hauteur au-dessus de l'horizon. Ce phénomène s'explique facilement aujourd'hui que l'on connaît le pouvoir absorbant de la vapeur d'eau, répandue dans l'atmosphère en quantité variable (869).

M. Tyndall a fait une étude spéciale de la distribution de la chaleur dans le spectre de la lumière électrique jaillissant entre deux pointes de charbon (arc voltaïque). Une pile thermo-électrique, à base linéaire parallèle aux arêtes d'un prisme de sel gemme, pouvait être déplacée parallèlement à elle-même, au moyen d'une vis de rappel, et parcourir les différentes régions du spectre. Les ordonnées de la courbe *OmL* (fig. 657 bis) indiquent les variations d'intensité calorifique dans ce spectre. La partie noire correspond aux radiations obscures; elle forme une surface *OmnB* huit fois plus grande environ que la partie lumineuse *nBL*; l'électricité étant fournie par une pile de Grove de 50 éléments¹. Dans le spectre solaire, la partie invisible n'est que le double, à peu près, de la partie lumineuse.

88-1. Séparation de la chaleur

obscur. — Il résulte des faits qui précèdent, qu'un faisceau de chaleur lumineuse est un mélange de rayons obscurs et de rayons lumineux de diverses réfrangibilités. Les expériences de Melloni, Müller, Tyndall, ont mis ce résultat en évidence, pour les flammes, les corps incandescents, la lumière électrique. Ces deux sortes

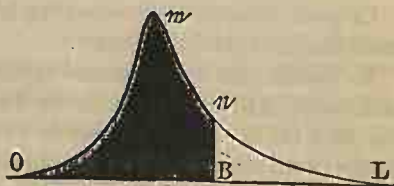


Fig. 657 bis.

de rayons peuvent être séparés au moyen de lames opaques laissant passer les rayons obscurs (865). Melloni a trouvé ainsi que la flamme d'une lampe à huile

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XLVIII, p. 385.

¹ *La Chaleur, mode de mouvement*, trad. de M. l'abbé Moigno (1874), p. 409.

émet 90, le platine incandescent 98, et la flamme d'alcool 99 pour cent de rayons obscurs. A mesure qu'un solide devient plus incandescent, les rayons obscurs qu'il émet deviennent plus intenses, de sorte qu'on peut obtenir de la chaleur obscure très-intense, au moyen d'un flux de chaleur lumineuse très-vive, dont on intercepte la partie lumineuse en lui faisant traverser une lame opaque en même temps que diathermane. On obtient ainsi de la chaleur invisible plus intense que celle que pourrait donner directement le corps obscur le plus favorable.

Restait à trouver une substance opaque et très-diathermane. Le verre noir, celui auquel l'or dissous communique une teinte rouge rubis, sont très-diathermanes, mais pas tout à fait opaques. Le brome remplit toutes les conditions, mais il est d'un emploi incommode. Enfin, M. Tyndall a reconnu que l'iode dissous dans le sulfure de carbone est absolument opaque sous une épaisseur de 4 centimètres, tout en laissant passer abondamment la chaleur. Le sulfure de carbone n'en intercepte lui-même qu'une faible proportion, car renfermé entre deux plaques de sel gemme, sous des épaisseurs de 0,5; 1,7; 6,8 millimètres, il laisse passer 94,5; 87,7; 82,5 pour cent de la chaleur incidente. Si on le remplace par la dissolution d'iode, celle-ci n'intercepte que la partie lumineuse représentant $\frac{1}{23}$ du flux total, quand la source est une spirale de platine portée au rouge-blanc. La déviation de l'aiguille du rhéomètre étant de 73°,9 quand les rayons traversent le sulfure pur et transparent, elle ne descend qu'à 73°,8, quand ils traversent la dissolution opaque. Voici le tableau des absorptions par cette dissolution, pour différentes sources :

Sources	absorption	transmission	Sources	absorption	transmission
Spirale obscure.....	0	100	Flamme d'huile.....	3	97
Noir de fumée à 100°.....	0	100	Flamme de gaz.....	4	96
Spirale au rouge.....	0	100	Spirale rouge-blanc.....	4,6	95,4
Flamme d'hydrogène.....	0	100	Lumière électrique.....	10	90

La partie absorbée, qui représente la partie lumineuse, n'est donc qu'une faible fraction de la chaleur totale.

M. Tyndall a fait de nombreuses expériences sur la chaleur obscure intense ainsi tamisée à travers une dissolution d'iode. Avec la lumière électrique fournie par 40 à 60 éléments d'une pile de Grove, il a pu, au foyer invisible d'une lentille, fondre du zinc, enflammer du papier, faire rougir de minces lames de platine, d'argent, de cuivre. Ces expériences demandent certaines précautions, à cause de l'inflammabilité du sulfure de carbone. M. Tyndall dispose entre la source et l'auge qui contient la dissolution opaque, une lame de sel gemme, et fait circuler de l'eau dans un vase annulaire qui entoure l'auge. — Au moyen des rayons solaires concentrés au foyer invisible d'une lentille creuse remplie de la dissolution d'iode, le même physicien a pu fondre certains métaux et enflammer du papier et de la poudre.

II. Thermochrôse des corps.

885. Diffusion de la chaleur. — Les corps *non polis*, éclairés par une même lumière, présentent des couleurs différentes, c'est-à-dire réfléchissent de la lumière *diffuse* (860) affectant différentes teintes. Nous allons voir que la chaleur *d'une même source* réfléchiée par les surfaces dépolies présente aussi des qualités différentes, c'est-à-dire que ces surfaces sont *thermochrôiques* de diverses manières. Voici d'abord comment Melloni a prouvé l'existence de la chaleur diffuse, et l'a distinguée de celle qui est directement émise, ou est réfléchiée *spéculairement* par la surface des corps ¹.

Un disque de bois *r* (fig. 658), recouvert de noir de fumée sur l'une de ses faces, et d'une matière blanche, sur l'autre, est fixé verticalement sur un plateau tournant horizontal. En *L* est placée une lampe, et en *P*, une pile thermoscopique, séparée de la lampe par un large écran. Les rayons de la lampe sont rassemblés et rendus sensiblement parallèles, par une lentille de verre *b*, qui a aussi pour effet d'épurer le flux calorifique, en arrêtant certains rayons. Un écran diathermane *e* sert à faire varier la nature du flux qui tombe sur le disque *r*.

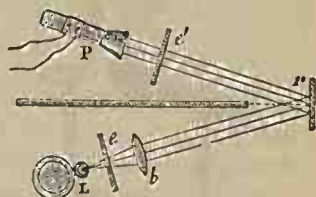


Fig. 658.

Caractères de la chaleur diffuse. —

Si l'on tourne la face blanchie du disque *r*, du côté de la pile, on voit l'aiguille du rhéomètre marcher de 30 à 35°, ce résultat est dû à la réflexion diffuse; car 1° l'aiguille se met en mouvement aussitôt qu'on démasque la lampe, ce qui exclut l'idée de rayons émis par le disque après qu'il se serait échauffé. 2° si l'on présente à la source la face noircie du disque, il n'y a plus qu'un effet très-faible, et cependant cette face noircie s'échauffe au moins aussi rapidement que la face blanche. 3° l'aiguille rétrograde immédiatement quand on intercepte les rayons de la lampe, et elle revient au zéro dans le même temps, quelle que soit la face du disque tournée vers la pile. 4° une lame de verre *e'*, qui intercepterait la totalité de rayons aussi faibles que ceux que rayonne le disque *r*, n'altère que peu l'effet produit sur la pile, la lentille *b* ayant déjà intercepté les rayons que le verre est capable d'absorber. 5° on ne peut attribuer les résultats observés à la réflexion spéculaire, car la surface n'est pas polie, et la pile peut être placée de manière que la direction *Pr* fasse avec la normale à la surface du disque un angle très-différent de l'angle d'incidence.

Du reste, la réflexion diffuse se fait également dans tous les sens autour du

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LXXV, p. 337.

point d'incidence; car si l'on déplace la pile de manière que son axe décrive un cône droit autour de ce point, l'aiguille du rhéomètre ne bouge pas.

Melloni a aussi opéré avec les rayons solaires entrant horizontalement par une ouverture de 10^{cm} de diamètre pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et venant frapper le mur opposé. La pile, présentée à la partie éclairée, donnait toujours la même déviation, quand son axe formait un même angle avec la surface du mur.

Le noir de fumée renvoie aussi un peu de chaleur diffuse, car l'aiguille du rhéomètre marche de 1° environ, quand on tourne vers la pile la face noircie du disque, *r*, et l'on prouve comme ci-dessus que cet effet n'est pas dû au rayonnement du disque qui se serait d'abord échauffé.

La figure 659 représente la disposition de l'appareil au moyen duquel on peut répéter ces expériences. Le disque est installé sur le support tournant K et la

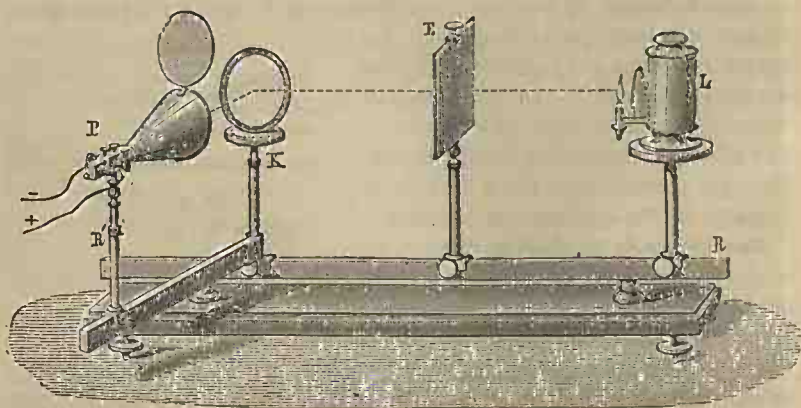


Fig. 659.

pile, P, munie de son cornet collecteur, sur la petite règle mobile autour d'un axe passant par le support K et fixé à la règle principale R'R. En L, est la source de chaleur.

§ 56. Influence de la source sur la diffusion. — Des rayons lumineux de différente couleur sont réfléchis en proportion différente par une même surface mate colorée. Melloni a montré que la chaleur présente des phénomènes analogues : il prend deux disques de carton mince, l'un couvert de noir de fumée des deux côtés, et l'autre noirci d'un côté, et blanchi sur l'autre à la céruse. Ce dernier est placé verticalement au centre du support K (fig. 659), où il reçoit les rayons directs de la source, atteint bientôt une température constante et rayonne par ses deux faces. On place ensuite la pile du même côté du disque que la source; elle reçoit alors la chaleur diffuse, augmentée de la chaleur émise provenant d'une

partie de celle qui a été absorbée, l'autre étant rayonnée par la face postérieure. Puis, en faisant tourner la petite règle mobile, on amène la pile du côté de l'autre face, dans une position synétrique par rapport au plan du disque resté en place, et l'on note l'effet moindre produit par la chaleur que rayonne la face postérieure. Plus la différence entre les effets produits par les deux faces est grande, plus la diffusion est prononcée. Voici quelques-uns des résultats trouvés par ce moyen, avec 4 sources différentes. Les nombres indiquent combien de rayons sont reçus par la pile; le nombre de ceux qu'elle reçoit de la face postérieure du disque dont les deux faces sont noircies, étant représenté par 100.

SURFACE tournée du côté de la pile.		MÉTAL à 400°	PLATINE Incandescent.	LAMPE de Locatelli.	LAMPE à cheminée de verre.
1 ^{er} disque.	Face postérieure noire...	100	100	100	100
	Face antérieure noire...	118	117	119	118
2 ^e disque.	Face postérieure noire...	93	84	69	46
	Face antérieure blanche...	129	152	181	250

Si l'on prend les rapports entre les radiations des deux faces du second disque, on trouve les nombres 1,4; 1,8; 2,6; 5,4 qui vont en augmentant avec la température de la source, et dépendent de sa thermochrôse (877). L'analogie est donc encore frappante avec les phénomènes lumineux.

Si l'on prend ce rapport entre les radiations des deux faces du disque noirci des deux côtés, on le trouve sensiblement constant, quelle que soit la source; d'où l'on doit conclure que *le noir de fumée diffuse toujours la même proportion de la chaleur incidente, quelle qu'en soit l'origine.*

Il est à remarquer que la face postérieure du disque noirci des deux côtés envoie moins de rayons que la face antérieure. Ce résultat ne doit pas être entièrement attribué au pouvoir diffusif très-faible du noir de fumée (885), mais il est dû, en grande partie, à ce que la surface antérieure s'échauffe et rayonne plus que la surface postérieure, à cause de la difficulté qu'éprouve la chaleur à traverser le disque; car la différence augmente avec son épaisseur. Le noir de fumée ne peut donc réfléchir que des quantités extrêmement faibles de chaleur diffuse, de même qu'il ne réfléchit que très-peu de lumière diffuse; il se comporte donc pour la chaleur comme pour la lumière, et il est à la fois *mélanothémique* pour les rayons de chaleur, et *noir* pour les rayons lumineux qu'il éteint également presque totalement, quelle que soit leur couleur.

Les corps blancs, au contraire, sont *thermochrôiques*, ainsi que beaucoup d'autres que l'on peut appliquer sur le disque de l'appareil. Certains métaux polis ou non, *platine, fer, plomb, étain, zinc*, nous offrent des corps *leucother-*

miques, c'est-à-dire qui, dépolis, réfléchissent également toutes les espèces de rayons, comme les corps blancs réfléchissent également les divers rayons lumineux colorés. M. Knoblauch a reconnu qu'il y a des métaux *thermochroïques*, l'or, l'argent, le mercure, le cuivre, et le laiton à un faible degré. Le pouvoir diffusif des métaux varie avec leur nature. Celui de l'or, de l'argent, de l'étain, du platine, du cuivre, est plus grand que celui des corps non métalliques. Le plomb et le fer ont, dans certains cas, un pouvoir diffusif moindre que les substances blanches; de même que certains corps blancs éclairés peuvent présenter plus ou moins d'éclat, et même en avoir moins que certains corps colorés.

887. Nature des rayons diffus. — Pour compléter l'analogie avec la lumière diffuse, il reste à montrer que les rayons de chaleur diffuse renvoyés par une surface *thermochroïque* sont d'espèce différente, quand on change cette surface tout en conservant la même source. C'est ce qu'a fait M. Knoblauch¹; ainsi, il a reconnu que la chaleur diffuse émanant d'une surface recouverte de carmin, passe en plus grande proportion à travers une lame de spath d'Islande, que celle qui émane de la surface d'un papier noir. Des résultats semblables ont été obtenus au moyen de lames d'alun, gypse, verre rouge, verre bleu. Quand on change de source, la différence des effets produits avec le carmin et le papier noir se modifie; elle va en diminuant quand on remplace la lampe d'Argent successivement par le platine incandescent et la flamme d'alcool, et devient nulle avec un fer chaud obscur.

Il est facile de voir que le changement de composition du flux calorifique après la diffusion, vient de l'absorption élective exercée sur certaines espèces de rayons; car les corps qui réfléchissent par diffusion des rayons traversant facilement une substance, réfléchissent peu de ces rayons quand ils sont de l'espèce que cette substance absorbe. De plus, quand la chaleur diffuse ne diffère pas de la chaleur directe de la source, la plaque dépolie étant *leucothermique*, la nature de la source n'a plus d'influence sur les résultats.

Parmi les résultats constatés par M. Knoblauch, nous citerons les suivants: le velours blanc envoie beaucoup moins de chaleur diffuse que le velours noir, pour toutes les sources. La tôle est *leucothermique*, car la chaleur qu'elle réfléchit ne se distingue pas de la chaleur incidente, et elle réfléchit avec la même intensité la chaleur de toutes les sources. Le papier blanc et la laque noire; la toile, la soie, blanches ou noires; l'or, l'argent et le mercure, ont les mêmes *thermochroïses*; car les flux réfléchis par ces substances traversent en même proportion différentes plaques diathermanes. Les cristaux sont également *leucothermiques*. La suie et le charbon animal sont *mélanothermiques*.

888. Diffusion par réfraction. — La chaleur qui traverse une substance diathermane *dépolie* sort dans toutes les directions et d'une manière diffuse, comme la lumière qui traverse une lame de verre dépoli. Pour le prouver,

¹ Annales de Poggendorff, 1857; et Bibl. de Genève (arch. des sc., 1858), t. II, p. 22.

Melloni¹ dispose, entre la pile et la source de chaleur, deux écrans percés d'une petite ouverture circulaire, et place entre les deux écrans une lame diathermane polie, de verre par exemple, dont la présence diminue l'effet de la radiation directe. La position de la lame entre ces deux écrans n'a aucune influence sur la déviation stable observée. Mais si la lame est dépolie, cette déviation, qui est moindre que lorsqu'elle est polie, augmente quand la lame se rapproche de la pile, parce que les rayons, qui sortent dans toutes les directions par chaque point, forment un cône passant par l'ouverture de l'écran et rencontrant la base de la pile sur une plus grande étendue. L'effet produit ne peut être attribué au rayonnement de la plaque dépolie; car, si on la place contre l'écran percé, d'un côté ou de l'autre, la déviation reste la même. On peut encore mettre une lame de verre devant la pile; l'effet n'est que peu diminué, tandis que cette lame intercepterait totalement la chaleur rayonnante de la plaque dépolie, dont la température est très-faible. Cette dernière expérience montre aussi que les rayons diffus par réfraction s'épurent à travers le verre dépoli, comme à travers le verre poli.

La chaleur n'éprouve pas la diffusion en traversant une couche de noir de fumée déposée sur une plaque de sel gemme. Il y a encore là analogie avec ce qui se passe pour la lumière; car, en regardant à travers une lame de verre recouverte de noir de fumée, on distingue la forme des objets très-éclatants, du soleil par exemple, tandis qu'on ne distingue qu'une lueur diffuse quand on regarde à travers une lame de verre dépoli.

III. Radiations diverses. Principe de l'identité.

889. La chaleur est due à la même cause que la lumière. — Nous venons de voir comment la similitude entre les propriétés des rayons de chaleur et des rayons de lumière se soutient dans tous les détails des expériences. L'analogie se retrouve encore dans d'autres phénomènes que nous étudierons dans l'Optique: nous verrons que les rayons de chaleur éprouvent, comme les rayons lumineux, la *double réfraction*, c'est-à-dire qu'ils se bifurquent en pénétrant dans certains cristaux. Nous montrerons encore qu'ils peuvent être *polarisés* dans les mêmes circonstances et en suivant les mêmes lois que la lumière, c'est-à-dire qu'ils peuvent être modifiés de manière à présenter des propriétés différentes sur leurs différents côtés; si, par exemple, nous supposons un rayon dirigé verticalement, ces propriétés ne sont pas les mêmes du côté qui regarde le nord, et du côté qui regarde l'est ou l'ouest.

Nous avons expliqué comment un ébranlement produit dans un milieu élastique, comme l'air ou l'éther, donne naissance à deux espèces de vibrations, les unes *transversales* à la direction de la propagation, les autres *longitudinales* (I, 788).

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXXV, p. 374.

Ce sont ces dernières qui produisent le son, les vibrations transversales ne jouant aucun rôle dans ce phénomène. Or, il résulte des lois de la *polarisation* que, dans le système des ondulations, les mouvements vibratoires de l'éther qui produisent la lumière, s'accomplissent *perpendiculairement* à la direction des rayons; ce sont donc, ici, les vibrations transversales qui sont efficaces. Quant aux vibrations longitudinales, Cauchy, dans une lettre adressée à Ampère, penchait à leur attribuer les effets de la chaleur. Cette idée, d'abord accueillie avec faveur, ne peut plus être soutenue, maintenant qu'il est bien prouvé que les rayons de chaleur peuvent être *polarisés*, ce qui exige que les vibrations qui leur donnent naissance soient transversales. Nous allons voir en outre, que les effets calorifiques et lumineux, produits aux mêmes points du spectre, doivent être attribués aux mêmes rayons, c'est-à-dire aux mêmes mouvements vibratoires, qui produisent ainsi les deux effets en même temps. Melloni avait d'abord repoussé cette opinion, qu'il a plus tard adoptée et développée avec conviction sous le nom de *principe de l'identité* ¹.

Pour rendre évidente cette identité des rayons lumineux et calorifiques pris en un même point du spectre, on a prouvé que la lumière et la chaleur y sont absorbées en mêmes proportions par des lames de différentes substances. Ce résultat a été établi de la manière suivante par MM. Masson et Jamin ². Ayant isolé un pinceau de rayons *simples*, successivement dans toutes les parties d'un spectre lumineux bien pur, ils ont reconnu que des lames incolores de sel gemme, cristal de roche, alun, verre et eau, qui n'affaiblissent pas sensiblement la lumière, laissent passer également et totalement tous les rayons calorifiques. L'épaisseur du cristal de roche a varié de 1^{mm} à 150^{mm}. Avec une couche d'eau de 80^{cm}, il n'y avait plus que 75 pour cent de chaleur transmise; mais la lumière était aussi sensiblement affaiblie. Les verres colorés, qui arrêtent certains rayons lumineux, arrêtent aussi les rayons calorifiques de même réfrangibilité. Par exemple, la chaleur manque totalement dans les bandes obscures que produit dans le spectre lumineux, l'interposition du verre bleu de cobalt. Des expériences faites en comparant les intensités des rayons directs de chaleur et de lumière, aux intensités des rayons qui avaient traversé une lame colorée, ont montré que les pertes de chaleur et de lumière se font toujours dans les mêmes proportions. La chaleur se mesurait au moyen du thermo-multiplicateur, et la lumière, au moyen d'un appareil *photométrique*. On voit donc que, partout où les rayons simples du spectre produisent *à la fois* des effets lumineux et calorifiques, ces deux effets sont atténués de la même manière par les milieux interposés, et sont conservés dans les mêmes proportions, et les rayons de différente couleur sont aussi de différente *thermochrôme*.

Nous expliquerons en optique, comment on peut mesurer les *longueurs d'ondulation* de la lumière, correspondantes aux différentes couleurs, et nous

¹ Bibliothèque universelle de Genève, t. XXXIX (1842), p. 121.

² Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXI, p. 44.

verrons que les plus courtes correspondent aux rayons les plus réfringibles. MM. Masson et Jamin ont trouvé les mêmes longueurs d'ondulation pour les rayons lumineux et calorifiques de même réfringibilité. Il résulte enfin de leurs expériences que toutes les modifications que l'on peut apporter aux vibrations lumineuses, quand on fait passer les rayons à travers certaines substances, se retrouvent pour les rayons de chaleur pris dans les mêmes points du spectre, avec les mêmes intensités et les mêmes valeurs numériques.

On peut conclure de là que la chaleur et la lumière existant simultanément en un même point d'un spectre pur, sont dues aux mêmes rayons, qui ont la propriété de produire les deux sortes d'effets, ou, dans le système des ondulations, aux mêmes mouvements vibratoires de l'éther.

Ces mêmes rayons peuvent aussi produire deux autres genres d'effets : 1^o des effets chimiques, comme la décomposition des couches sensibles employées dans la photographie, et Herschell et Malagati ont prouvé que ces effets sont différemment atténués dans les diverses régions du spectre, par une lame interposée ; 2^o des effets phosphorogéniques, consistant dans la propriété de répandre de la lumière pendant un certain temps, communiquée à certains corps par les rayons de lumière, ou de chaleur obscure. Nous verrons, dans l'optique, que ce sont encore les mêmes rayons qui produisent ces deux nouveaux genres d'effets, aux mêmes points du spectre. Ajoutons que, de même qu'il y a des rayons de chaleur obscure au-delà du rouge, de même il y a des rayons invisibles, produisant des effets chimiques et phosphorogéniques, à l'extrémité opposée du spectre, au delà du violet. Il y a donc des rayons qui ne sont susceptibles de produire que certains des quatre effets, et, en réalité, on peut dire qu'il n'y a pas des rayons calorifiques, des rayons lumineux, etc. ; il y a simplement des radiations susceptibles de produire divers effets, suivant la rapidité et l'amplitude des vibrations qui les constituent, et, comme le dit Melloni, « la lumière, loin de constituer la propriété fondamentale de ce rayonnement (celui du soleil) ne serait qu'une simple manifestation secondaire et, pour ainsi dire, accidentelle d'un certain nombre de ses radiations élémentaires ». On voit pourquoi, quand on veut comparer les absorptions exercées sur la lumière et sur la chaleur, il est essentiel d'opérer sur les rayons isolés dans le spectre ; un faisceau qui vient directement de la source, contenant un mélange de chaleur lumineuse et de chaleur obscure, dont la première peut être absorbée, sans diminution correspondante dans l'intensité calorifique du faisceau (884).

Il nous reste à rendre compte, dans la théorie des ondulations, des différences d'impression que produisent la chaleur et la lumière, la première agissant sur toute la surface du corps, tandis que l'autre n'affecte que l'organe de la vue.

890. Des impressions de chaleur et de lumière¹. — Il est naturel d'admettre que les vibrations les plus rapides de l'éther sont aussi celles dont l'amplitude est généralement la plus petite. C'est, en effet, ce qui résulte de

¹ Mémoires de l'Acad. des Sciences de Toulouse (1859), t. III, p. 493 ; et t. IV, p. 213.

l'inspection du spectre, qui présente l'éclat le plus faible dans le bleu et le violet, auxquels correspondent les vibrations les plus rapides. Il en est de même pour les sons; on remarque que les plus aigus sont généralement les moins intenses; aussi, n'entend-on bien que les basses d'un orchestre éloigné. Cependant, les sons très-graves ont peu d'intensité, quoique l'amplitude puisse être grande; et il en est de même des vibrations de l'éther; car on remarque que l'extrémité du rouge du spectre est très-peu brillante.

Les vibrations imprimées à l'air par les corps sonores peuvent produire sur nous deux sortes d'effets : les uns se font sentir sur un organe spécial, l'organe de l'ouïe, quand les vibrations possèdent une rapidité convenable; les autres affectent toute la surface du corps, en produisant cette sorte de frémissement général qui résulte de vibrations énergiques, qu'elles soient accompagnées ou non d'un son perceptible. Il n'y a que les sons graves qui peuvent donner des vibrations d'amplitude assez grande pour produire cet effet général; les sons aigus ne peuvent agir que sur l'oreille, à moins qu'ils ne soient extrêmement intenses.

Nous pouvons considérer, de même, les vibrations communiquées à l'éther par les corps lumineux, comme donnant naissance à deux sortes d'impressions; les unes particulières à l'organe de la vue, les autres agissant sur le tact, partout où la surface du corps est sensible : les premières produisent l'impression de lumière; les autres, celle de chaleur, quand l'amplitude est suffisamment grande. Or les rayons colorés qui appartiennent à l'extrémité violette du spectre sont engendrés par des vibrations rapides et, par conséquent, d'amplitude très-petite; ces vibrations ne peuvent donc produire l'effet général, l'effet calorifique; à moins que l'énergie vibratoire ne soit extrême, comme cela a lieu pour la lumière électrique, dont le spectre a donné à MM. de la Provestaye et Desains des signes de chaleur dans la partie violette. L'effet calorifique sera facilement produit par les vibrations plus lentes, qui correspondent aux rayons jaunes, orangés et rouges, et aussi par des vibrations plus lentes encore, trop peu rapides pour donner l'impression de lumière. Les vibrations de l'air nous offrent des résultats analogues; quand il y en a moins de 32 par seconde, elles peuvent bien agir sur toute la surface du corps, mais elles sont sans action sur la membrane du tympan.

Ampère trouvait à l'absence d'effets lumineux chez les rayons les moins réfringibles, une autre explication, dans leur facile absorption par les humeurs de l'œil. Mais la rapidité des vibrations peut à elle seule déterminer une limite, car du côté des rayons les plus réfringibles, où la chaleur est à peine absorbée (884), les effets lumineux finissent par disparaître, et cependant, il existe des rayons invisibles au delà du violet, comme l'attestent les actions chimiques et phosphorogéniques (889). Nous avons vu que les vibrations trop rapides de l'air sont, de même, impuissantes à produire le son (I, 631).

On voit, par ce qui précède, comment on peut rattacher les impressions de chaleur et de lumière à une seule et même cause. Tantôt les ondulations de l'éther

produisent les deux effets en même temps, quand l'amplitude et la rapidité des vibrations sont comprises entre certaines limites; tantôt l'un de ces effets seulement, quand les vibrations sont trop lentes ou trop rapides, ou leur amplitude trop petite. — La manière dont apparaissent et se succèdent les diverses espèces de rayons quand on échauffe un corps jusqu'à l'incandescence, vient à l'appui de la théorie qui précède.

891. Corps lumineux par incandescence. — Quand on élève la température d'un corps, la source qui l'échauffe communique des vibrations à l'éther qu'il contient, et, par suite, à ses molécules. Celles-ci, à leur tour, agissent sur l'éther et y excitent des ondulations de différentes longueurs. Les plus longues ont la plus grande amplitude et sont d'abord seules capables de produire l'impression de chaleur; elles correspondent aux rayons les moins réfrangibles; car nous avons vu qu'un prisme de sel gemme dévie d'autant moins les rayons, que leur température est plus basse. Si la chaleur communiquée devient plus intense, l'amplitude de toutes les vibrations augmentant, les plus rapides finissent par agir sur la rétine, et le corps chaud devient lumineux.

D'après ce que nous avons dit, ce sont les rayons rouges, dont les vibrations sont les plus lentes, et par conséquent de plus grande amplitude, qui devront apparaître les premiers; c'est, en effet, ce que M. Draper a trouvé par l'expérience, et sans idée préconçue. Il a d'abord formé un spectre au moyen d'une fente laissant passer des rayons lumineux, et a relevé, au moyen d'une petite lunette micrométrique, les positions des différentes couleurs. Il a ensuite remplacé la fente lumineuse par un fil de platine dont il faisait varier le degré d'incandescence au moyen d'un courant électrique plus ou moins intense; il vit d'abord apparaître la partie rouge du spectre; puis, à mesure que l'éclat du fil augmentait, les couleurs suivantes, jusqu'au violet. Remarquons encore qu'un corps qui devient incandescent paraît d'abord d'un rouge dont l'éclat augmente, jusqu'à ce qu'il devienne d'un blanc éblouissant; ce qui indique que les vibrations plus rapides des couleurs autres que le rouge, viennent se joindre plus tard à celles des rayons rouges, pour constituer le mélange qui donne la lumière blanche. La teinte peut même devenir un peu bleuâtre, d'où l'expression de *chauffer au bleu*, usitée dans l'industrie.

892. Milieux ayant les mêmes éléments que la source. — Les vues qui précèdent et l'explication de la chaleur par le mouvement, reçoivent un nouveau jour des expériences de M. Tyndall sur les relations entre la nature des milieux qui absorbent la chaleur et celle de la matière qui la rayonne. Les molécules d'un milieu ne peuvent s'échauffer, c'est-à-dire recevoir une augmentation d'amplitude dans leurs vibrations, qu'autant que les rayons incidents vibrent avec la même rapidité qu'elles; de même qu'une corde tendue ne répond qu'à certaines vibrations de l'air, à l'exclusion de toutes les autres. Ces rayons sont alors affaiblis, tandis que ceux dont les vibrations ne sont pas de même durée que celles des molécules du milieu, passent sans perdre de leur intensité. Les molécules de l'air, des gaz simples, qui n'absorbent que très-peu de chaleur, ne vibrent donc

pas comme les rayons de la plupart des sources. Le brome, l'iode, vibrent à l'unisson des rayons lumineux qu'ils interceptent, tandis qu'ils restent indifférents aux vibrations plus lentes des rayons obscurs et les laissent passer. La transparence et la diathermansie indiquent donc l'accord entre les vibrations du milieu et de la source; et l'opacité, leur discordance.

Il est naturel de supposer que les rayons le plus fortement absorbés par un milieu seront ceux d'une source contenant les mêmes éléments que ce milieu, et vibrant avec la même rapidité. C'est ce que M. Tyndall a prouvé, particulièrement sur les flammes d'hydrogène et d'oxyde de carbone.

Les rayons de la *flamme d'hydrogène*, dont la partie rayonnante est surtout formée des molécules de la vapeur d'eau, et qui sont à peine absorbés par l'air sec, perdent de 17 à 20 pour cent de leur intensité en traversant l'air plus ou moins humide. Les vibrations lancées par la vapeur d'eau à 3200° sont donc de même rapidité que celles de la vapeur froide que contient l'air. Nous verrons dans l'Optique (spectroscopie) que les vapeurs absorbent aussi tout spécialement les rayons qu'elles sont susceptibles d'émettre quand elles sont incandescentes.

Les rayons de la *flamme d'hydrogène* sont, aussi, fortement absorbés par l'eau. Une couche de 7^{mm} d'épaisseur ne laisse rien passer, et une couche de 0^{mm},9 en absorbe 97 pour cent; tandis qu'une couche 10 fois plus épaisse n'absorbe que 11 pour cent des rayons d'une source solide. Les rayons émis par la vapeur d'eau incandescente vibrent donc comme les molécules de l'eau froide. — Ces rayons sont de très-faible réfrangibilité, car M. Tyndall a constaté que le maximum de chaleur, quand ils sont déviés par un prisme de sel gemme, se trouve dans la partie obscure au delà du rouge du spectre donné par une flamme de gaz.

Les rayons de la *flamme de l'oxyde de carbone*, qui viennent surtout des molécules d'acide carbonique qu'elle contient, sont énormément absorbés par ce dernier gaz, qui n'intercepte cependant que très-peu de la chaleur des sources solides. Sous une pression de 2^{cm},54, une colonne d'acide carbonique de 1^m environ, intercepte 48 pour cent de la chaleur émise par la flamme d'oxyde de carbone. Cet effet est tellement marqué qu'on peut déterminer, pour les pressions faibles (867), la quantité d'acide carbonique mêlé à l'air, avec une précision comparable à celle que donne l'analyse chimique.

Le gaz oléfiant, qui absorbe en si grande proportion les rayons des sources solides, absorbe beaucoup moins que l'acide carbonique, ceux des flammes d'hydrogène et d'oxyde de carbone. — Nous ajouterons enfin que M. Balfour Stewart a constaté que les rayons émis par le *sel gemme* très-chaud sont absorbés en très-grande proportion par une plaque du même sel.

893. Calorescence. — Une flamme d'alcool fait rougir une spirale de platine, qui émet alors des rayons plus réfrangibles que les siens, c'est-à-dire dont les vibrations sont plus rapides. Nous avons vu aussi (884) la chaleur obscure à vibrations lentes, faire rougir une lame de platine, c'est-à-dire y exciter des vibrations plus rapprochés. Ce phénomène peut être comparé à la production de vibrations plus rapides que celles qui les excitent, dans une

corde, un diapason, pourvu qu'il y ait un rapport très-simple entre les nombres de vibrations des deux corps en présence.

M. Tyndall désigne sous le nom de *calorescence* cette excitation par une source, de vibrations plus rapides que celles qu'elle engendre. La lumière produit des effets analogues, connus sous le nom de phénomènes de *fluorescence*; seulement, les vibrations produites sont ordinairement plus lentes que celles de la lumière qui les excite.

§ 2. — PASSAGE DE LA CHALEUR PAR LA SURFACE DES CORPS

I. Pouvoir émissif.

894. Refroidissement des corps. — Le refroidissement et l'échauffement des corps dépendent : 1° de la différence entre leur température et celle du milieu ambiant; 2° de la facilité avec laquelle la chaleur se déplace dans leur intérieur, pour arriver à la surface, ou s'en éloigner; 3° enfin, de la facilité avec laquelle la chaleur peut passer par cette surface, pour sortir ou pour entrer. Nous allons d'abord nous occuper des phénomènes que l'on observe dans ce passage, quand on rend les autres circonstances identiques, ou qu'on annule leur influence.

Loi de Newton ou de Richmann. — Dans les expériences que l'on fait à ce sujet, on s'appuie sur une loi que nous allons d'abord énoncer, et sur laquelle nous reviendrons plus loin (928) : *la vitesse du refroidissement ou de l'échauffement d'un corps est proportionnelle à la différence de sa température avec celle du milieu ambiant.* On nomme *vitesse*, la variation de température pendant l'unité de temps, choisie assez courte pour que la perte ou le gain de chaleur puisse être regardé comme uniforme pendant sa durée. Cette loi, purement empirique, énoncée par Newton dans ses opuscules, n'est qu'approchée; on ne peut la regarder comme suffisamment exacte que pour des différences de température qui ne dépassent pas 20°, la plus élevée des deux ne dépassant pas elle-même 40°. Elle est connue sous le nom de *loi de Newton*, ou de *loi de Richmann*, parce que ce dernier physicien en a vérifié l'exactitude approchée, par un grand nombre d'expériences.

Pouvoir émissif. — Le temps que met un corps à se refroidir d'un certain nombre de degrés dépend de la nature de sa surface. Pour le prouver, Rumfort prit deux vases cylindriques identiques, de métal poli, suspendus par des fils ou reposant sur trois pointes de bois, de manière que leur chaleur ne pût se communiquer au support (*fig.* 660); la surface latérale de l'un d'eux était nue, et celle de l'autre, recouverte d'une fine toile. Ces vases ayant été remplis d'eau bouillante, dont un thermomètre *t* indiquait la température, Rumfort vit que le vase nu se refroidissait beaucoup plus lentement que l'autre. Ayant



Fig. 660.

recouvert ce dernier de différentes substances, il reconnut aussi que la vitesse du refroidissement dépendait de ces substances, et était le plus rapide, quand la surface était noircie par la fumée d'une lampe. La nature de la couche superficielle du corps a donc une grande influence sur la sortie de la chaleur. On nomme *pouvoir émissif* ou *pouvoir rayonnant* d'une substance, la faculté plus ou moins grande qu'elle possède de laisser échapper la chaleur par sa surface.

895. Expériences de Leslie. — Quelques semaines avant la publication des expériences de Rumfort dans les *Transactions philosophiques*, en 1804, Leslie avait fait connaître, dans ses *Recherches sur la nature de la chaleur*, des expériences sur le même sujet, faites par une méthode bien préférable; car, dans les expériences de Rumfort, le refroidissement n'était pas dû seulement au rayonnement, mais aussi au contact de l'air.

L'influence de l'air est évidente dans les expériences suivantes : Leslie ayant rempli d'eau bouillante deux vases d'étain aplatis, l'un nu, et l'autre revêtu de noir de fumée, vit qu'il fallait, pour que leur température baissât de la moitié de son excès sur la température de l'air :

	Vase nu.	Vase noirci.
Par un vent modéré.	44 min.	35 min.
Par une brise assez forte.	23	20,25
Par un vent violent.	9,5	9

On voit que l'action du vent tend à ramener les temps à l'égalité.

Appareil de Leslie. — Pour n'avoir pas à tenir compte de l'action refroidissante de l'air, Leslie a employé l'appareil suivant. Un vase cubique *s* (fig. 661), rempli d'eau bouillante, et dont les faces latérales sont revêtues des différentes substances dont on veut comparer les *pouvoirs émissifs*, est placé en face d'un miroir sphérique *m*, destiné à concentrer un grand nombre de rayons sur l'une des boules, *f*, d'un thermomètre différentiel, dont l'autre boule est abritée par un écran *e*. Ce système se nomme l'*appareil de Leslie*.

L'index du thermomètre marche, puis devient stationnaire, et les excès qu'il indique dans chaque cas, sont proportionnels aux intensités des rayons émis par le corps. En effet, le miroir reçoit, à chaque instant, une fraction *nq* de la quantité de chaleur *q* émise par le corps; fraction qui dépend de l'étendue de la surface du miroir et de la distance *sm*. Une fraction *m* de cette chaleur, c'est-à-dire la quantité *m . nq*, est réfléchiée et concentrée sur la boule du thermomètre. Celle-ci réfléchit une partie de la chaleur qu'elle reçoit, et en absorbe une fraction *p*, c'est-à-dire la quantité *p . mnq*, dans laquelle les nombres *p*, *m*, sont constants pour un même appareil. La température de la boule focale s'élèvera donc; mais comme elle se refroidit avec une vitesse proportionnelle, d'après la loi de Newton (894), à l'excès qu'elle indique par rapport à l'autre boule qui partage la température ambiante, ce qu'elle perd va en augmentant et finit par égaler ce qu'elle reçoit. Alors la température est stationnaire, et l'excès indiqué est proportionnel à la quantité de chaleur perdue.

Comme cette dernière est égale à la quantité $pmnq$ reçue par la boule pendant le même temps, on voit que l'excès de température de cette boule est proportionnel à $pmnq$, ou à la quantité q émise par la surface s , puisque n , m et q restent constants pour un même appareil et pour une même distance sm . Si donc on recouvre la surface s avec différentes substances, on pourra comparer leurs pouvoirs émissifs, en comparant les excès indiqués par le thermomètre différentiel devenu stationnaire.

Pour confirmer ce raisonnement, Delaroche a pris deux miroirs conjugués, et ayant noirci à moitié, aux trois quarts.... celui dont le foyer recevait la boule du thermomètre, il reconnut que les différences de température des deux boules étaient la moitié, le quart..... des différences qu'on observait lorsque le miroir était entièrement brillant. Or nous verrons (903) que les parties noircies ne réfléchissent pas sensiblement de chaleur.

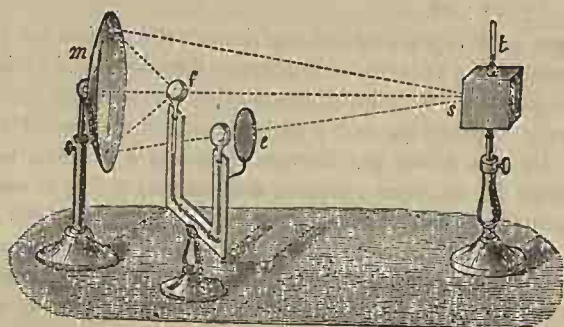


Fig. 661.

Résultats de l'expérience. — Leslie a fait beaucoup d'expériences au moyen de son appareil; chaque série était répétée à différentes températures, et en plaçant les substances dont il voulait comparer les pouvoirs, tantôt sur une face du cube, tantôt sur une autre. Il constata ainsi que les effets ne dépendent que de la couche superficielle du corps rayonnant; car la nature des faces du cube sur lesquelles on applique les différentes substances, est sans influence sur les résultats.

Voici les principaux résultats obtenus par Leslie. Le pouvoir rayonnant du noir de fumée, qui est le plus grand de tous, et auquel on compare les pouvoirs des autres corps, est représenté par 100 :

Noir de fumée.	100	Encre de chine.	88	Mercure.	20
Eau (par évaluation). 100		Glace.	85	Plomb brillant.	19
Papier à écrire.	98	Minium.	80	Fer poli.	15
Cire à cacheter.	95	Plombagine.	75	Étain, argent,	} 12
Verre (crown-glass).. 90		Plomb terne.	45	cuivre, or.	

Pour comparer les pouvoirs émissifs des corps, Rumfort s'est servi d'une méthode semblable à celle qu'il a imaginée pour comparer les intensités de deux lumières, en s'appuyant sur ce principe démontré plus loin (920), que l'intensité de la chaleur reçue varie en raison inverse du carré de la distance à la source. Il plaçait, en face des deux boules de son thermoscope (838), les bases de deux vases cylindriques égaux remplis d'eau bouillante; ces bases étaient recouvertes des substances à comparer, et un écran placé entre les boules empêchait chacune d'elles de recevoir la chaleur qui ne lui était pas destinée. En éloignant le vase qui rayonnait le plus, il faisait en sorte que l'index du thermoscope fût au zéro. Alors les *pouvoirs émissifs* étaient en *raison directe* des carrés des distances, d , d' , des vases aux deux boules. En effet, soit i , i' les intensités des rayons émis par les deux surfaces égales, c'est-à-dire les quantités de chaleur envoyées à l'unité de distance sur l'unité de surface; aux distances d et d' , ces intensités sont $i : d^2$ et $i' : d'^2$; et comme le thermoscope est au zéro, ces quantités sont égales, et l'on a $i : i' = d^2 : d'^2$.

Remarque. — A l'époque où ces expériences ont été faites, on n'avait pas encore découvert qu'il y a des rayons de différente thermochrôse. Le raisonnement par lequel on prouve que les pouvoirs émissifs sont proportionnels aux indications du thermoscope suppose que m et p sont constants, quelle que soit la substance rayonnante. Or nous savons que diverses substances à la même température peuvent émettre des mélanges composés différemment (877), et nous verrons que les rayons de différente thermochrôse ne sont pas réfléchis en même proportion, tant sur la surface du miroir que sur la boule du thermoscope. L'inclinaison des rayons sur la surface du miroir, et par conséquent son ouverture a aussi une influence, ce qui montre qu'il faudra toujours placer la source à la même distance. Cependant, Leslie ayant employé des températures assez faibles et toujours de la chaleur obscure, on peut regarder les résultats qu'il a donnés comme suffisamment approchés pour les applications qu'on en fait, sauf ceux qui correspondent à certains métaux, qui sont beaucoup trop forts, comme nous allons le voir.

896. Expériences avec le thermo-multiplicateur. — Cet instrument donne de meilleurs résultats que l'appareil de Leslie; les rayons tombent directement et normalement sur la base de la pile, qui, étant garnie de noir de fumée, les absorbe toujours en même proportion, quelle que soit leur nature, comme nous le verrons (912). Melloni a trouvé ainsi les nombres suivants :

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Blanc de céruse.	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91		

Le noir de fumée, le blanc de céruse, le papier, le verre, possèdent à peu près le même pouvoir émissif. La *couleur*, la *dureté*, la *transparence* ne paraissent donc pas avoir d'influence sur cette propriété. Les métaux ternis

rayonnent plus que les mêmes métaux brillants, qui sont les corps doués du plus faible pouvoir émissif. Remarquons que ce sont aussi les corps les plus denses.

897. Pouvoir émissif des métaux. — Le thermo-multiplicateur a servi à MM. de la Provostaye et P. Desains à prouver que le pouvoir émissif des métaux est beaucoup plus faible qu'on ne le croyait¹. Ayant d'abord observé que les rayons émis par une surface argentée ne déviaient qu'à peine l'aiguille de leur appareil, quand ceux de la même surface noireie la déviaient de 60°, ils cherchèrent à obtenir des déviations appréciables avec les surfaces argentées, tout en ne sortant pas des limites des tables de graduation (842), quand ils employaient les surfaces noircies.

Dans une première méthode ils faisaient passer le faisceau de rayons calorifiques par l'ouverture variable d'un écran, et constataient dans quel rapport se trouvait diminuée la déviation du rhéomètre quand cette ouverture devenait n fois plus petite. Si ce rapport était égal à $1 : m$, la surface noire qui produisait une déviation d , en rayonnant par l'ouverture rendue n fois plus petite, aurait produit une déviation md , par l'ouverture entière. On pouvait ainsi réduire la déviation produite par la surface noireie, de manière à la rendre observable, puis calculer ce qu'elle eût été si l'ouverture n'eût pas été rétrécie.

Dans la seconde méthode, on procédait de la manière suivante : soit δ et δ' les déviations produites par une même surface noireie, portée successivement à t° et à t'° , dans une enceinte à 0° ; l'expérience prouve que l'on a sensiblement

$$\delta : \delta' = a^{t - 0} - 1 : a^{t' - 0} - 1,$$

en prenant $a = 1,009$; pourvu que les températures soient inférieures à 160° . On observe donc la déviation δ produite par le noir de fumée à une température t peu élevée, et l'on passe de cette déviation, au moyen de la relation précédente, à celle qui eût été donnée à la température t' de la surface métallique. Voici les résultats trouvés par ces deux méthodes, pour les pouvoirs émissifs, celui du noir de fumée étant représenté par 100 :

Argent vierge laminé.	3,00	Argent argenté	2,05
Argent mat, chimiquement déposé sur le cuivre.	5,36	Platine laminé.	10,80
Argent pur bruni.	2,50	Platine bruni.	9,50
Argent déposé chimiquement, bruni.	2,25	Or en feuilles.	4,28
		Cuivre en lames.	4,90

Melloni est arrivé à fort peu près au même résultat, pour l'argent poli, en comparant les températures stationnaires indiquées par deux thermomètres, l'un noirci, l'autre enveloppé d'une feuille d'argent, lorsque ces instruments rayonnaient vers l'espace pendant une nuit sereine.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXII, p. 372.

898. Variation du pouvoir émissif avec la température. — Les expériences dont nous venons de parler ont été faites à des températures inférieures ou peu supérieures à 100°. Il résulte des recherches de MM. de la Provostaye et P. Desains que le pouvoir émissif change dans les températures très-élevées¹. Le corps rayonnant était une lame de platine, de 18^{mm} de largeur et de 76^{mm} de longueur, couverte de noir de fumée sur ses deux faces, et portée à des températures de 100° à 600°, au moyen du courant d'une pile de Bunsen d'une trentaine de couples. Deux piles thermo-électriques identiques étaient placées de chaque côté de cette lame, de manière à donner les mêmes déviations. On remplaçait ensuite le noir de fumée de l'une des faces de la lame de platine par une couche de borate de plomb, et l'on observait encore simultanément les rayonnements des deux faces. Le rapport entre les effets produits donnait celui des pouvoirs émissifs des deux enduits; et l'on a reconnu que le pouvoir du borate de plomb diminue notablement, à la température du rouge naissant. A 100°, ce pouvoir est sensiblement égal à celui du noir de fumée et de l'oxyde noir de cuivre, et à 550° environ il n'en est que les 0,75. Il reprend sa première valeur quand on le ramène à 100°, ce qui prouve que la diminution n'est pas due à une altération produite par la chaleur. Dans les mêmes circonstances, le pouvoir émissif du platine passe de 0,10 à 0,14 de celui du noir de fumée.

899. Surfaces polies ou dépolies. — Leslie avait trouvé que le pouvoir émissif d'un métal était d'autant plus grand que ce métal était moins poli, et il avait conclu de là que les aspérités d'une surface dépolie avaient la faculté de laisser échapper facilement la chaleur. Mais Melloni a prouvé que les différences trouvées par Leslie étaient dues à une cause étrangère à la présence ou à l'absence d'aspérités².

Pour le démontrer, Melloni appliqua sur les faces d'un vase cubique de métal, deux lames d'ivoire et deux lames de jayet, assujetties dans des coulisses et pressées par des ressorts. L'une des lames de chaque couple était polie, et l'autre, rayée en divers sens. Cependant, il n'y eut aucune différence entre les effets produits sur le thermo-multiplicateur, par les deux lames de même espèce. Un vase cubique de marbre, à parois latérales également épaisses, donna le même résultat par ses quatre faces, dont une était polie, une autre terne, une autre rayée dans un sens, et la dernière rayée dans deux sens perpendiculaires.

Comme les substances dont il s'agit ont un pouvoir émissif très-grand, 93 et 98, de manière qu'il ne peut être que très-peu augmenté, Melloni opéra sur des métaux; il construisit un cube dont les faces latérales étaient formées de 4 lames d'argent soudées. Deux de ces lames avaient été martelées fortement; les deux autres, coulées et refroidies lentement, puis polies à la pierre ponce et au charbon. Une des lames écrouies et une des lames coulées furent ensuite rayées

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXVIII, p. 440.

² Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LXX, p. 435.

dans un sens : Voici les déviations produites sur le thermo-multiplicateur, par les diverses faces de ce cube rempli d'eau bouillante :

Plaque érouie.	} polie. 10° rayée.. . . . 18	} Plaque fondue.	} polie.. . . . 13,7 rayée. 11,3

En rayant la plaque érouie on avait donc augmenté son pouvoir émissif, ce qui est d'accord avec les résultats trouvés par Leslie; mais en rayant la plaque coulée, on l'avait diminué. On peut donc, dans certains cas, affaiblir le pouvoir émissif des surfaces, en les dépolissant.

Melloni a conclu de ses expériences que, si Leslie a trouvé un pouvoir émissif plus grand pour les métaux rayés, c'est qu'il employait des lames tirées au laminoir et recouvertes sur les deux faces d'une couche plus érouie et plus dense que les parties intérieures. En rayant la lame, on met à découvert, au fond des sillons, des parties moins denses, en nombre d'autant plus grand que l'on pratique plus de raies. De plus, la couche superficielle peut se distendre par son élasticité et sa densité diminuer, quand on y pratique des raies. Le jayet, le marbre, l'ivoire, qui ne sont pas érouis, donnent les mêmes résultats, qu'ils soient polis ou dépolis. L'argent coulé rayonne moins après qu'on l'a rayé, parce que les grains de la substance dure avec laquelle on le raye compriment le métal au fond des sillons, ce qui augmente sa densité. M. Knoblauch a confirmé cette explication par diverses expériences. Par exemple, deux lames de cuivre l'une rayée, l'autre polie avaient produit sur le thermo-multiplicateur des déviations de 48° et de 29°; ayant déposé une légère couche de cuivre sur les deux lames, par la galvanoplastie, ce qui mettait les deux surfaces dans les mêmes conditions de densité, elles produisirent des déviations presque égales; 49°, 25 et 51°, 5.

900. Influence de l'épaisseur de la couche superficielle. — Les métaux appliqués en feuilles extrêmement minces donnent toujours le même rayonnement que des plaques épaisses; mais il n'en faudrait pas conclure que l'épaisseur de ces feuilles n'a aucune influence, car le pouvoir rayonnant des métaux est si faible que les différences peuvent échapper à l'observation; d'un autre côté, l'on trouve des substances chez lesquelles l'influence de l'épaisseur de la couche superficielle est évidente. Leslie ayant étendu sur deux faces d'un vase cubique, des couches très-minces de colle; la première face, qui n'avait reçu qu'une seule couche, fit marcher le thermomètre placé au foyer du miroir de son appareil, de 21°, 11; et l'autre qui en avait reçu quatre le fit marcher de 30°. En augmentant le nombre des couches, le rayonnement augmenta encore, jusqu'à ce que l'épaisseur de la couche totale fût de 0^{mm},02 à 0^{mm},04, suivant les substances appliquées. Un plus grand nombre de couches ne changea plus rien au résultat¹. Une légère couche d'huile d'olive fit marcher le thermomètre focal

¹ Pour calculer approximativement l'épaisseur du vernis, on pèse une lame sur laquelle on applique le même nombre de couches que sur le cube. On obtient ainsi facilement le poids de

de 28°, et en augmentant le nombre de couches l'effet augmenta aussi, jusqu'à 32°, 77. La gomme, la résine, que l'on peut dissoudre dans l'alcool, de manière à les appliquer en couches extrêmement minces, donnent des résultats semblables.

Melloni et M. Knoblauch ont confirmé ces faits au moyen du thermo-multipliateur. En face de l'une des bases de la pile thermo-électrique, était placé un cube plein d'eau chaude, dont une des faces était recouverte successivement de plusieurs couches de vernis. Melloni a reconnu aussi que des feuilles d'or d'épaisseur différente, appliquées sur un cube de verre, diminuent toutes le pouvoir émissif, de la même quantité.

900 bis. Hypothèse du rayonnement particulière.— Il semble résulter de ce qui précède que la chaleur rayonnante part d'une certaine profondeur au-dessous de la surface, comme l'a admis Fourier. Quand l'épaisseur de la couche superficielle est très-faible, les rayons partent des molécules du métal sur lequel cette couche est appliquée, en même temps que de celles de l'enduit. Plus l'épaisseur de ce dernier est grande, moins il y a de molécules métalliques en action; et le pouvoir émissif du métal étant moindre que celui du vernis, l'effet va en augmentant en même temps que l'épaisseur de ce dernier, jusqu'à ce que cette épaisseur soit assez grande pour que les rayons qui partiraient de la plaque métallique soient tous interceptés par les molécules de vernis.

Ces faits s'expliquent en admettant que chaque particule d'un corps solide rayonne dans toutes les directions avec une intensité qui dépend de sa température et peut-être aussi de sa nature. Une partie de ces rayons peut passer au-dehors quand la particule est assez près de la surface, pour que les particules qui en sont encore moins éloignées ne les interceptent pas. Plus la particule est placée profondément, moins elle laisse échapper au-dehors de la chaleur qu'elle rayonne dans tous les sens. Telle est l'hypothèse du rayonnement particulière, due à Laplace.

Il résulte de là que les corps les plus denses doivent, toutes choses égales d'ailleurs, avoir le plus faible pouvoir émissif, ce qui a lieu en effet (896) et que, si l'on augmente la densité d'un corps, on doit diminuer par là son pouvoir; ce qui résulte aussi des expériences faites sur les métaux, écrouis ou non (899), et sur l'argent bruni, qui rayonne moins que l'argent déposé chimiquement (897). Le platine incandescent rayonne presque deux fois plus quand il est *platiné*, c'est-à-dire recouvert de poudre de platine, comme l'a constaté Magnus, sur deux lames de même grandeur rendues incandescentes dans la flamme pâle d'un bec de Bunsen, et rayonnant également avant que l'une d'elles eût été platinée¹. Après cette opération, les flux des deux lames passent en même proportion à travers la plupart des plaques diathermanes; mais inégalement à travers des

la couche de vernis, d'où l'on déduit le volume, en divisant le poids par la densité de la substance solide. L'épaisseur est alors la hauteur d'un prisme droit ayant pour base la surface de la lame.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. VI, p. 441.

plaques d'alun et de copal. Magnus, ayant décomposé les rayons au moyen d'un prisme de sel gemme, et étudié les intensités aux divers points des deux spectres, au moyen d'une pile linéaire mobile (883), trouva que ces spectres avaient même longueur, ce qui indique que la poudre de platine n'introduit pas de rayons de nouvelle thermochrèse, et que les rayons obscurs sont ceux dont l'intensité est le plus augmentée. La position du maximum, qui se trouve dans la partie obscure au-delà du rouge, est à peu près la même dans les deux spectres.

On voit que les substances les plus *athermanes* doivent être *diathermanes* sous des épaisseurs très-petites. C'est en effet ce qui a lieu, même pour les métaux les plus denses. M. Knoblauch a vu qu'une feuille d'or interposée sur le trajet d'un faisceau de chaleur n'empêchait pas l'aiguille du thermo-multipliateur de dévier de 33°, 4°, 1, suivant l'épaisseur du métal. De l'argent, du platine précipités sur une lame de verre ont donné des résultats analogues. Les rayons ne passent pas à travers des trous ou des fissures du métal, car ils changent de *thermochrèse* en le traversant; en effet, la chaleur qui a traversé l'or est absorbée en proportion autre que la chaleur directe, par des lames de verre coloré. Quand l'épaisseur de l'or augmente, la proportion de chaleur absorbée par un verre rouge ou jaune va en augmentant, tandis qu'elle va en diminuant avec les verres bleus ou verts. On sait que les feuilles d'or laissent aussi passer la lumière, qui prend alors un teinte verdâtre. L'argent donne, avec la chaleur, des résultats analogues à ceux de l'or. Le platine paraît *athermochroïque*¹.

901. Influence de l'état physique et chimique. — Melloni, en rapprochant tous ces faits, avait pensé que le pouvoir émissif ne dépendait pas de la nature de la substance, mais seulement de la profondeur de la couche superficielle de molécules lançant des rayons au dehors; de sorte que, si cette couche avait toujours la même épaisseur, tous les corps présenteraient le même pouvoir émissif. Cette hypothèse, dans laquelle on attribue toute l'influence à l'état physique de la couche superficielle, est ingénieuse; mais nous avons vu quel rôle important joue la nature de la source sur le caractère des radiations (875), combien est grande l'absorption par les lames de même nature chimique que les corps qui émettent les rayons, et enfin que l'état liquide ou gazeux d'une même substance ne modifie qu'à peine son pouvoir émissif (892). Des expériences de MM. Masson et Courtépée, qui ont trouvé, sur 20 matières différentes, que les corps réduits en poudre impalpable ont le même pouvoir émissif que le noir de fumée², semblent confirmer l'hypothèse de Melloni. Mais le procédé employé comporte une cause d'erreur importante: les poudres, obtenues par précipitation chimique, étaient délayées dans de l'eau contenant un peu de colle de peau, et appliquées sur un vase cubique à 100°. Après la dessiccation, chaque particule était donc enveloppée d'une sorte de vernis de colle qui constituait

¹ *Annales de Poggendorff* (1857), et *Bibl. de Genève* (arch. des sc., 1858), t. II, p. 22.

² *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXV, p. 936.

en réalité la couche rayonnante, et comme le pouvoir émissif de la colle diffère à peine de celui du noir de fumée, tous les résultats devaient être très-rapprochés de ceux que donne cette dernière substance.

M. Tyndall a repris ces expériences en faisant adhérer les poudres au moyen du soufre. Une dissolution de ce corps dans le sulfure de carbone était étendue sur une face horizontale du cube, sur laquelle était ensuite tamisée une couche de poudre assez épaisse pour que le ciment de soufre ne recouvrit pas les particules superficielles. — D'autres fois, l'adhérence des poudres était obtenue au moyen de l'électricité, suivant une idée de M. Duppa. Le cube, placé sur un support isolant, était électrisé, puis déchargé, après avoir reçu la poudre, qui restait adhérente sans être liée par une matière étrangère.

Ces deux procédés ont donné les mêmes rapports entre les pouvoirs émissifs des diverses poudres; seulement les valeurs absolues des radiations étaient plus fortes quand on employait le soufre, dont le pouvoir émissif est assez grand. Voici quelques-uns des nombreux résultats publiés par M. Tyndall, en employant le soufre :

Noir de fumée.	84,0	Platine noir.	59,0
Oxyde noir de fer.	81,7	Chlorure d'argent, noir.	58,6
Carbonate de zinc.	77,7	Iodure de mercure.	46,6
Sulfate de baryte.	74,6	Bi-iodure de mercure.	39,7
Carbonate de chaux.	70,2	Sel gemme.	35,3
Sucre	70,0	Chlorure d'argent, blanc.	32,8

On voit combien différent les pouvoirs émissifs des diverses substances réduites en poudre fine. L'énorme différence entre les résultats donnés par le chlorure d'argent, blanc ou décomposé par la lumière, montre bien l'influence de l'état chimique. On voit aussi que la couleur n'a pas d'influence; le sel et le sucre, le noir de fumée et le noir de platine, le chlorure d'argent blanc et le carbonate de zinc, l'oxyde rouge de plomb et le bi-iodure de mercure, qui ont deux à deux la même couleur, donnent des radiations très-différentes. M. Tyndall a remarqué, en outre, que les thermochromes des rayons émis par les diverses poudres à 100°, ne sont pas généralement les mêmes, et que le sel gemme n'est pas tout à fait athermochromique, car il absorbe des proportions faibles et un peu différentes de ces divers rayons.

902. Pouvoir émissif des gaz. — Les gaz ont été regardés pendant longtemps comme à peu près dépourvus de la faculté de rayonner. Mais, s'il en est ainsi de l'air et des gaz simples permanents; si la flamme de l'hydrogène, dont la température est si élevée, n'émet que des rayons très-faibles; il n'en est plus de même des gaz composés et des vapeurs, qui absorbent en grande proportion les rayons qui les pénètrent, et rayonnent avec force, comme nous l'avons vu plus haut (867). Ici, les rayons partent d'une profondeur notable de la masse gazeuse échauffée, et d'autant plus grande que le gaz est plus diathermane; tandis que

chez les solides l'épaisseur de la couche qui émet des rayons au dehors est à peine appréciable (900).

Les flammes du gaz d'éclairage, des lampes, des bougies, doivent une grande partie de leur rayonnement aux poussières de charbon incandescent qu'elles contiennent, et qui leur donnent leur éclat. La présence de ces poussières se prouve en plongeant dans la flamme, un corps froid sur lequel elles se déposent sous forme de *noir de fumée*.

II. Pouvoir réflecteur

903. Comparaison des pouvoirs réflecteurs. — Quand des rayons de chaleur rencontrent un corps, une partie est réfléchié et l'autre passe au delà de la surface, soit pour être absor-

bée et échauffer le corps, soit pour le traverser s'il est diathermane. On appelle *pouvoir réflecteur* ou *réflexibilité* d'un corps, la faculté qu'il possède de renvoyer une partie plus ou moins grande de la chaleur incidente. Scheele avait reconnu une différence dans le pouvoir réflecteur des différentes substances. Boyle, ayant fait un

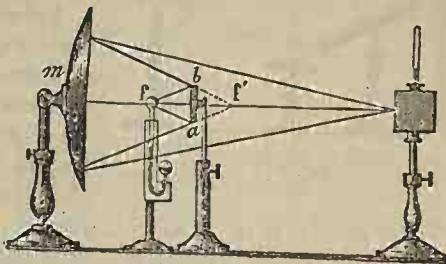


Fig. 662.

grand miroir sphérique de marbre noir, ne put enflammer du bois à son foyer, résultat qu'il obtenait facilement avec un miroir de métal beaucoup plus petit.

Leslie a fait beaucoup d'expériences pour comparer les *pouvoirs réflecteurs* des différents corps. D'abord, il recouvrait successivement le miroir de son appareil (895) des différentes substances qu'il voulait comparer, et observait les effets produits sur le thermomètre focal, par une même source de chaleur. Ce moyen est dispendieux et incommode. Leslie en a employé un autre : les substances à comparer sont appliquées sur un disque *ab* (fig. 662), que l'on dispose perpendiculairement à l'axe du miroir *m*, entre ce dernier et le foyer conjugué *f'* du corps rayonnant. D'après les lois de la réflexion, il est facile de voir que les rayons qui se réfléchissent sur la surface *ab* vont se réunir en un point *f* symétrique du point *f'* par rapport à cette surface. On place en *f* l'une des boules d'un thermoscope, et quand l'instrument ne varie plus, l'excès de température de cette boule est proportionnel à la quantité de chaleur qu'elle reçoit, et par conséquent à celle que réfléchit la plaque *ab*. Les excès sont donc entre eux comme les pouvoirs réflecteurs, en supposant que la source et les conditions des différentes parties de l'appareil restent les mêmes dans toutes les expériences.

En représentant par 100 le pouvoir réflecteur du *laiton poli*, Leslie a trouvé les résultats suivants :

Laiton	100	Plomb	60
Argent	90	Étain mouillé de mercure	10
Étain en feuilles	85	Verre	10
Étain plané	80	Verre enduit de cire ou d'huile	5
Acier	70	Noir de fumée	0

On voit que le noir de fumée ne réfléchit pas sensiblement de chaleur, et que les autres corps sont rangés dans un ordre inverse de celui qui correspond aux pouvoirs émissifs (895). — Ces nombres ne sont pas aussi absolus que le croyait

Leslie, car ils peuvent dépendre, pour un même disque, de la nature du flux calorifique envoyé par la source.

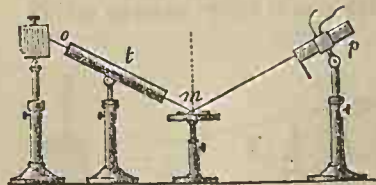


Fig. 663.

Melloni et Nobili ont appliqué le thermo-multiplicateur à la comparaison des pouvoirs réflecteurs. La plaque réfléchissante était disposée horizontalement en *m* (fig. 663), ce qui permettait d'opérer sur des liquides, et les rayons incidents étaient dirigés à travers un tube

de carton noirci *t*, et reçus, après la réflexion, sur une des faces de la pile *p*, inclinée convenablement. Nobili et Melloni employaient la chaleur de la main appliquée à l'ouverture *o* du tube *t*; après avoir constaté que sa température est sensiblement constante pendant plusieurs heures, quand on se trouve dans de bonnes conditions de santé. Ils ont trouvé, par cette méthode, que le mercure est le meilleur réflecteur de la chaleur; puis viennent les autres métaux, dans l'ordre assigné par Leslie.

904. Influence de l'épaisseur de la couche superficielle. — Leslie, ayant appliqué des couches de vernis sur la surface du miroir sphérique de son appareil, reconnut que la proportion de chaleur réfléchie diminuait à mesure que le nombre des couches augmentait, jusqu'à ce que l'épaisseur atteignit 0^{mm},25; alors les résultats furent constants. Par exemple, Leslie a trouvé que l'effet sur le thermomètre était, avec la colle de poisson, de

127°, 98°, 93°, 87°, 61°, 39°, 29°, 21°, 15°;

quand l'épaisseur de la couche était, en millièmes de millimètres,

0, 0,06, 0,25, 0,50, 1,35, 2,7, 5,4, 13,5, 25.

On explique ce résultat en admettant que la réflexion se fait, non-seulement

sur les molécules superficielles du miroir, mais encore sur celles qui sont au-dessous jusqu'à une certaine profondeur, les rayons obliques traversant les espaces inter-moléculaires pour venir rencontrer les molécules profondes et se réfléchir contre elles. On remarque que la limite d'épaisseur est à peu près la même que celle qui a été trouvée pour le pouvoir émissif (900).

905. Proportion de chaleur réfléchie sur les corps diathermanes. —

Les méthodes qui précèdent ne donnent pas le rapport entre les quantités de chaleur incidente et réfléchie. Melloni résout la question de la manière suivante pour les substances diathermanes ¹. Supposons d'abord qu'il s'agisse du sel gemme qui n'absorbe pas sensiblement de chaleur; les quantités réfléchies sur les deux faces forment un total de 0,077, comme nous l'avons vu (866). Pour faire la part de chacune d'elles, soit R la proportion réfléchie par la face d'entrée; 1 — R sera la quantité qui pénètre et arrive à la face de sortie. Supposons que celle-ci réfléchisse la même proportion R de la chaleur qu'elle reçoit, elle réfléchira R (1 — R). En ajoutant à ces deux quantités réfléchies la quantité transmise 0,923, on devra trouver la quantité totale 1. On aura donc

$$R + R(1 - R) + 0,923 = 1, \quad \text{d'où} \quad R = 1 \pm \sqrt{0,923} = 1 \pm 0,9607.$$

Le signe (+) ne peut convenir, R ne pouvant être plus grand que 1. En prenant le signe (—), on trouve $R = 0,0393$. Pour obtenir la proportion réfléchie sur la face de sortie, on retranche la valeur de R de la perte totale 0,077, ce qui donne 0,0377.

La chaleur réfléchie à la seconde surface revient normalement vers la première, s'y réfléchit en partie et retourne à la seconde, où une nouvelle portion est réfléchie pour venir rencontrer une seconde fois la première face... Il résulte de là que le faisceau transmis est augmenté de rayons qui ont subi 2, 4, 6... réflexions; mais Melloni a démontré que la chaleur qui sort après avoir éprouvé plusieurs réflexions, est insensible. En effet, si l'on incline un peu une lame épaisse, les rayons réfléchis en dedans sont rejetés latéralement, ne rencontrent plus la pile, et cependant l'effet produit sur le rhéomètre reste le même.

Supposons maintenant que l'on ait affaire à une substance autre que le sel gemme. Melloni fait d'abord remarquer qu'une petite différence dans l'épaisseur d'une lame diathermane ne produit pas de changement appréciable dans la quantité de chaleur transmise, ce qui prouve qu'une couche mince, de 0^{mm},5 par exemple, ne produit pas d'absorption sensible. Si donc l'on détache cette petite couche de la lame, et qu'on la place en avant et parallèlement, la perte nouvelle qui résultera de cette séparation devra être attribuée entièrement aux réflexions sur les deux faces de la lame mince. En opérant ainsi, on retrouve sensiblement le même nombre 0,077. Il n'y a donc que de faibles différences entre les pouvoirs réflecteurs des divers corps diathermanes également polis.

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LX, p. 402.

906. Réflexion sur les corps athermanes. — Melloni, en partant de ces faits, a pu évaluer la proportion de chaleur réfléchiée par les corps *athermanes*. Il a d'abord constaté que la proportion de chaleur qui traverse une lame de sel gemme, et par conséquent celle qui est réfléchiée, reste la même, quel que soit l'angle d'incidence quand il ne dépasse pas 30° . Cela posé, on fait tomber des rayons de chaleur sur une grosse plaque de *verre* ou de *crystal de roche*, sous l'incidence de 25° à 30° , et l'on note l'effet produit sur la pile par les rayons réfléchis à la première surface. On remplace ensuite cette plaque par la lame dont on veut évaluer le pouvoir réflecteur; on obtient un autre effet. Le rapport entre ces deux effets, multiplié par 0,0393, qui représente la proportion de chaleur réfléchiée par le verre, donne la proportion réfléchiée par le corps.

MM. de Provostaye et P. Desains ont évalué la proportion de chaleur que réfléchissent certains métaux, par une méthode plus directe¹. La lame réfléchissante *m* (fig. 664), est fixée

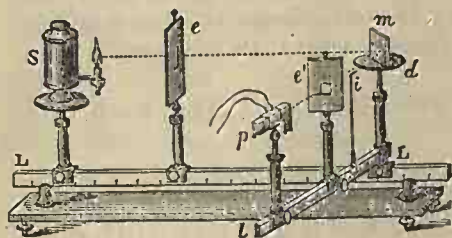


Fig. 664.

verticalement au-dessus de l'axe d'articulation des règles horizontales LL, Ll. La première soutient la lampe de Locatelli, *s*, et un écran, *e*, muni d'une ouverture verticale dont on peut faire varier la largeur. La règle Ll porte la pile thermo-électrique *p*, et un écran *e'* percé d'une ouverture égale à la base de la pile. On enlève d'abord la lame

m, on place la règle Ll dans la direction de LL, et l'on observe quelle est la déviation produite sur l'aiguille du rhéomètre. On place ensuite la lame *m*, et au moyen du plateau fixe divisé, *d*, et de l'index *i*, on dirige celle-ci de manière que le faisceau de chaleur, après s'être réfléchi sur sa surface *m*, tombe sur la base de la pile. On obtient une nouvelle déviation dont le rapport à la première est égal au rapport cherché des quantités de chaleur émise et réfléchiée. Pour plus de sûreté, on mesure de nouveau la déviation produite par les rayons directs, et l'on prend la moyenne entre cette déviation et celle qu'on a observée en premier lieu. Enfin, comme vérification, on met deux lames l'une après l'autre sur le support *d*, et l'on compare les effets produits, qui doivent être dans le rapport des pouvoirs réflecteurs mesurés séparément. Les principaux résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous (907).

Tous les métaux cités avaient reçu l'action du marteau. Des expériences faites avec de l'or poli au marteau, ou déposé chimiquement sur une plaque d'acier; de l'argent fondu puis poli, ou martelé, ou déposé sur du cuivre; du cuivre martelé ou déposé sur du fer; du laiton écouli ou coulé; du platine en plaque ou

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXII, p. 384.

déposé chimiquement, ont prouvé que le pouvoir réflecteur des métaux, à peu près également polis, ne dépend que très-peu de la manière dont on les a travaillés.

907. Variation avec l'incidence. — Considérons d'abord les corps *diathermanes*. MM. de la Provostaye et P. Desains ont reconnu sur le verre (fig. 664) que le pouvoir réflecteur augmente rapidement avec l'angle d'incidence. Nous verrons dans l'optique, que la lumière suit les mêmes lois, et que l'intensité *R* du rayon réfléchi, pour l'angle d'incidence *i* et l'angle de réfraction *r*, l'intensité du rayon incident étant égale à 1, est donnée par la formule de Fresnel :

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2 (i - r)}{\sin^2 (i + r)} + \frac{\tan^2 (i - r)}{\tan^2 (i + r)} \right).$$

Si l'on compare les intensités lumineuses calculées par cette formule pour le verre avec celles que l'expérience donne pour les rayons calorifiques, on trouve qu'ils sont égaux; preuve nouvelle de l'identité des radiations lumineuses et calorifiques (889). Remarquons que les valeurs de *R* varient, pour la lumière comme pour la chaleur, avec celles de *r*, c'est-à-dire avec la réfrangibilité des divers rayons dont le mélange forme le faisceau incident; mais les différences dans les déviations, sont très-petites et négligeables. Si l'on voulait en tenir compte, il suffirait d'opérer sur des rayons simples pris dans le spectre.

Cas des métaux. — Les métaux se comportent tout autrement que le verre; leur pouvoir réflecteur reste à peu près constant jusqu'à l'incidence de 70°, à partir de laquelle il diminue. Vers 80°, il est à peu près égal aux 0,94 de sa valeur sous les petites incidences. — On a admis longtemps que le pouvoir réflecteur des métaux ne dépendait pas de la nature des rayons. MM. de la Provostaye et P. Desains ont prouvé qu'il en est autrement pour certains métaux. Le tableau ci-dessous contient les résultats qu'ils ont obtenus, l'angle d'incidence étant de 45° :

MÉTAUX	PROPORTION RÉFLÉCHIE		
	LAMPE de Locatelli.	RAYONS solaires.	LAMPE à alcool salé.
Plaqué d'argent poli.....	0,97	0,92	»
Or.....	0,95	0,87	»
Laiton, cuivre.....	0,93	»	0,945
Métal des miroirs, poli.....	0,86	0,64	»
Etain.....	0,85	0,60	0,86
Platine poli.....	0,80	»	»
Acier.....	0,83	0,60	0,88
Zinc.....	0,81	»	»
Fer.....	0,77	»	»
Fonte de fer.....	0,74 à 0,75	»	»

L'inégalité dans la réflexion, des divers flux vient de leur différente composition, certaines espèces de rayons étant plus facilement réfléchies que d'autres par certains métaux.

MM. de la Provostaye et P. Desains ont constaté directement ce fait sur les rayons simples d'un spectre solaire¹. Les proportions de chaleur réfléchies pour chaque espèce de rayon, ont été trouvées sensiblement égales aux proportions réfléchies des rayons *lumineux* de même réfrangibilité; ce qui montre une fois de plus l'identité de la chaleur et de la lumière coexistant dans le même rayon. Ce résultat se voit dans le tableau qui suit. Les nombres relatifs aux rayons lumineux ont été trouvés par M. Jamin, dans un travail sur la réflexion métallique dont nous parlerons dans l'optique; l'incidence était de 70°.

MÉTAUX	VERT DU SPECTRE		ROUGE DU SPECTRE		CHALEUR obscure.
	Chaleur.	Lumière.	Chaleur.	Lumière.	
Platine	0,59	»	0,60	»	»
Zinc	0,65	0,62	0,60	58	»
Métal des miroirs..	0,58	0,62	0,65	69	»
Laiton.....	0,63	0,62	0,75	72	0,90

Tous les métaux réfléchissent mieux la chaleur obscure que la chaleur lumineuse. Par exemple, l'acier réfléchit 0,75 des rayons obscurs pris à une distance de la bande rouge du spectre égale à l'espace qui la sépare du bleu; tandis qu'il ne réfléchit que 0,60 des rayons rouges. Certains rayons obscurs sont réfléchis par le laiton dans la proportion de 0,90.

Le verre se comportant comme un corps opaque, par rapport aux rayons obscurs (875), on pouvait prévoir qu'il réfléchirait mieux les rayons d'une source à 150° que ceux d'une source lumineuse; c'est, en effet, ce qui a lieu.

On voit aussi que si l'on opère avec les rayons solaires, le faisceau réfléchi n'aura pas la même *thermochrôse* que le faisceau incident, comme le montre l'expérience. La lumière présente un phénomène analogue; et c'est pour cela que l'or est jaune; le cuivre rouge, l'aluminium, bleuâtre.

908. Pouvoir diffusif. — La proportion de chaleur réfléchie par diffusion dépend de la direction des rayons incidents, de leur nature et de l'inclinaison des rayons diffus. MM. de la Provostaye et P. Desains ont cherché les lois de ces phénomènes et sont arrivés à plusieurs résultats importants².

Incidence normale. — Les effets à observer étant très-faibles, on a employé les rayons solaires concentrés par une lentille de 10^{cm} de diamètre. Un peu

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXX, p. 276.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIV, p. 192.

au delà du foyer, le faisceau passait par l'ouverture d'un écran, et tombait normalement sur la plaque dépolie. Le faisceau réfléchi avec diffusion était reçu par une seconde lentille, qui projetait sur la base de la pile du thermo-multipliateur l'image de la partie de la plaque frappée par les rayons solaires. La disposition générale de l'appareil était celle de la figure 664.

On a trouvé, par cette méthode, que, pour les substances granuleuses (*céruse, cinabre, chromate de plomb, soufre lavé*), l'intensité D des rayons diffus augmente proportionnellement au *cosinus* de l'angle d de ces rayons avec la normale. On a donc la formule

$$D = \frac{c \cos d}{I}, \quad [1]$$

dans laquelle I est l'intensité des rayons incidents, et c une constante qui dépend de la substance réfléchissante. Jusqu'à 25° à 30° , la valeur de D ne varie pas sensiblement, ce qui permet d'évaluer la diffusion normale, qu'on ne peut mesurer directement parce que la pile intercepterait le faisceau incident.

L'argent en poudre, le platine platiné, le verre noir dépoli, le noir de fumée, ne suivent pas la loi du *cosinus*.

Quantité totale de chaleur diffusée. — Cette quantité se compare à la quantité de chaleur incidente; mais comme celle-ci est trop intense, on la mesure après l'avoir affaiblie par la réflexion sur un verre noir, dans un rapport donné par la formule du n° 905. On fait ensuite la somme des rayons diffusés dans toutes les directions, en divisant la sphère ayant son centre au milieu de la plaque, et ayant pour rayon la distance de ce point à la pile, en zones très-étroites, par des plans parallèles à cette plaque. La chaleur reçue sur l'unité de surface de chaque zone se déduit de la formule [1], quand on connaît la valeur de d qui lui correspond, et quand la constante c a été déterminée par une expérience directe. On a trouvé ainsi, pour les quantités totales de rayons diffusés, sur 100 tombant normalement,

<i>Céruse</i>	<i>Chromate de plomb</i>	<i>Cinabre</i>	<i>Argent en poudre</i>
82	66	48	76

L'argent en poudre ne suivant pas la loi du *cosinus*, le nombre qui lui correspond a été calculé par approximation.

Incidence oblique. — La diffusion totale et la distribution des rayons diffus autour de la normale dépendent de l'angle d'incidence. Cependant, pour les substances qui suivent la loi du *cosinus*, les résultats restent sensiblement les mêmes tant que l'angle d'incidence ne dépasse pas 30° . Au delà et dans le plan d'incidence, la diffusion maximum a lieu suivant la normale; et, en faisant croître l'angle d'incidence et prenant toujours l'angle de diffusion égal, on trouve un minimum. L'argent en poudre, le platine platiné, donnent un maximum, dans la direction des rayons réfléchis spéculairement.

Nous ajouterons que M. Knoblauch ayant étudié les rayons diffus, sous des incidences variant de 2° à 80° , a vu que l'or, l'argent, le cuivre, le laiton, dépolis, donnent, pour les grands angles, des rayons diffus qui passent plus facilement à travers un verre jaune que ceux qui sont obtenus sous les incidences voisines de la normale. Ces métaux se rapprochent à cet égard des substances mates, dont la couleur varie quand on les regarde plus ou moins obliquement.

On voit que les lois de la diffusion sont loin d'être complètement connues; elles dépendent du reste de l'état de polarisation (889) des rayons calorifiques, et MM. de la Provostaye et Desains, dans les expériences que nous avons citées, ont particulièrement étudié les phénomènes à ce point de vue.

III. Pouvoir absorbant.

909. Comparaison des pouvoirs absorbants. — La facilité plus ou moins grande que possèdent les corps de laisser passer par leur surface une partie de la chaleur incidente, pour se l'approprier et s'échauffer, constitue le *pouvoir absorbant* ou *admissif* de ces corps; on le mesure par le rapport entre la quantité de chaleur reçue et celle que le corps retient. Ce pouvoir réside dans la couche superficielle. Musschenbroeck avait remarqué que la terre noire des marais, frappée par le soleil, s'échauffe plus vite que le sable blanc des dunes, et que des morceaux de bois recouverts de différentes matières s'échauffent inégalement, les noirs, plus que les autres. Scheele vit aussi qu'un miroir sphérique, présenté à l'ouverture d'un poêle, s'échauffait rapidement quand sa surface était noircie.

Pour comparer les pouvoirs absorbants des différents corps, Leslie plaçait au foyer du miroir de son appareil, le réservoir d'un thermomètre recouvert successivement des diverses substances à essayer. Plus la température indiquée par le thermomètre devenu stationnaire était élevée, plus le pouvoir absorbant était considérable. Leslie a trouvé par ce moyen que les rayons émis par une boîte d'étain noir remplie d'eau bouillante, faisaient monter le thermomètre focal à 10° , quand la boule était nue, et à 2° seulement, quand elle était recouverte d'une feuille d'étain.

La méthode de Leslie ne peut donner les rapports entre les pouvoirs absorbants. En effet, le thermomètre devient stationnaire quand il perd par le rayonnement et le contact de l'air autant de chaleur qu'il en reçoit; mais ses pertes ne sont pas, dans les différents cas, proportionnelles aux excès de température sur l'air, puisque la nature de la surface ne restant pas la même, le pouvoir émissif change d'une expérience à l'autre.

Melloni a procédé par une autre méthode: il plaçait en face de sa pile, des disques de cuivre mince noircis du côté de celle-ci, et recouverts des substances à essayer, du côté opposé, qui recevait les rayons de la source de chaleur. Cette méthode ne donne pas les rapports absolus des pouvoirs absorbants, par la même

raison que pour celle de Leslie; aussi Melloni ne l'a-t-il donnée que comme propre à faire connaître, de deux substances quelle est celle qui a le plus grand pouvoir absorbant. Voici quelques-uns des résultats trouvés, en prenant pour source un vase cubique à 100°.

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Céruse.	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91	Métaux.	13

L'ordre de cette liste est le même que pour les pouvoirs émissifs. Nous verrons qu'il peut changer quand on emploie d'autres sources.

Ayant comparé les pouvoirs absorbants de différents tissus blancs collés sur les disques, Nobili et Melloni ont trouvé l'ordre suivant : Soie, laine, coton, lin et chanvre, la soie ayant le plus grand pouvoir. Pour les métaux, ils ont trouvé la série : plomb et étain, fer, acier, or, argent, cuivre; ils font remarquer que cet ordre est à peu près l'inverse de celui des pouvoirs de conduire la chaleur (950). Cette remarque s'applique également aux tissus. — Pour montrer combien est faible le pouvoir absorbant des métaux polis, M. Tyndall recouvre d'une couche d'iode rouge de mercure le revers d'une feuille de papier doré, sur la dorure duquel il applique des morceaux de papier blanc formant divers dessins et qu'il expose ensuite aux rayons d'une source intense. L'iode placé du côté opposé reste rouge dans les parties qui correspondent à la dorure restée à nu, et devient jaune par l'action de la chaleur, partout où le papier blanc a absorbé fortement les rayons.

Franklin ayant posé des morceaux d'étoffe de différentes couleurs sur de la neige exposée au soleil, les vit s'enfoncer à diverses profondeurs en la fondant, et crut pouvoir en conclure que les corps de couleur sombre absorbent mieux la chaleur que les autres. Mais, on a reconnu depuis, que la couleur n'a pas de rapport avec le pouvoir absorbant. M. Tyndall ayant recouvert l'une des boules d'un thermomètre différentiel de poudre d'alun, et l'autre de poudre noire d'iode, a vu la première absorber le plus rapidement les rayons émis par un morceau de fer rouge placé à la même distance de ces boules. Le soufre, le phosphore amorphe presque noir, ne s'enflamment pas au foyer d'une lentille concentrant les rayons de la lumière électrique, foyer auquel le sucre fond et s'enflamme rapidement, et où le platine devient rouge-blanc presque instantanément.

910. Influence du poli. — Leslie avait trouvé qu'en rayant la surface d'une lame métallique, on augmentait son pouvoir absorbant. Melloni a reconnu que les différences proviennent, comme pour le pouvoir émissif (899), de ce que les raies mettent à découvert des parties moins denses que la couche superficielle écaillée par le laminage. Il prit deux disques de fer-blanc noircis du côté tourné vers la pile et dont l'un, battu à petits coups avec un marteau, était couvert de bosselures, et dont l'autre était resté à l'état naturel. La chaleur provenant

d'une même source échauffa davantage ce dernier, quoiqu'il fût le plus brillant; ce qui se voyait à l'effet produit sur la pile, par la face noircie. Le pouvoir absorbant est donc diminué, comme le pouvoir émissif, par un accroissement de densité. Des lames d'or et d'argent, coulées et refroidies lentement, absorbent plus de chaleur quand elles sont polies qu'après qu'on les a rayées avec un diamant : c'est que la pointe comprime et écroute le métal au fond des raies. Les substances qui ne peuvent s'écrouter, comme le jayet, le marbre, l'ivoire, ont le même pouvoir absorbant, quand elles sont polies et quand elles sont rayées dans divers sens.

Il résulte de là, qu'en augmentant la densité d'un métal, on diminue la proportion de chaleur qu'il absorbe, et que, par conséquent, on augmente celle qu'il réfléchit. Il est donc utile d'écrouter à coups de marteau les miroirs métalliques. Dulong ayant fait construire des miroirs conjugués travaillés au tour, leur trouva beaucoup moins de puissance qu'à deux petits miroirs travaillés au marteau; résultat facile à expliquer. Les expériences citées plus haut (906) semblent établir que la manière dont les métaux ont été travaillés n'a que très-peu d'influence sur le pouvoir réflecteur; mais une très-petite différence, inappréciable dans le faisceau calorifique de l'appareil (*fig.* 664), peut devenir très-sensible au foyer d'un large miroir sphérique.

911. Pouvoir absorbant pour les divers rayons. — La chaleur absorbée par un corps est égale à celle qu'il reçoit diminuée des quantités réfléchies spéculairement et par diffusion. Or, celles-ci varient avec la nature des rayons incidents (907), il doit en être de même de la quantité absorbée. C'est, en effet, ce qui a lieu : Melloni, ayant recouvert de noir de fumée l'une des faces de la pile thermoscopique, et l'autre face d'une autre substance, de blanc de céruse, par exemple, reconnut que des rayons venant d'une lampe de Locatelli, et ayant traversé des plaques de différentes substances, produisaient sur les deux faces des effets dont *les rapports* changeaient suivant la nature des rayons incidents. Les rayons ayant traversé l'alun sont ceux qui sont le moins absorbés par la face blanchie, l'alun, peu diathermane, ne laissant passer que les rayons les moins susceptibles d'être absorbés. Les rayons qui ont franchi un verre noir sont, au contraire, absorbés en grande proportion; c'est que le verre noir arrête les rayons calorifiques lumineux, qui sont les plus transmissibles; ceux qui restent sont donc les plus faciles à absorber. Quand la chaleur de la lampe traversait des lames de verre, alun, verre noir, sel gemme, les pouvoirs absorbants de la face blanche étaient 80, 54, 43, 84, celui du noir de fumée étant représenté par 100.

Baden-Powel, puis Melloni, ont reconnu que les pouvoirs absorbants de certaines substances varient avec la nature de la source. Melloni employait la méthode déjà indiquée (909). Le tableau suivant contient une partie des résultats qu'il a obtenus; on voit que ce sont les rayons obscurs qui, généralement, sont le plus absorbés, comme dans le cas de la transmission à travers les lames (875).

L'absorption du noir de fumée, étant 100 pour chaque source, les nombres restent les mêmes, pour une même source, quelle que soit la distance de la pile.

SUBSTANCES	LAMPE d'Argent.	LAMPE de Locatelli.	PLATINE Incandescent.	CUIVRE à 400°.	CUIVRE à 100°.
Noir de fumée....	100	100	100	100	100
Encre de Chine...	100	96	95	87	85
Céruse.....	24	53	56	89	100
Colle de poisson...	45	52	54	64	91
Gomme laque....	30	43	47	70	72
Surface métallique.	17	14	13,5	13	13

912. Constance du pouvoir absorbant du noir de fumée. — Ici se présente une question importante; le noir de fumée absorbe-t-il également toute espèce de rayons? Il faudrait, pour le savoir, exposer la face noircie de la pile à des rayonnements de même intensité émanant de différentes sources; mais comment reconnaître l'égalité d'intensité, puisque l'on ne sait pas si les rayons de différente espèce sont absorbés en même proportion? Melloni emploie alors la méthode du n° 886¹. L'expérience montre que les effets des deux faces du disque noirci des deux côtés, sont toujours dans le même rapport, $\frac{5}{6}$ environ. On en doit conclure que le noir de fumée absorbe également toutes les espèces de rayons, faculté précieuse que l'on peut mettre à côté de celle du sel gemme, relative à la transmission, et sans laquelle on ne pourrait comparer des intensités de flux calorifiques de nature différente. Il faut donc recouvrir les thermoscopes et thermomètres de noir de fumée, quand on veut comparer des radiations de sources différentes; autrement les indications dépendraient du pouvoir absorbant et diathermane des surfaces sur lesquelles tomberaient les rayons, et ces indications ne seraient plus proportionnelles aux intensités des radiations, quand celles-ci seraient de nature différente. La plupart des métaux se comportent comme le noir de fumée; ils absorbent également toutes les espèces de rayons. Car si l'on met devant la pile un disque noir des deux côtés, puis un disque métallique noirci du côté de la pile, et bien décapé et dépoli du côté de la source, on trouve le même rapport entre les effets produits, quelle que soit l'origine des rayons. Ce résultat devait se prévoir pour les métaux *leucothermiques*, qui réfléchissent également toutes les espèces de rayons; mais il ne peut être qu'approximatif pour ceux qui sont *thermochoïques*.

913. Rapports des pouvoirs absorbants. — Les méthodes que nous avons indiquées ne donnent pas, comme nous l'avons remarqué, les rapports entre les pouvoirs absorbants des différents corps. Pour obtenir ces rapports, MM. de la Provostaye et P. Desains ont imaginé la méthode suivante². Quand un thermomètre reçoit la chaleur d'une source, il commence par monter, puis il

¹ Annales de chimie, 2^e série, t. LXXV, p. 337.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXX, p. 431.

reste stationnaire, lorsque la chaleur qu'il reçoit pendant chaque minute est égale à celle qu'il perd par le contact de l'air et par rayonnement. Or, la chaleur perdue se mesure par la *vitesse du refroidissement* (894). Si donc le thermomètre était recouvert successivement de deux substances différentes, et si l'on évaluait les vitesses de refroidissement dans les deux cas quand ce thermomètre est devenu stationnaire, le rapport de ces vitesses serait égal à celui des pouvoirs absorbants.

Cela posé, voici comment on procède : Un thermomètre très-sensible, revêtu successivement des substances à comparer, est placé, toujours dans la même position, un peu au-delà du foyer d'une lentille, qui concentre sur sa boule les rayons du soleil ou ceux d'une lampe. Quand il est devenu stationnaire, on masque la source, et l'on détermine les vitesses de refroidissement correspondantes à cette température et aux températures voisines. Opérant de même sur d'autres substances, les rapports des vitesses pour les températures stationnaires font connaître le rapport des pouvoirs absorbants. Voici quelques résultats :

	Chaleur solaire.	Lampe d'Argent.		Chaleur solaire.	Lampe d'Argent.
Noir de platine.	»	100	Argent en poudre.	»	21
Cinabre.	»	28,5	Argent en feuilles.	7,5	»
Blanc de céruse.	49	21	Or en feuilles.	43	4

914. Proportion absorbée sous l'incidence normale. — La chaleur qui tombe sur un corps *athermane* se partage généralement en trois parties : la première, a , est absorbée, la seconde, r , est réfléchie spéculairement, et la troisième, d , réfléchie par diffusion. On a donc, en appelant 100 la chaleur incidente, $a + r + d = 100$, d'où $a = 100 - (r + d)$. Quand la substance n'a, comme les métaux polis, qu'un pouvoir diffusif très-faible, on a $a = 100 - r$, et comme r est connu (907), on peut calculer a . La valeur de r dépend de la nature des rayons incidents, il en sera donc de même de celle de a . C'est ainsi que MM. de la Provostaye et P. Desains ont obtenu les résultats suivants :

MÉTAUX	RAYONS solaire.	LAMPE à modérateur.	LAMPE de Locatelli.	LAMPE à alcool salé.	LAME DE CUIVRE à 400°.
Acier.	42	34	17,5	42	»
Métal des Miroirs.	34	30	14,5	»	»
Platine.	39	30	17	44	10,5
Zinc.	»	32	19	»	»
Étain.	»	32	15	»	»
Laiton.	»	46	7	6	5,5
Or.	13	»	4,5	»	4,5
Plaqué d'argent.	8	8	2,5	»	»

Ces valeurs restent sensiblement les mêmes sous des incidences obliques inférieures à 70° . Pour les corps opaques non métalliques, comme le verre noir, qui réfléchissent de la même manière toutes les espèces de rayons, le pouvoir absorbant ne change pas avec la source.

Dans le cas des incidences obliques, il faut remplacer r par sa valeur calculée par les moyens indiqués ci-dessus (907). Comme r augmente, en général, avec l'angle d'incidence, on voit que le pouvoir absorbant diminue quand cet angle augmente.

Quand il s'agit de substances dénuées de réflexion spéculaire, on a $r = 0$ et $a = 100 - d$; et nous avons vu comment on peut calculer d (908). On trouve ainsi les pouvoirs absorbants suivants, dans le cas de l'incidence normale.

Céruse.
48

Chromate de plomb.
34

Cinabre.
52

Argent en poudre.
24

915. Comparaison des pouvoirs émissif et absorbant. — La série des corps rangés par ordre de pouvoirs absorbants est la même que celle des mêmes corps rangés par ordre de pouvoirs émissifs. Les corps qui rayonnent le plus de chaleur sont donc aussi ceux qui en absorbent le plus. On a reconnu d'abord que les pouvoirs émissifs sont proportionnels aux pouvoirs absorbants, au moyen de l'expérience suivante, attribuée à Ritchie. On prend un thermomètre différentiel amn (fig. 665), dont les boules sont remplacées par des réservoirs cylindriques en métal, ayant leurs bases parallèles. La base n est couverte de noir de fumée, et la base a est argentée; entre les deux réservoirs a et n est placé un vase cylindrique AN de même diamètre, rempli d'eau bouillante, et dont la face N est recouverte de noir de fumée, tandis que la face A est argentée. L'expérience montre que les deux réservoirs a et n indiquent la même température quand le vase AN est à égale distance de chacun d'eux. On conclut de là que les pouvoirs émissifs du noir de fumée et de l'argent sont proportionnels à leurs pouvoirs absorbants. En effet, soient T la température du vase AN , t celle des réservoirs a et n quand ils sont stationnaires, a et n les pouvoirs absorbants de l'argent et du noir, A et N leurs pouvoirs émissifs, d les distances aN et An , et S la surface des bases des cylindres. La quantité de chaleur que reçoit la face n , de chaque point de la surface A , est proportionnelle au pouvoir émissif de cette dernière et au pouvoir absorbant de la face n , c'est-à-dire à An . Cette quantité est aussi une fonction F de la distance d , de l'étendue de la surface S , et des températures T et t . Elle est donc représentée par une expression de la forme $An \times F(S, d, T, t)$. Celle que reçoit le réservoir a est, de même, proportionnelle à Na , et dépend des quantités S, d, T, t , de la même manière. La forme de la fonction F est donc la même, et la chaleur reçue par le réservoir a , est $Na \times F(S, d, T, t)$. Les quantités

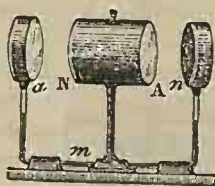


Fig. 665.

de chaleur reçues par les deux réservoirs étant égales quand le vase AN est à égale distance, on a la relation $An \times F(S, d, T, t) = Na \times F(S, d, T, t)$, ou $An = Na$; ce qu'il fallait démontrer. En remplaçant le noir de fumée et l'argent par d'autres substances, on arrive au même résultat.

Égalité des pouvoirs émissif et absorbant. — L'expérience prouve, en outre, que le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un même corps sont représentés par le même nombre. On emploie, pour le prouver, l'appareil (fig. 666) imaginé par Dulong et Petit. Un ballon de cuivre B recouvert intérieurement de noir de fumée, renferme un thermomètre T, dont la boule est au centre. La surface de ce thermomètre est revêtue de la substance dont on veut comparer les pouvoirs. On observe le thermomètre, à travers un tube de verre *t*, appuyé sur un plateau *ba* usé à l'émeri et qui s'applique exactement sur le col du ballon. Le tube *t* porte un robinet *r*, auquel est adapté un tuyau de plomb par lequel on fait le vide dans l'appareil. Le ballon B est plongé dans un bain dont on connaît la température.

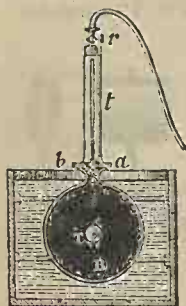


Fig. 666.

Le bain étant à 10°, on porte le thermomètre à 0°, puis on l'ajuste au col du ballon, on place le tube *t* et l'on fait le vide. Pendant ces opérations le thermomètre monte; on attend qu'il ait atteint 5°. Alors on mesure le temps qu'il met à monter de 1°. En second lieu, on entoure le ballon de glace fondante, et l'on porte le thermomètre à 10°; on l'ajuste à l'appareil, on fait le vide, et l'on observe le temps qu'il met à s'abaisser, de 5° à 4°. On trouve que ce temps est égal à celui qu'il avait employé pour monter de 1°, dans la première opération, où la différence de température était la même, mais de signe contraire. Or l'échauffement et le refroidissement ne dépendent que

du pouvoir absorbant et du pouvoir émissif du thermomètre, l'air ayant été extrait de l'appareil; de plus, la loi de Newton (894) est applicable pour d'aussi petites différences de température. La chaleur pénètre donc dans la boule du thermomètre aussi vite qu'elle s'en échappe; d'où l'on conclut l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant, du moins dans les conditions de cette expérience, c'est-à-dire dans les limites où la loi de Newton se vérifie.

Cette égalité peut encore se déduire, comme l'a remarqué Despretz, de l'équilibre de température d'un corps renfermé dans une enceinte. Ce corps prend la température de l'enceinte, et alors il doit recevoir par absorption autant de chaleur qu'il en perd par rayonnement.

Fourier a expliqué de la manière suivante l'égalité des deux pouvoirs, dans un corps dont la température est constante, quand il reçoit autant de chaleur qu'il en perd. Considérons un rayon incident dont l'intensité est *i*. Le corps en absorbe une fraction *ni* et réfléchit spéculairement ou par diffusion l'autre partie $i - ni = i(1 - n)$; de sorte que les quantités *n* et $(1 - n)$ représentent les pouvoirs absorbant et réflecteur de la couche superficielle du corps. La

température étant la même que celle de l'enceinte, un rayon qui se présente pour sortir possède aussi une intensité i ; et une partie ni seulement, égale à celle qui a été absorbée, doit sortir pour que la température du corps ne varie pas. Il y a donc une portion $i(1 - n)$ qui ne peut passer et qui est réfléchie en dedans, dans la même proportion que celle qui a été réfléchie en dehors. Ce raisonnement suppose que tous les rayons sont de même nature.

916. Comparaison des deux pouvoirs aux températures élevées. —

Les expériences par lesquelles on a prouvé l'égalité des pouvoirs émissif et absorbant n'ont été faites que jusqu'à 300°. Or nous savons que le pouvoir émissif varie au-dessus de cette température (898), et que le pouvoir absorbant change avec la nature de la source (914); on doit donc se demander si l'égalité entre les deux pouvoirs persiste dans les hautes températures. Pour le noir de fumée, qui absorbe de la même manière toutes les espèces de rayons, on peut admettre qu'il en est ainsi. Quant aux autres substances, il faudrait, d'après la théorie de Fourier (915), que la nature des rayons qui se présentent pour sortir changeât avec la température, la réflexion *intérieure* modifiant le mélange comme le ferait une réflexion *extérieure*; ce qui n'a rien d'in vraisemblable. Cependant la question est assez complexe dans certain cas. Par exemple, le blanc de céruse présente le même pouvoir émissif que le noir de fumée, et son pouvoir absorbant varie en sens inverse de son pouvoir diffusif, qui est considérable et augmente avec la température des rayons incidents (886). Il faudrait donc, pour que les deux pouvoirs fussent égaux dans les températures élevées, que le pouvoir émissif de la céruse diminuât avec la température, comme pour le borate de plomb (898). Pour que cette condition fût remplie, il suffirait d'admettre qu'il existe une diffusion intérieure soumise aux mêmes lois que la diffusion extérieure. Quoi qu'il en soit, ce point demande de nouvelles recherches.

Quand la température d'un corps n'est pas constante, c'est-à-dire quand il s'échauffe ou se refroidit, il peut se faire que l'égalité du pouvoir absorbant et du pouvoir rayonnant n'ait plus lieu. Par exemple, si l'on expose au soleil deux disques de bois identiques, recouverts, l'un de noir de fumée, l'autre de blanc de céruse, qui ont le même pouvoir émissif, le disque noir s'échauffe beaucoup plus vite que l'autre. Cela tient à la grande quantité de chaleur diffusée par la céruse, tandis que le noir de fumée n'en réfléchit qu'une quantité à peine appréciable.

Identité de la chaleur en équilibre dans les corps. — La chaleur qui a pénétré dans un corps dont la température est constante, ne présente plus de différences de qualité. Ces différences ne se manifestent que dans l'état de mouvement de la chaleur hors des corps, et ne sont que des états particuliers du mouvement vibratoire qui constitue les rayons. Lamé compare l'équilibre de la chaleur dans un corps à celui d'un liquide dans un vase; ce n'est qu'en s'écoulant par un orifice que le liquide présente des phénomènes particuliers, des vitesses variant avec la charge, et que les effets de la viscosité se manifestent.

917. Explication de divers phénomènes. — Quand il fait soleil, on

remarque que la neige fond plus vite sous les arbres et autour des buissons, que dans les endroits frappés directement par les rayons solaires. Fusinieri qui a fait, en 1838, un grand nombre d'observations sur ce sujet, a constaté que des branches de bois mort produisent le même effet que le bois vif, ce qui écarte l'idée de l'influence d'une chaleur propre aux plantes. Ces faits lui parurent tout à fait inexplicables. Melloni en a facilement rendu compte, en remarquant que les rayons émis par les branchages échauffés sont d'une autre espèce que les rayons directs du soleil, et plus facilement absorbés par la neige¹. Pour appuyer cette explication, il garnit de blanc de céruse la base de la pile du thermomultiplicateur, et fit tomber sur cette base les rayons d'une lampe concentrés par une lentille : la déviation fut de 15°. Ayant interposé tout près de la pile une feuille de papier épais, gris foncé, la déviation augmenta jusqu'à 33°,5. Les rayons moins intenses partant du papier étaient donc absorbés en plus grande proportion, étant d'une nature différente. Ayant pris pour source un verre noir émettant de la chaleur obscure, la déviation qui était de 18° à 19° pendant l'interposition du papier gris, ne fut plus que de 10° à 11° en son absence.

Pour prouver qu'il en est de la neige comme de la céruse, Melloni plaça une pile armée de ses deux tubes, entre une lampe d'Argant et une plaque de cuivre chauffée à 400°, placées à des distances telles que la déviation fût nulle. Il remplaça ensuite la pile par un tube ayant les mêmes dimensions qu'elle, partagé en deux parties égales par une cloison perpendiculaire à son axe. Dans chaque compartiment était tassée de la neige occupant le même espace que la pile thermo-électrique. La température de l'air étant de — 3°, la neige tournée du côté du cuivre à 400° se fondit beaucoup plus rapidement que celle qui se trouvait du côté opposé. Enfin, ayant rempli un vase, de neige bien unie à la surface, il l'exposa au rayonnement d'une lampe, après avoir suspendu au devant de la partie centrale, un disque de carton mince noirci des deux côtés. La neige fondit et se creusa derrière le disque beaucoup plus que dans les parties qui recevaient directement les rayons de la lampe. Celle-ci ayant été remplacée par une lame de cuivre à 400°, l'effet inverse se produisit.

Les différences entre les *pouvoirs émissifs* et *réflecteurs* des corps, peut servir aussi à expliquer divers phénomènes. La neige ne fond que lentement au soleil, parce qu'elle *diffuse* la plus grande partie de la *chaleur lumineuse* incidente; mais si l'on répand du charbon en poudre sur sa surface, elle fond rapidement, à cause de la chaleur que lui communiquent par contact les parcelles de charbon qui absorbent rapidement les rayons solaires. On peut ainsi faire fondre la neige suivant des lignes qui forment des dessins, au moyen de poussières de charbon, assez rares pour n'être pas visibles. Une pierre posée sur de la glace, la fait fondre autour d'elle, après avoir absorbé la chaleur des rayons solaires, chaleur qu'elle communique ensuite directement à la glace, aux points où elle la touche;

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXVIII, p. 341.

elle finit ainsi par s'y enfoncer plus ou moins profondément. Ce sont toujours les rayons obscurs du soleil qui sont le plus facilement absorbés (911), et qui jouent le rôle principal dans l'échauffement de la surface du globe.

Les habits blancs sont préférables pendant l'été aux habits noirs, quand on doit s'exposer au soleil, les corps blancs renvoyant *par réflexion diffuse* (886), au lieu de l'absorber, une grande partie de la *chaleur lumineuse* incidente.

Si ces explications sont incontestables, il en est d'autres, qui ont eu cours pendant longtemps dans la science, mais qui doivent être repoussées comme étant en opposition avec les expériences faites sur la chaleur rayonnante. Par exemple, on a dit que les animaux des régions polaires ont, en général, le pelage blanc, de manière à empêcher la chaleur de leur corps de se perdre par rayonnement. Mais le pouvoir émissif ne dépend pas de la couleur (895). Si donc ces animaux sont préservés du froid, ils le doivent à l'épaisseur de leur fourrure, et non à sa couleur.

On a aussi attribué à sa couleur blanche, la faculté qu'a la neige de préserver d'un froid intense les terres qu'elle recouvre; mais cette faculté est due à ce qu'elle conduit mal la chaleur. Son pouvoir émissif est au contraire très-grand; Wilson, Parry et Scoresby, ont vu souvent la surface de la neige à 9° au-dessous de la température de l'air, tandis que le sol débarrassé de neige n'était pas aussi froid.

918. Applications. — Un poêle doit être recouvert d'un enduit pulvérulent (901), si l'on veut qu'il émette beaucoup de chaleur; s'il est en cuivre poli, il peut échauffer l'air qui le touche, mais il rayonne à peine, quoique brûlant. C'est par la même raison que les liquides se refroidissent lentement dans des vases polis d'argent, de cuivre, de porcelaine vernie. Un liquide s'échauffe plus rapidement quand le vase qui le contient est terni par la fumée ou le charbon, dans les parties qui reçoivent l'action du feu, et brillant partout ailleurs. On peint en noir les murs des jardins sur lesquels s'appuient les espaliers, pour que les rayons solaires qui frappent ces murs soient absorbés, puis renvoyés par rayonnement sur le côté des fruits qui ne reçoit pas les rayons solaires. Une chambre dont les parois seraient dorées s'échaufferait très-vite sous l'influence d'un foyer intérieur, parce que les rayons calorifiques qui se présenteraient pour sortir seraient réfléchis; cependant, les parois resteraient froides au toucher.

§ 5. — DE L'ÉQUILIBRE DE LA CHALEUR RAYONNANTE

919. Équilibre mobile de la température. — Quand plusieurs corps se trouvent dans une même enceinte dont les parois possèdent la même température que chacun d'eux, la quantité de chaleur qu'ils contiennent ne varie pas. On peut expliquer ce résultat de deux manières différentes : ou bien en supposant que ces corps ne rayonnent pas de chaleur et n'en reçoivent pas, ou bien en admettant

que l'enceinte et les corps rayonnent les uns vers les autres et échangent de la chaleur de même intensité, de sorte que, perdant autant qu'ils reçoivent, leur température reste stationnaire. La seconde explication est conforme à l'idée qu'on se fait de la chaleur, dans le système des ondulations. Du reste, l'échange se fait sans que les rayons qui s'entre-croisent se gênent mutuellement, en vertu du principe de la coexistence des petites oscillations (1,581).

Si les pouvoirs absorbant et réflecteur des différents corps ne sont pas les mêmes, cette circonstance ne change rien au résultat; car si un corps reçoit des rayons d'intensité i , il en absorbera une partie, ni , et réfléchira l'autre, $i(1-n)$. Or il émet aussi une quantité égale à ni , le pouvoir émissif étant égal au pouvoir absorbant; il enverra donc aux autres corps la quantité ni , augmentée de la quantité réfléchie $i(1-n)$, c'est-à-dire en tout $ni + i(1-n) = i$. Par conséquent, il enverra la quantité même qu'il a reçue; il ne gagnera donc ni ne perdra de chaleur.

Si un corps est plus froid que ceux qui l'environnent, il s'échauffe en recevant plus de chaleur qu'il n'en émet, d'après la loi de Newton (893); s'il est plus chaud, il lance des rayons plus intenses que ceux qu'il reçoit, et il perd de la chaleur jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de température entre tous les corps de l'enceinte; alors les échanges de chaleur se font également. La température finale ne dépend ni de la masse, ni de la forme, ni de la nature, ni enfin de la position et du nombre des corps; mais la rapidité avec laquelle l'équilibre s'établit dépend de la masse des corps, de l'état de leur surface, de leur capacité calorifique, et enfin du fluide environnant.

Cette théorie, connue sous le nom d'*équilibre mobile de température*, est due à Pierre Prevost, de Genève, en 1791. Elle est bien en harmonie avec l'idée que nous nous faisons de la mobilité de la chaleur, et rend facilement compte des phénomènes; tandis que l'autre système, indépendamment de la difficulté de concevoir l'état de repos dans un agent aussi mobile que la chaleur, offre à chaque pas des difficultés. Par exemple, si un corps est placé dans une enceinte dont la température soit plus élevée que la sienne, il s'échauffe au moyen des rayons qu'il reçoit des différents points de l'enceinte. Il faudrait donc admettre que ce corps provoque par sa présence le rayonnement de l'enceinte vers lui, et seulement dans sa direction, car les autres corps, qui ont même température que l'enceinte, ne doivent pas recevoir de chaleur, puisqu'ils ne s'échauffent pas. Fourier a précisé le principe de Prevost et en a développé les conséquences dans sa théorie mathématique de la chaleur. Laplace et Poisson l'ont aussi adopté, et aujourd'hui il est admis de tous les physiciens.

Avant de développer les principales conséquences de cette théorie, nous allons établir quelques principes sur lesquels nous aurons à nous appuyer.

920. I. Variation de l'intensité de la chaleur avec la distance. —

Nous entendons par *intensité* de la chaleur que reçoit un corps, la quantité qui tombe sur l'unité de surface. *Cette intensité varie en raison inverse du carré de la distance au point rayonnant.* Pour le démontrer, considérons un point o

(fig. 667) d'où émanent dans tous les sens des rayons calorifiques, et soient s et s' deux surfaces sphériques ayant ce point pour centre, et dont les rayons sont d et d' . La totalité de la chaleur émanant du point o traverse chacune de ces deux surfaces. L'intensité, c'est-à-dire la portion de cette chaleur reçue par l'unité de surface, sera donc d'autant plus petite que la surface sphérique sera plus grande, et l'on aura, en désignant par i et i' les intensités aux distances d et d' , et par s et s' les aires des surfaces sphériques,

$$i : i' = s' : s, \quad \text{ou} \quad i : i' = d'^2 : d^2;$$

les surfaces des sphères étant entre elles comme les carrés de leurs rayons d et d' . Cela suppose que chaque rayon de chaleur conserve individuellement la même intensité; ce qui a lieu dans le vide. Dans l'air il y a une faible absorption (867), mais elle est insensible pour les distances que l'on considère ordinairement.

On voit que ce principe résulte de ce que les rayons divergent en partant du point o . S'ils étaient parallèles, le point rayonnant étant par exemple au foyer d'un miroir parabolique, l'intensité ne varierait pas avec la distance.

Pour vérifier ce principe par l'expérience, on emploie l'appareil de Leslie (fig. 661); on fait varier la distance de la source calorifique au miroir sphérique, et l'on trouve que les différences de température des deux boules du thermoscope sont t , $\frac{1}{4}t$, $\frac{1}{9}t$, etc., quand les distances de la source au miroir sont 1, 2, 3, etc. Dans cette expérience, la surface constante du miroir reçoit des quantités de chaleur de plus en plus

petites. Si le miroir augmentait d'étendue à mesure qu'on l'éloigne, de manière à former la base d'un même cône de rayons ayant son sommet à la source de chaleur, l'effet produit sur le thermoscope serait constant.

Le ballon vide de Rumfort (850) peut aussi servir à prouver le principe qui nous occupe : quel que soit son diamètre, le thermomètre monte de la même quantité. Or, quand la surface du ballon est 2, 3, 4, etc. fois plus grande, le nombre de points qui rayonnent vers le centre est 2, 3, 4, etc. fois plus grand. Il faut donc, pour compenser, que l'intensité de la chaleur reçue par la boule du thermomètre soit, 2, 3, 4, etc. fois plus petite, ou en raison inverse de la surface, ou du carré du rayon du ballon.

Leslie ayant placé successivement des boîtes d'étain à la même température et de grandeurs différentes, en présence d'une des boules d'un thermoscope, de manière que l'angle sous-tendu, ayant son sommet au centre de cette boule, fût toujours le même, vit l'index du thermoscope conserver la même position.

921. II. Intensité de la chaleur reçue obliquement. — L'intensité de la chaleur reçue par une surface, est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à cette surface. En effet, soit s un

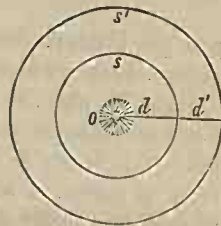


Fig. 667.

faisceau de rayons incidents; nous pouvons le regarder comme formé de rayons parallèles, en supposant que la surface ma (fig. 668) soit infiniment petite. Soit ma une autre surface, faisant un angle différent avec la direction du faisceau s . Chacune de ces deux surfaces recevant la totalité des rayons du faisceau s , l'intensité de la chaleur reçue sera, en chaque point, en raison inverse de leur étendue $ma, m'a$; on aura donc

$$i : i' = m'a : ma, \quad \text{ou} \quad i : i' = \sin \overline{m'ma} : \sin \overline{mm'a} = \cos san : \cos san'.$$

Remarquons qu'il ne s'agit ici que des quantités de chaleur reçues, et non des quantités absorbées par la surface, car celles-ci varient avec le pouvoir absorbant et avec l'inclinaison des rayons (914).



Fig. 668.

922. III. Intensité de la chaleur émise obliquement. — L'intensité de la chaleur, émise obliquement par une surface dépourvue de pouvoir réflecteur, est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons avec la normale à la surface. Ce principe a été

posé par Lambert, dans sa *pyrométrie*, comme s'appliquant à toute espèce de surface. Leslie l'a démontré, dans le cas du noir de fumée, par l'expérience suivante. On place, en face d'un miroir sphérique (fig. 669), un vase ac rempli d'eau bouillante et présentant une surface plane recouverte de noir de fumée. Des écrans percés de deux ouvertures égales AA, BB , limitent le faisceau que reçoit le miroir, et sont assez éloignés l'un de l'autre pour que ces rayons puissent être regardés comme parallèles entre eux. L'expérience montre que

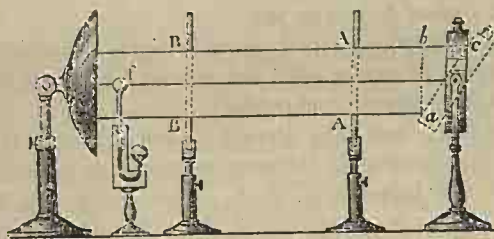


Fig. 669.

l'effet produit reste le même quelle que soit la position que l'on donne à la surface rayonnante, pourvu que le cylindre $ABAB$ la rencontre toujours par tout son contour. Or, puisque la surface rayonnante est tantôt égale à ab , tantôt égale à ac , il faut, l'effet produit restant le même, que les intensités

i et i' des rayons émis par les surfaces ac et ab soient en raison inverse de ces surfaces. On a donc

$$i : i' = ab : ac = \sin acb : \sin cba.$$

Or les angles acb et cba sont formés par les surfaces ac et ab , avec les directions des rayons émis, les intensités i et i' sont donc proportionnelles aux

sinus des angles que font les rayons avec la surface rayonnante, ou aux *cosinus* des angles qu'ils font avec la normale à cette surface.

Il résulte de ce principe qu'une surface courbe envoie la même quantité de chaleur dans une direction donnée, qu'une surface plane égale à sa projection sur un plan perpendiculaire à cette direction. L'expérience vérifie ce résultat ; on prend un vase en forme de *demi-sphère* ou de *demi-cylindre*, recouvert de noir de fumée, et l'on reconnaît que la surface courbe tournée du côté d'un thermoscope, produit le même effet que la surface plane.

Remarquons encore que, si les rayons ne perdaient pas de leur intensité quand ils s'inclinent sur la surface, comme ceux qui partent des différents points d'un élément se rapprochent les uns des autres à mesure qu'ils s'éloignent de la normale, la chaleur lancée obliquement serait extrêmement intense par rapport à celle qui serait lancée dans la direction normale, et, dans une même enceinte, la température d'un corps dépendrait à un haut degré de la position qu'il occuperait ; ce qui n'a pas lieu, comme nous allons le voir.

923. Cas des corps doués de pouvoir réflecteur. — La loi de Lambert, vérifiée seulement pour le cas d'une surface sans pouvoir réflecteur, avait été généralisée et considérée comme vraie pour toutes les substances. MM. de la Provostaye et P. Desains, après avoir constaté les variations du pouvoir réflecteur avec l'incidence (907), remarquèrent que la chaleur émise n'étant que la différence entre celle qui se présente pour sortir et celle qui est réfléchie en dedans, il est naturel de penser que cette dernière varie avec l'inclinaison, comme dans la réflexion extérieure, de sorte que la portion qui sort doit aussi varier avec la direction. Pour vérifier cette conséquence, ils ont employé une caisse rectangulaire de cuivre, pouvant s'incliner plus ou moins, remplie d'huile portée à une température comprise entre 120° et 180°, et sur laquelle étaient appliquées les substances à essayer. Des écrans percés délimitaient un faisceau cylindrique de rayons qui allait frapper la base d'une pile thermo-électrique¹. Le tableau suivant contient les résultats d'un grand nombre d'expériences. Les trois dernières substances étaient appliquées à l'essence de térébenthine, et la lame de verre était appuyée aussi exactement que possible sur la face plane du vase.

ANGLE DES RAYONS avec la normale.	NOIR DE FUMÉE déposé à la lampe.	VERRE	CÉRUSE	OCRE ROUGE	NOIR
0°	100	90,0	100	100	100
60	»	83,6	94,5	»	»
70	100	75,01	83	91,2	»
75	»	65,3	»	»	»
80	100	55,44	65,9	82,3	76

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXII, p. 393.

On voit que la loi de Lambert est confirmée dans le cas du noir de fumée, mais qu'elle n'est plus applicable aux autres substances, dont les rayons s'affaiblissent plus rapidement que le *cosinus* de l'angle qu'ils font avec la normale.

924. Quantité de chaleur passant par un point d'une enceinte. — Nous allons examiner d'après Fourier¹, les conséquences qui découlent des principes qui précèdent. Faisons voir d'abord que la quantité de chaleur qui passe par un point pris dans une enceinte vide, dont toutes les parties possèdent la même température constante, est la même, quelle que soit la position de ce point.

1° Enceinte sans pouvoir réflecteur. — Supposons que les parois aient partout la même température; un point quelconque *m* (fig. 670), recevra des rayons calorifiques de toutes les parties de l'enceinte. Soit *ac* un élément infiniment petit, et *I* l'intensité des rayons qu'il émet dans la direction normale, c'est-à-dire la quantité de chaleur lancée à l'unité de distance par l'unité de surface, quantité qui dépend de la température de cet élément. L'intensité de la chaleur partie de l'élément *ac*, et



Fig. 670.

reçue par le point *m*, sera $\frac{I \cdot \overline{ac} \sin \alpha}{r^2}$, en désignant par *r* la distance moyenne du point *m* à l'élément *ac*, et par α l'angle moyen que font les rayons qui passent par le point *m* avec la surface de cet élément. Or, $\overline{ac} \sin \alpha$ n'est autre chose que la projection *ac'* de l'élément *ac*; et, de plus, si l'on décrit une sphère du point *m* comme centre avec un rayon *mo* égal à l'unité, on a $\frac{ac \cdot \sin \alpha}{r^2} = \frac{ac'}{r^2} = oo'$. L'expression ci-dessus devient donc $I \cdot oo'$; elle représente la quantité de chaleur lancée par l'élément *ac* et passant par le point *m*.

On peut arriver au même résultat par un raisonnement synthétique : les rayons émis par l'élément *ac* produisent le même effet que ceux qui partiraient de sa projection *ac'* supposée à la même température (922), et celle-ci produit le même effet que les rayons émanant de la surface *oo'* comprise dans le même cône *ame* (920).

Il résulte de là, que la quantité de chaleur qui passe par le point *m*, venant de toutes les parties de l'enceinte, est la même que celle qui lui serait envoyée par la surface d'une sphère décrite de ce point avec un rayon égal à l'unité, et ayant la même température que l'enceinte. Le résultat est donc indépendant de la position du point *m*, ainsi que de l'étendue et de la forme de l'enceinte.

Si les différentes parties de l'enceinte dénuée de pouvoir réflecteur, possèdent des températures constantes différentes, on aura, pour la quantité de chaleur passant par le point *m*,

$$i \alpha + i' \beta + i'' \gamma \dots,$$

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. VI, p. 259.

en désignant par i, i', i'' ... les intensités des rayons émis normalement par les différentes portions de l'enceinte, et par α, β, γ ... les parties de la sphère *mo* interceptées par des cônes qui, ayant leur sommet au point *m*, envelopperaient les parties de l'enceinte qui émettent des rayons d'intensité i, i', i'' ... Ces quantités α, β, γ ... sont appelées par Fourier la *capacité* du cône qui correspond à chaque partie de l'enceinte. On voit que, dans ce cas, la quantité de chaleur qui passe par le point *m* dépend de sa position ; plus il est rapproché de la partie la plus chaude de la paroi, plus il reçoit de chaleur, puisque la capacité du cône qui correspond à cette portion plus chaude devient alors plus grande.

Si l'on place dans l'enceinte un écran *ee'* (fig. 671) dénué de pouvoir réflecteur et possédant la même température que la partie *rr'* de l'enceinte, dont il intercepte les rayons, sa présence ne changera rien à la température du point *m* ; car l'écran substituera ses propres rayons à ceux de la portion *rr'*. On peut dire encore que les choses se passent comme si l'enceinte avait la forme *ree' r'* au lieu de *rr'*, et nous venons de voir que la forme est sans influence. Mais si l'écran possède une température différente de celle de *rr'*, les rayons qu'il enverra au point *m* seront plus intenses ou plus faibles que ceux qu'il interceptera, et la température du point *m* s'élèvera ou s'abaissera. C'est ce dernier résultat, qui, mal interprété, avait fait croire autrefois à l'existence de *rayons frigorifiques*.

925. Cas où il y a des réflecteurs parfaits. —

Supposons maintenant le cas où l'écran *ee'* (fig. 671) aurait un pouvoir réfléchissant absolu, c'est-à-dire ne posséderait ni *pouvoir émissif*, ni *pouvoir absorbant*. Il réfléchira vers le point *m* la chaleur qu'il recevra d'une certaine partie *TT* de l'enceinte, et sa présence aura pour effet de substituer à la chaleur envoyée par la partie *rr'*, celle qui vient de *TT* ; ce qui revient à attribuer à la partie *rr'* cachée par *ee'*, la température de la partie *TT*. Si donc l'enceinte est partout à la même température, la présence du réflecteur ne changera pas la quantité de chaleur qui passe par le point *m*.

Ce qui précède s'applique au cas où la surface *ee'*, douée d'une réflexibilité absolue, ferait partie de la surface même de l'enceinte.

Supposons maintenant que, indépendamment de l'écran *ee'*, il y ait un miroir sphérique *nn'* (fig. 671), et que le point *m* soit placé au foyer conjugué du corps *ee'*, supposé à la température uniforme de l'enceinte et dénué de pouvoir réflecteur. Les rayons de *rr'*, interceptés par *ee'* sont remplacés par le cône de rayons *eme'* qu'envoie directement ce corps. Ceux qui venaient de *ss'* et que le miroir *nn* intercepte, sont remplacés par les rayons réfléchis sur ce miroir provenant de la partie *OO* de l'enceinte, moins ceux qu'arrête le corps *ee'*. Mais ces derniers sont remplacés par ceux qui, partis de *ee'* se réunissent en *m* après s'être réfléchis sur le miroir *nn* ; le point *m* reçoit donc encore la même quantité de chaleur. — Si le corps *ee'* possède une température plus élevée que celle de



Fig. 671.

l'enceinte, les rayons venant de ce corps, et reçus par le point m après réflexion, étant plus intenses que ceux de l'enceinte qu'ils remplacent, la quantité de chaleur qui passe en m est augmentée. Si, au contraire, le corps ee' est plus froid que l'enceinte, le point m reçoit moins de chaleur. Si donc, dans ce dernier cas, on plaçait en m un thermomètre à la température de l'enceinte, il recevrait des rayons moins intenses que ceux qu'il rayonne directement vers le corps ee' et vers le miroir nn' , et il baisserait. Ce phénomène, que l'expérience vérifie, semble prouver au premier abord que le froid se réfléchit comme la chaleur; mais nous voyons que cette opinion, soutenue par Rumfort, doit être rejetée, et que le résultat s'explique tout naturellement par les échanges de chaleur.

926. Réflexion apparente du froid. — L'expérience se fait ordinairement avec les deux miroirs conjugués (fig. 672) : au foyer de l'un d'eux, on met un vase rempli d'un mélange réfrigérant, formé, par exemple, de glace pilée et de sel marin; au foyer de l'autre, on place une des boules d'un thermomètre différentiel, et l'on voit aussitôt l'index se rapprocher de cette boule. Dans ce

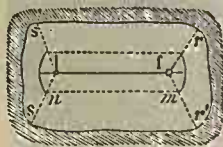


Fig. 672.

cas, les rayons provenant de la partie ss de l'enceinte et interceptés par le miroir n sont remplacés par ceux qui, partis du corps froid, tombent sur le miroir m , s'y réfléchissent, vont rencontrer le miroir n , et sont enfin concentrés sur le thermomètre. En échange, ce dernier envoie au corps f , par double réflexion, des rayons plus intenses, d'où résulte l'abaissement de température observé.

Les choses se passent comme pour la lumière : si l'on met un corps noir en f , il se forme une tache obscure sur un écran placé au foyer de n , et cependant on ne peut dire que l'obscurité se réfléchit.

L'expérience de la réflexion apparente du froid avait été faite par les académiciens de Florence; mais ils ne l'avaient pas interprétée; elle fut répétée par Gretner et par Pictet, puis expliquée par Prevost, au moyen de son ingénieuse théorie des échanges de chaleur.

927. Cas de surfaces à pouvoir réflecteur. — Nous avons supposé jusqu'à présent que nous avons affaire à des surfaces dépourvues de pouvoir réflecteur, ou bien douées d'une réflexibilité absolue. Supposons maintenant que les éléments de la surface de l'enceinte et des corps qu'elle contient absorbent une partie de la chaleur et réfléchissent l'autre. Nous pouvons ramener ce cas général aux deux cas précédents, en considérant chaque élément de surface comme composé de deux parties, l'une douée d'un pouvoir réflecteur absolu, et l'autre dénuée de réflexibilité. Le rapport entre ces deux parties dépend de la nature de la surface. Chaque élément absorbe donc une partie de la chaleur reçue, pour la rayonner ensuite, et réfléchit l'autre, de manière que la totalité de la chaleur renvoyée est la même que si tout l'élément était doué d'un pouvoir réflecteur absolu, ou doué de la faculté d'absorber, et par conséquent d'émettre, toute la chaleur qu'il reçoit.

Si donc l'élément qui reçoit la chaleur en réfléchit une partie, ce qu'il rayonne est égal à ce qu'il absorbe, et s'ajoute à ce qui est réfléchi, pour former un total égal à la quantité de chaleur reçue. La quantité de chaleur réfléchie dépend de l'angle d'incidence (907); celle qui est émise obliquement en dépend de même, et autrement que ne l'indique la loi de Lambert (923), et il y a toujours, dans l'état d'équilibre, autant de chaleur rayonnée que de chaleur absorbée. Cela suppose aussi que le pouvoir absorbant est égal au pouvoir émissif. Or, cette condition est remplie, du moins tant que les rayons de chaleur émis et incidents ne sont pas de nature différente. Quand les rayons ne sont pas tous de même espèce, le problème devient très-compiqué; l'expérience montre cependant que l'équilibre finit par s'établir. On se rend compte de ce résultat, en remarquant que les échanges rapides qui se font entre tous les rayons d'une enceinte de température uniforme, doivent ramener, dans un temps insensible, tous les rayons d'espèces différentes à être identiques.

Remarquons enfin que la présence d'un gaz pourrait modifier les résultats, si sa température n'était pas partout la même. Les parties inégalement dilatées, en se déplaçant, transporteraient la chaleur d'un point à un autre.

§ 6. — LOIS GÉNÉRALES DU REFROIDISSEMENT

928. On nomme *vitesse de refroidissement* d'un corps, l'abaissement de température de ce corps pendant une minute, temps assez court pour qu'on puisse regarder la perte de chaleur comme se faisant uniformément. Cette perte est due à deux causes, le rayonnement et le contact du milieu ambiant.

De la loi de Newton. — Newton avait admis, comme nous l'avons déjà vu (894), que la vitesse du refroidissement est proportionnelle à l'excès de la température du corps sur celle du milieu ambiant. Il résulte de cette loi que les excès successifs et les abaissements de température pendant des temps égaux forment une pression géométrique décroissante. En effet, soit t l'excès de température à un moment donné; pendant une minute, l'abaissement de température sera nt , n étant une fraction constante qui dépend, entr'autres, de la nature du milieu ambiant et du pouvoir émissif du corps. L'excès à la fin de la première minute ne sera donc plus que $t - nt = t(1 - n)$. Pendant la seconde minute, l'abaissement sera $n \cdot t(1 - n)$; de sorte que l'excès restant sera $t(1 - n) - nt(1 - n) = t(1 - n)^2$. L'abaissement de température pendant la troisième minute sera $nt(1 - n)^2$, et l'excès deviendra $t(1 - n)^2 - nt(1 - n)^2 = t(1 - n)^3$... et ainsi de suite; de manière que l'abaissement pendant la m^{e} minute sera $a = nt(1 - n)^{m-1}$, et l'excès,

$$[1] \quad T = t(1 - n)^m, \quad \text{d'où} \quad \log T = \log t + m \log(1 - n).$$

Pour vérifier ces conséquences, par l'expérience, on peut employer, pour

corps qui se refroidit, la boule même du thermomètre qui indique les températures. En retranchant des températures observées de minute en minute celle de l'air ambiant, on a les excès successifs, et l'on trouve qu'ils forment une progression géométrique décroissante, dont la raison $(1 - n)$ se déduit des deux premiers excès observés; en faisant $m = 1$, dans la formule [1] qui devient $T = t(1 - n)$; d'où l'on tire $(1 - n)$. Par ce moyen on a pu constater que la loi de Newton n'est vraie qu'entre certaines limites (894). Parmi ceux qui se sont livrés à des expériences de vérification, nous citerons Kraft, Richmann, qui a aussi donné son nom à cette loi, Rumfort et Biot. Martine, dès 1740, avait signalé l'inexactitude de la loi de Newton pour les grands excès de température, et Erxleben, puis Dalton, constatèrent que les écarts sont d'autant plus prononcés que ces excès sont plus grands. Enfin, Delaroché est arrivé au même résultat, dans le cas du refroidissement produit par le rayonnement seul. La question en était là, lorsque Dulong et Petit firent, en 1817, de savantes recherches, qui sont un modèle pour les physiciens, et que nous allons exposer¹.

929. RECHERCHES PRÉLIMINAIRES. — Pour n'avoir pas à considérer la *conductibilité*, c'est-à-dire la difficulté plus ou moins grande que la chaleur éprouve à se rendre à la surface des corps, Dulong et Petit ont opéré sur des liquides, dans lesquels il s'établit des mouvements, qui en mêlent toutes les parties de manière à rendre la température uniforme. Le thermomètre lui-même constituait le corps qui se refroidissait.

Méthode de calcul. — Pour calculer, au moyen des résultats donnés par des observations faites de minute en minute, la vitesse de refroidissement correspondante à un excès de température demandé, on a procédé par la méthode suivante. Considérons les excès de température A, B, C, D..... T observés après 0^{min} , 1^{m} , 2^{m} , 3^{m} ,..... t^{m} . Si la loi de Newton était exacte, on aurait (928)

$$B = \Lambda m, \quad C = Bm = \Lambda m^2, \quad D = Am^3 \dots\dots T = \Lambda m^t,$$

m étant une constante dépendant de la nature du corps. Il n'en est pas ainsi exactement, surtout si les excès A, B, C... sont élevés. Mais on conçoit qu'on pourra toujours représenter un certain nombre de ces excès, par une expression de la forme

$$[1] \quad T = \Lambda m^{(\alpha t + \beta t^2)},$$

En déterminant les constantes m , α , β au moyen de trois observations directes assez rapprochées pour que la loi exprimée par cette formule puisse être considérée comme vraie entre ces limites, les excès T compris entre ceux que l'on aura observés, ou s'en écartant peu en deçà et au-delà, pourront s'en déduire.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. VII, p. 225 et 337.

Si l'on calcule m , α , β au moyen de trois autres observations directes assez rapprochées, on aura une seconde formule, qui servira à calculer les excès compris entre ceux qui auront servi à obtenir les nouvelles constantes; et ainsi de suite. Ces formules dont on fait souvent usage en physique, se nomment des *formules d'interpolation* ou *formules empiriques*; elles remplacent les constructions graphiques (1, 7), et permettent de calculer des nombres compris entre certaines limites, en partant de quelques valeurs mesurées directement, et de les dégager des incertitudes et des irrégularités que présentent toujours les résultats bruts des observations.

Calcul de la vitesse. — La *vitesse du refroidissement* pour un excès de température donné, peut se définir le rapport entre un abaissement infiniment petit de la température, ou de l'excès de température, et le temps, aussi infiniment petit, pendant lequel cet abaissement s'effectue; c'est la dérivée de l'abaissement par rapport au temps. On obtiendra donc la vitesse qui correspond à un excès donné, en prenant la dérivée par rapport à t , du second membre de la formule [1]; ce qui donne, pour la vitesse,

$$T' = T(x + 2\beta t) \text{ Log. } m \quad [2]$$

La valeur de t qui correspond à l'excès T se déduit de l'équation [1], en passant par les logarithmes.

930. L'influence de la masse du liquide, de sa nature, etc. — Dulong et Petit se sont d'abord demandé si la masse et la nature du liquide qui se refroidit, la forme du réservoir qui le contient et l'état de sa surface, ont une influence sur les lois cherchées. Pour cela, ils ont fait refroidir dans l'air trois thermomètres dont les réservoirs avaient des diamètres de 2^{cm}, 4^{cm} et 7^{cm}. Ils ont reconnu que les *vitesse de refroidissement* de ces instruments n'étaient pas égales pour les mêmes excès, mais que l'on pouvait passer de la série des vitesses données par un des thermomètres à celle d'un des deux autres, en multipliant tous les termes de la première série par un même nombre. Les lois sont donc les mêmes pour les trois instruments; seulement les valeurs absolues des vitesses soumises à ces lois changent de l'un à l'autre.

Des thermomètres égaux plongés dans des vases identiques remplis d'eau, d'alcool absolu et d'acide sulfurique; trois thermomètres de même capacité, le premier à réservoir sphérique et les deux autres à réservoir cylindrique, l'un ayant une hauteur égale au rayon de sa base, et l'autre une hauteur quadruple de ce rayon, ont servi à reconnaître, par le même moyen, que les lois ne dépendent pas de la nature du liquide ni de la forme du réservoir. En employant enfin des vases remplis d'eau, l'un en verre, l'autre en fer-blanc, il a été constaté que les lois ne sont pas les mêmes pour ces deux sortes d'enveloppes; car les rapports entre les vitesses qui correspondent aux mêmes excès de température, ne sont pas égaux, et varient d'une manière continue avec les excès de température.

Cela posé, on a cherché séparément les lois du refroidissement dans le vide,

produit par le rayonnement seul, puis les lois du refroidissement dû au contact d'un gaz environnant. Nous allons d'abord décrire les appareils imaginés pour opérer soit dans le vide soit dans les gaz.

931. APPAREIL ET MODE D'EXPIÉRIENCE. — Les refroidissements ont été observés successivement sur deux thermomètres différents. Le réservoir de l'un d'eux avait 6^{cm} de diamètre, et celui de l'autre 2^{cm}. Ce dernier servait pour les faibles excès de température, afin d'abrégier la durée des expériences. On pouvait, du reste, passer des indications de l'un à celles de l'autre, en opérant avec l'un et l'autre pour quelques températures communes.

Le refroidissement avait lieu dans un ballon de cuivre mince B (fig. 673), de 30^{cm} de diamètre, dont le col, dressé avec soin, est placé horizontalement. Ce ballon est plongé dans une cuve remplie d'eau, jusqu'à une petite distance de son ouverture o, et maintenu par des traverses a, a'. Il prend la température

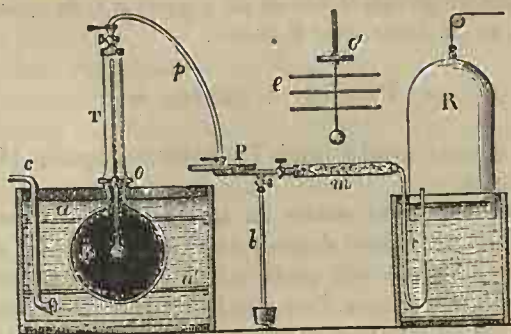


Fig. 673.

de l'eau, que l'on fait varier soit en y jetant des fragments de glace, soit en y faisant arriver de la vapeur d'eau par le tube c. L'intérieur du ballon est garni de noir de fumée, de manière que toute la chaleur que lui envoie le thermomètre soit absorbée. Si quelque petite portion était réfléchi, comme elle varie sensiblement comme les pertes de chaleur du thermomètre, l'erreur qui en résulterait affecterait les résultats proportionnellement.

Sur l'orifice du ballon est appliqué un disque de verre, o, usé à l'émeri et percé de plusieurs trous, dont un au centre dans lequel est fixée, par un bouchon, la tige du thermomètre. La partie graduée de cette tige est séparée du réservoir par une autre très-étroite de longueur égale au rayon du ballon, de manière à diminuer la masse du mercure qui est hors de la boule, et à empêcher des courants de ce liquide de se produire dans l'instrument. La tige graduée est enveloppée par un manchon de verre T, dont l'ouverture usée à l'émeri s'applique exactement sur le disque de verre o, et qui porte à sa partie supérieure un robinet suivi d'un tube de plomb p, communiquant avec une machine pneumatique P.

Manière d'opérer dans le vide. — On commence par échauffer le ther-

momètre jusqu'à l'ébullition du mercure, en le portant sur des charbons ardents, après l'avoir séparé de l'appareil ainsi que le disque de verre *o*. Des écrans placés au-dessous du disque *o'*, servent à le préserver de la chaleur, ainsi que la tige graduée. On replace ensuite le disque en *o*, on ajuste le manchon *T*, on fait rapidement le vide dans le ballon, et l'on prend note de la pression indiquée par le tube manométrique, *b*, de la machine pneumatique.

Manière d'opérer dans les gaz. — Après avoir procédé comme il vient d'être dit, on introduit le gaz dans le ballon. Ce gaz, recueilli d'avance dans un gazomètre, *R*, soutenu par un contre-poids, passe par un tube recourbé *t* qui s'ouvre au-dessus de l'eau du gazomètre, dans un gros tube *m* rempli de matières desséchantes, par exemple de fragments de chlorure de calcium, et de là se rend par les tubes *p* et *T* dans le ballon *B*. Afin d'enlever le reste d'air que contient le ballon, on fait de nouveau le vide, puis on fait encore entrer du gaz desséché, dont la pression est donnée par le tube *b*. Quand il s'agissait d'opérer dans l'air, on laissait simplement entrer ce gaz par l'extrémité du tube *m*. Les dimensions du thermomètre étaient telles que, dans le vide, on pouvait commencer les observations à 300°. Dans un gaz, on ne les commençait qu'à 250°, parce qu'il fallait attendre qu'il eût pris la température du ballon.

Méthode d'observation. — L'appareil une fois prêt pour expérimenter dans le vide ou dans un gaz, on observait, avec un cathétomètre, les températures indiquées par le thermomètre, à des intervalles de temps égaux donnés par une montre à seconde, l'eau de la cuve étant maintenue à une température constante. Puis, on divisait la série des observations en plusieurs groupes qu'on représentait chacun par des expressions de la forme $Am^{(at + \frac{1}{2}t^2)}$, qui servaient à calculer les vitesses de refroidissement pour des excès choisis de température (929). On calculait des excès variant de 20° en 20°, et l'on opérait successivement avec un thermomètre à boule argentée, et le même thermomètre à boule nue.

932. Corrections. — 1° La température observée est trop faible, le mercure contenu dans la tige prenant la température ambiante. Il faut donc ajouter à la température observée, le nombre de degrés représenté par la dilatation du mercure de la tige si on la portait, de la température ambiante à celle de la boule.

Pour faire cette correction, soit *x* la température réelle de la boule, *T* celle qui est indiquée, *t* celle de l'air extérieur, et *t'* le nombre de divisions de la tige à *t*° occupées par le mercure. La dilatation du mercure qui occupe ces *t'* divisions est $t' \frac{1}{6480}$ pour 1° (828); et pour (*x* — *t*°), elle est $t' (x - t) \frac{1}{6480}$. La température cherchée est donc $x = T + t' (x - t) \frac{1}{6480}$, d'où l'on tire la valeur de *x*. Comme *T* diffère peu de *x*, on peut remplacer *x* par *T* dans le second membre, et la correction devient $t' (T - t) \frac{1}{6480}$.

2° Les vitesses du refroidissement observées sont trop grandes, à cause du mercure froid qui pénètre dans la boule quand le mercure s'y contracte. Connaissant la quantité de mercure introduite et sa température, ainsi que la masse du mercure de la boule et sa température, on évaluait facilement le refroidissement occasionné par ce mélange du mercure venu de la tige.

3° Toutes les températures ont été ramenées au thermomètre à air, c'est-à-dire remplacées par celles qu'eût données un thermomètre à air placé dans les mêmes conditions (847).

933. REFROIDISSEMENT DANS LE VIDE. — Les vitesses du refroidissement dans le vide sont affectées d'une petite erreur provenant d'un peu d'air qui reste dans le ballon. On a corrigé les vitesses déduites du calcul, en en retranchant la quantité de chaleur enlevée par l'air resté dans le ballon. Cette quantité se calcule, comme nous le verrons, en partant de la vitesse dans le vide, laquelle est entachée de la petite erreur dont il s'agit; mais comme la correction est très-faible, l'erreur est tout à fait insensible.

Les premières expériences ont été faites sur le thermomètre à boule nue. Après avoir formé la série des vitesses de refroidissement pour des excès variant de 20° en 20°, on les comparait pour trouver la loi. On reconnut d'abord que la température absolue de l'enceinte avait de l'influence sur le refroidissement, pour un même excès. En effet, soit θ cette température, et $t + \theta$ celle du corps qui rayonne dans le vide. $F(t + \theta)$ et $F(\theta)$ représentent le rayonnement du corps et celui de l'enceinte, F désignant une fonction inconnue de la température absolue, dont la forme exprime la loi du rayonnement. On peut alors, d'après la théorie de l'équilibre mobile de température, admettre que la vitesse de refroidissement est représentée par la formule

$$V = F(t + \theta) - F(\theta).$$

Si la loi de Newton était vraie, les fonctions F seraient proportionnelles à leur variable, et égales, l'une à $m(t + \theta)$, l'autre à $m\theta$, et la vitesse du refroidissement, mt , serait indépendante de la température de l'enceinte. Mais, cette loi n'étant pas exacte, il fallut chercher celle qui lie les vitesses aux températures absolues de l'enceinte.

I. Loi relative à la température de l'enceinte. — L'enceinte étant portée successivement à 0°, 20°, 40°, on remarqua d'abord que, pour un même excès du thermomètre, le refroidissement est plus rapide quand l'enceinte est à une température plus élevée. Ayant alors pris le rapport entre les vitesses correspondantes aux mêmes excès, quand l'enceinte était successivement à 0° et à 20° puis à 20° et 40°, puis à 40° et 60°, enfin à 60° et 80°, on trouva toujours sensiblement le même rapport. Ce rapport était égal à 1,165, dans les expériences de Dulong et Petit, quel que fût l'excès considéré. On en doit conclure que :

1° La température absolue de l'enceinte ne change pas la loi relative aux excès de température. — 2° Les vitesses de refroidissement dans le vide, pour un même excès de température, croissent en progression géométrique quand les températures de l'enceinte croissent en progression arithmétique; et la raison de la progression géométrique est la même, quel que soit l'excès considéré.

934. II. Loi relative aux excès. — Cette première loi peut servir à

trouver celle dont dépendent les excès de température ; elle montre que la vitesse V du refroidissement est représentée par la formule

$$[2] \quad V = F(t + 0) - F(0) = \varphi(t) a^t;$$

car, l'excès t étant constant, V doit varier en progression géométrique quand 0 varie en progression arithmétique. a est une constante, et $\varphi(t)$ une fonction de t qu'il faut trouver. Nous suivrons pour cela la marche suivante plus élémentaire que celle qu'ont suivie Dulong et Petit.

Faisons d'abord $0 = 0$ dans l'équation [2]; elle devient

$$[3] \quad F(t) - F(0) = \varphi(t).$$

Retranchons l'une de l'autre les équations [2] et [3], membre à membre, il vient

$$F(t + 0) - F(0) - F(t) + F(0) = \varphi(t) (a^0 - 1).$$

Le premier membre ne changeant pas quand on y remplace t par 0 et 0 par t , il doit en être de même du second ; on a donc

$$\varphi(t) (a^0 - 1) = \varphi(0) (a^t - 1); \quad \text{d'où} \quad \frac{\varphi(t)}{a^t - 1} = \frac{\varphi(0)}{a^0 - 1}.$$

On voit que le rapport de $\varphi(t)$ à $a^t - 1$ est constant quel que soit t , puisque les deux membres ne diffèrent qu'en ce que 0 est substitué à t et *vice versa*. Représentons ce rapport constant par m , nous aurons

$$m = \frac{\varphi(t)}{a^t - 1}, \quad \text{d'où} \quad \varphi(t) = m(a^t - 1).$$

Substituant dans l'équation [2], il vient enfin

$$[4] \quad V = ma^0 (a^t - 1).$$

Cette formule exprime les lois du refroidissement dans le vide. Si l'on suppose constante la température 0 de l'enceinte, ma^0 est constant, et l'on voit que :

Les vitesses du refroidissement d'un corps dans une enceinte vide entretenue à une température constante, croissent en progression géométrique dont les termes sont diminués d'une quantité constante (ma^0), quand les excès de température, t , forment une progression arithmétique croissante.

La raison a de cette progression peut se calculer, dans le cas du thermomètre dont on a fait usage ; car on a trouvé $a^{20} = 1,165$ (933) ; donc

$$a = \sqrt[20]{1,165} = 1,0077.$$

La constante m se calcule au moyen d'une valeur de V correspondant à des valeurs données de θ et de t ; elle s'est trouvée égale à 2,037.

Dulong et Petit ont ensuite vérifié la formule [4], en comparant les valeurs qu'elle donne pour V , avec celles que fournit directement l'expérience. L'accord s'est toujours trouvé aussi satisfaisant que possible, dans une étendue de 300° de l'échelle centigrade. Cette vérification était nécessaire, à cause de ce qu'il peut y avoir d'hypothétique dans la manière de représenter la vitesse de refroidissement par une expression de la forme $V = F(t + \theta) - F(\theta)$.

Thermomètre argenté. — Ayant calculé les vitesses de refroidissement du thermomètre à boule argentée, ainsi que celles du thermomètre à boule nue pour les mêmes températures de l'enceinte et les mêmes excès, Dulong et Petit ont toujours trouvé entre elles le même rapport. La formule [4] s'applique donc aussi au thermomètre argenté, en conservant la constante a , mais en modifiant la valeur de m , qui devient égale à 0,357.

La grande différence de nature de l'argent et du verre permet de regarder les lois exprimées par la formule [4] comme s'appliquant à tous les corps.

935. Conséquences. — Si nous faisons $\theta = -\infty$, ce qui suppose que le thermomètre se refroidit dans un espace vide et sans chaleur, la formule [4] devient $V = ma^T$, en posant $T = t + \theta$. Ce qui montre que les vitesses de refroidissement d'un corps, dans une enceinte vide, ne pouvant lui envoyer de chaleur, décroîtraient en progression géométrique quand les températures diminueraient en progression arithmétique; et le rapport de cette progression géométrique serait le même pour tous les corps. Cette loi est celle du rayonnement particulière, et l'on voit que les pouvoirs rayonnants des différents corps conservent entre eux les mêmes rapports à toutes les températures¹.

Pour que le rayonnement soit nul, il faut que l'on ait $T = -\infty$, ce qui fixe à l'infini le zéro absolu, et conduirait à regarder comme infinie la quantité de chaleur contenue dans les corps. Mais cela suppose qu'à chaque degré correspond une même quantité de chaleur; et nous verrons, en traitant des chaleurs spécifiques, que cette quantité diminue quand la température s'abaisse. Or il peut se faire que la loi de cette diminution soit telle que la somme des quantités de chaleur qui correspondent à chaque degré soit finie.

La loi du rayonnement particulière, nous ramène à la formule [4]. En effet, pour obtenir le refroidissement d'un corps dans une enceinte vide qui rayonne, il suffit de trancher de ma^T la quantité ma^θ que rayonne l'enceinte, et il vient en se rappelant que l'on a $T = t + \theta$,

$$V = m(a^T - a^\theta) = ma^\theta(a^t - 1).$$

¹ Ce rapport a été trouvé égal à 5,707 entre le verre et l'argent, ce qui donne 6,33 pour le pouvoir émissif de ce dernier par rapport au noir de fumée représenté par 100. Ce nombre est beaucoup trop fort (897); ce qui doit être attribué aux incertitudes de la méthode du refroidissement, pour les évaluations de cette nature.

Égalité des pouvoirs émissif et absorbant. — Il résulte de la formule [4] que ma^{+0} représente la chaleur émise par un corps dans le vide, et ma^0 , celle qu'il reçoit de l'enceinte, ou celle qu'il absorbe; ma^0 représente donc le pouvoir absorbant. Or, comme cette expression représente aussi la quantité de chaleur rayonnée, ou le *pouvoir émissif*, quand la température est 0, nous voyons que ce pouvoir est égal au pouvoir absorbant, et cette égalité est démontrée ici jusqu'à 300°. Nous pouvons donc dire que :

Les vitesses de refroidissement ou de réchauffement dans le vide, (par conséquent le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant) décroissent en progression géométrique, quand les températures diminuent en progression arithmétique; et la raison de la première progression est la même pour tous les corps.

Rappelons enfin que toutes les lois qui précèdent supposent les températures évaluées au moyen du thermomètre à air (932).

936. REFROIDISSEMENT DANS LES GAZ. — Pour obtenir la vitesse de refroidissement due à la présence d'un gaz remplissant le ballon B (fig. 673), Dulong et Petit retranchent, des vitesses *totales* observées et calculées par la formule [4] (934), les vitesses qui auraient lieu dans le vide sous les mêmes conditions; ce qui suppose que la présence du gaz ne modifie pas la vitesse due au rayonnement. Ils ont prouvé d'abord sur un thermomètre nu et sur un thermomètre argenté, que la nature de la surface n'a pas d'influence sur les pertes de chaleur produites par le gaz. Ce résultat a été obtenu dans l'air et le gaz hydrogène; Leslie l'avait déjà déduit indirectement d'expériences faites sur l'air en mouvement (895).

Effet de la température de l'enceinte. — Pour faire varier la température de l'enceinte et du gaz, on échauffait plus ou moins l'eau qui entoure le ballon B (fig. 673), en ayant soin de laisser le gaz se dilater librement. Dulong et Petit ont alors trouvé qu'un gaz enlève toujours la même quantité de chaleur pour un même excès, quelle que soit sa température absolue. Les expériences ont été faites sur l'air, l'hydrogène, l'acide carbonique et le gaz oléfiant. De là cette loi générale :

La vitesse de refroidissement dû au contact seul d'un gaz, dépend, pour un même excès de température, de la densité et de la température du fluide; mais cette dépendance est telle que la vitesse reste la même, si la densité et la température du gaz changent de manière que l'élasticité reste constante.

On peut donc n'avoir égard qu'à l'élasticité du gaz.

Loi relative à la pression. — Cela posé, on a mesuré les vitesses de refroidissement dans l'air, sous les pressions de 72^{cm}, 36^{cm}, 18^{cm}, 9^{cm}, c'est-à-dire sous des pressions qui sont entre elles comme les nombres 8, 4, 2, 1. En prenant les rapports entre les vitesses sous des pressions consécutives pour les divers excès, on a trouvé le même nombre constant 1,366, quels que fussent l'excès de température et les deux pressions consécutives considérées. Ce résultat, vérifié aussi sur l'hydrogène, l'acide carbonique et le gaz oléfiant, conduit aux lois suivantes :

1^o La loi, suivant laquelle la vitesse du refroidissement par le contact d'un gaz varie avec les excès de température, reste la même, quelle que soit l'élasticité de ce gaz.

2^o L'élasticité du gaz variant en progression géométrique, son pouvoir refroidissant varie aussi en progression géométrique. Le rapport de la première progression étant 2, celui de la seconde est, en moyenne, 1,366 pour l'air, 1,301 pour l'hydrogène, 1,431 pour l'acide carbonique, et, 1,415 pour le gaz oléfiant,

Ce résultat peut être énoncé plus simplement : soit P le pouvoir refroidissant de l'air sous la pression p . Ce pouvoir devient $P(1,366)$, sous la pression $2p$; $P(1,366)^2$, sous la pression $4p$...; $P(1,366)^n$ sous la pression $2^n p$. Posons $2^n p = p'$ et $P(1,366)^n = P'$; on aura, en éliminant n entre ces deux égalités après avoir pris les logarithmes,

$$\frac{\log P' - \log P}{\log(1,366)} = \frac{\log p' - \log p}{\log 2}, \quad \text{d'où} \quad \frac{P'}{P} = \left(\frac{p'}{p}\right)^{0,45},$$

Pour l'hydrogène, l'exposant serait 0,38; pour l'acide carbonique, 0,517, et pour le gaz oléfiant, 0,501. On voit donc que le pouvoir refroidissant d'un gaz est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à une certaine puissance de son élasticité; puissance dont l'exposant varie d'un gaz à l'autre.

Loi relative aux excès de température. — La température de l'enceinte et la pression restant constantes, on a reconnu d'abord que la loi relative aux excès de température est la même pour les quatre gaz observés. En effet, le rapport entre les pouvoirs refroidissants de deux gaz est toujours le même, quel que soit l'excès considéré. Nous avons déjà vu que cette loi est, aussi, indépendante de l'élasticité d'un même gaz.

Après un grand nombre d'essais, Dulong et Petit ont trouvé que les vitesses de refroidissement dues au contact seul d'un gaz, croissent en progression géométrique quand les excès de température du corps croissent aussi en progression géométrique. Le rapport de la dernière progression étant 2, celui de la première est 2,35. En employant la méthode de calcul développée ci-dessus pour la loi des pressions, on montre que le pouvoir refroidissant d'un gaz est proportionnel à la puissance 1,233 de l'excès de température.

937. Expression générale de la vitesse due à un gaz. — L'excès de température t et la pression p étant les seuls éléments à considérer, et le pouvoir refroidissant étant proportionnel à une certaine puissance de l'élasticité, et à la puissance 1,233 de l'excès de température; on a

$$\dot{V} = np^c t^b,$$

b est égal à 1,233 pour tous les gaz et pour tous les corps; c est aussi le même pour tous les corps, mais varie d'un gaz à un autre; et n change avec la nature du gaz et les dimensions du corps.

Loi au delà de 250°. — La loi qui vient de nous occuper n'a été établie que jusqu'à 250°; il était utile de la vérifier pour des températures plus élevées. Dulong et Petit ont employé pour cela la méthode suivante, dont l'idée est due à Leslie. Soient v et v' les vitesses de refroidissement total dues au contact de l'air et au rayonnement, pour le thermomètre à boule nue; v sera le même pour le thermomètre argenté (936), mais v' sera remplacé par $\frac{v'}{5,707}$, le rapport des pouvoirs émissifs du verre et de l'argent étant 5,707 (935). On aura donc, en appelant a et b les vitesses totales de refroidissement des deux thermomètres,

$$a = v + v', \quad \text{et} \quad b = v + \frac{v'}{5,707}; \quad \text{d'où} \quad v = \frac{5,707 b - a}{4,707}, \quad [4]$$

en éliminant v' . On aura ainsi le pouvoir refroidissant de l'air seul, en observant les vitesses de refroidissement total, b et a , des deux thermomètres dans l'air. On a trouvé par cette méthode des résultats d'accord avec ceux que donne la formule $v = n't^b$, dans laquelle n' varie avec la pression. On a pu ainsi pousser la vérification jusqu'à 360°; et elle aurait été encore plus satisfaisante si le rapport 5,707 n'eût pas été trop fort (935). La formule [4] suppose que le rapport 5,707 entre les pouvoirs émissifs du verre et de l'argent reste le même à toute température; l'accord trouvé justifie donc *à posteriori* cette supposition. La formule [4] sert aussi à vérifier que la quantité de chaleur enlevée par l'air ne dépend pas de la nature de la surface rayonnante.

938. Pouvoir refroidissant des gaz. — La formule qui précède donne le moyen de comparer les pouvoirs refroidissants des divers gaz. Ces pouvoirs doivent changer avec la pression, mais d'une quantité négligeable dans les limites de variation de la pression atmosphérique. Le pouvoir refroidissant de l'air étant pris pour unité sous la pression de 760^{mm}, celui de l'hydrogène est 3,45, et celui de l'acide carbonique 0,965.

Si l'on compare le refroidissement dû au gaz, à celui que produit le rayonnement, on trouve que l'air enlève au thermomètre nu un peu moins de chaleur que le rayonnement, et 5 ou 6 fois plus, au thermomètre argenté. L'hydrogène enlève au thermomètre nu au moins 3 fois autant de chaleur qu'il en perd par rayonnement, et 10 à 12 fois autant, au thermomètre argenté. Ce grand pouvoir refroidissant de l'hydrogène est dû en partie à sa grande mobilité, que favorise sa faible densité; mais peut-être aussi au pouvoir conducteur relativement très-grand de ce gaz, comme nous le verrons bientôt (978).

Gaz en mouvement. — Quand le gaz dans lequel est plongé le corps est en mouvement, ce mouvement produit le même effet que si la surface du corps était augmentée; de sorte que les pouvoirs refroidissants de divers gaz animés de la même vitesse, conservent les mêmes rapports que dans l'état de repos. Comme le rayonnement est toujours le même, la chaleur enlevée par le gaz quand il est animé d'une grande vitesse, forme la presque totalité de la perte éprouvée par le corps, et alors la surface n'a plus d'influence sensible.

939. Loi générale du refroidissement. — La vitesse totale de refroidissement, U , d'un corps dans un gaz, s'obtiendra en ajoutant la vitesse due au rayonnement, exprimée par la formule $V = ma^2 (a' - 1)$, à celle qui est due au gaz, donnée par l'expression $\eta r^c t^b$; on aura donc

$$U = ma^2 (a' - 1) + \eta r^c t^b. \quad [5]$$

Dans cette formule, a est toujours égal à 1,0077; c est le même pour tous les corps, mais change d'un gaz à l'autre; b est constant pour tous les gaz et égal à 1,233; m et n augmentent l'un et l'autre avec l'étendue de la surface qui se refroidit, m variant seul avec la nature de cette surface et n dépendant de la nature du gaz. Il est facile de concevoir maintenant pourquoi la loi des vitesses de refroidissement dans l'air change avec la nature de la surface (930), car m varie avec la surface, tandis que n n'en dépend pas.

La formule générale [5] a été vérifiée par Dulong et Petit, et depuis par plusieurs physiciens, au moyen de nombreuses expériences. On voit combien elle est compliquée, et ce n'est qu'en séparant les effets dus au rayonnement et au contact du gaz qu'on pouvait la découvrir.

940. Remarques. — Les lois de Dulong et Petit, vraies pour le refroidissement dans le vide, ne doivent être considérées, quand on opère dans les gaz, que comme des lois empiriques, se vérifiant dans les circonstances où ces éminents physiciens ont expérimenté, mais devant recevoir quelques modifications lorsque les conditions seront différentes. Remarquons d'abord qu'il est difficile d'admettre que la forme du corps qui se refroidit n'ait pas d'influence sur la quantité de chaleur que lui enlève un gaz, celui-ci agissant surtout par des courants dus à la dilatation des parties qui touchent le corps. Or, si celui-ci était allongé et placé verticalement, le gaz ne lui enlèverait pas autant de chaleur que s'il était horizontal; car, en s'élevant, ce gaz échauffé le préserverait du contact du gaz froid; ce que l'expérience vérifie. Nous allons voir aussi que l'état de la surface intérieure, la forme et les dimensions de l'enceinte ont de l'influence sur le refroidissement produit par le gaz.

A l'époque des expériences de Dulong et Petit, on ne connaissait pas la *thermochrôse*. Or, si le corps qui se refroidit est à une température très-élevée, les rayons qu'il émet sont d'une autre nature que ceux que lui renvoie l'enceinte beaucoup plus froide, et les échanges de chaleur ne se font pas de la même manière que lorsque le corps est au-dessous de 160°. Les lois ne peuvent donc pas être aussi générales qu'on l'a cru d'abord. L'expérience suivante de MM. de la Provostaye et P. Desains met bien en évidence l'influence de la thermochrôse des rayons: on place sous le récipient de la machine pneumatique un thermomètre différentiel dont les boules, très-rapprochées, sont séparées par un petit écran. L'une des boules est dorée, et l'autre couverte de blanc de céruse. Si l'on projette sur ces deux boules les rayons d'une forte lampe, on constate que la boule blanche s'échauffe plus vite que la boule dorée quand le récipient est plein d'air;

mais que le contraire a lieu quand on a fait le vide. Ainsi, dans le vide, l'or, qui réfléchit 0,96 de la chaleur incidente, s'échauffe plus vite que le blanc de céruse dont le pouvoir émissif est égal à celui du noir de fumée, au moins jusqu'à 150°. Ce résultat tient à ce que, si le blanc absorbe dans le même temps environ 5 fois plus de chaleur lumineuse que l'or, il émet 25 fois plus de chaleur obscure; de sorte que, dans le vide, le rapport des vitesses de refroidissement des deux boules est de 25 à 1. Dans l'air, il n'est plus que 1,64, et alors la différence d'absorption n'est plus compensée.

941. EXPÉRIENCES DE MM. DE LA PROVOSTATE ET P. DESAINS¹. — Ces habiles physiciens font remarquer d'abord que la formule donnée par Dulong et Petit n'a pas toute la généralité désirable, car elle suppose que le pouvoir émissif de l'enceinte est absolu, et que sa grandeur n'a pas d'influence; enfin, elle n'a été établie que pour les refroidissements, et l'on ne peut être certain qu'elle soit applicable aux réchauffements. L'appareil employé dans les nouvelles recherches consiste en un ballon de cuivre, noirci en dedans (fig. 674), dont la partie supérieure, soudée à l'étain suivant *ab*, porte un tube latéral à robinet destiné à y faire varier la pression. Le thermomètre est ajusté, au moyen d'un bouchon, dans une tubulure *te*, qui s'enfonce à frottement doux dans le col du ballon, et porte un rebord, qui est serré au moyen d'un collier articulé, *o*, contre un rebord semblable *ef*, qui termine le col du ballon. Enfin, une plaque fendue, adaptée en *e* au bas de la virole, sert à compléter l'enceinte sphérique, quand le thermomètre est en place.



Fig. 674.

Le thermomètre était chauffé dans un moufle, pour éviter le contact des charbons, pendant que des écrans abritaient la tubulure *te*; on l'ajustait rapidement au ballon, on serrait l'anneau *o*, et l'on établissait la pression sous laquelle on voulait opérer. On dressait ensuite le tableau des excès de température et des instants correspondants², et l'on calculait les vitesses de refroidissement pour des excès donnés, au moyen de la formule $T = a \left(\frac{t}{\mu} \right)^t$, (929), en suivant la même marche que Dulong et Petit.

942. Refroidissement dû au gaz. Influence de la surface. — Pour reconnaître si le pouvoir refroidissant d'un gaz dépend de la nature de la surface du corps qui se refroidit, on observait le refroidissement d'un même thermomètre, sous deux pressions très-différentes; puis, retranchant l'une de l'autre

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XVI, p. 337.

² Indépendamment des corrections relatives à la température plus basse de la tige et à la rentrée du mercure froid, il y a à remarquer que la masse de mercure contenue dans le réservoir va en augmentant, et que sa chaleur spécifique diminue avec la température. Ces deux causes d'erreur agissent en sens contraire et doivent se compenser en partie.

les vitesses correspondantes à un même excès de température, on cherchait si les différences restaient les mêmes quand le réservoir était nu ou argenté. Les restes ont été, en général, plus grands pour le thermomètre argenté. L'action refroidissante de l'air dépend donc de la surface, le refroidissement par rayonnement étant supposé le même dans les deux quantités que l'on retranche.

Pour vérifier si la loi du refroidissement dû à un gaz reste la même quand on emploie différentes surfaces, on a opéré sur des thermomètres nus, argentés, dorés et noircis; et l'on a reconnu, en partant de la formule $P = n p^c t^{1,233}$ (937), que le pouvoir refroidissant est bien proportionnel à la puissance 1,233 de l'excès de température, et à une puissance, c , (égale à 0,45 pour l'air,) de la pression;

Voici la méthode employée pour vérifier le premier point : on mesure les vitesses sous deux pressions différentes p, p' pour un même excès de température; on prend la différence de ces vitesses, et l'on a $D = nt^b (p^c - p'^c)$, en posant $b = 1,233$. On répète l'expérience sous les mêmes pressions et pour un autre excès, et l'on a la différence $D' = nt'^b (p^c - p'^c)$. Divisant ces deux différences l'une par l'autre, il vient

$$\frac{D}{D'} = \left(\frac{t}{t'}\right)^b, \quad \text{et} \quad \log \frac{D}{D'} = b \log \frac{t}{t'};$$

$$\text{d'où } b = \log \frac{D}{D'} : \log \frac{t}{t'}$$

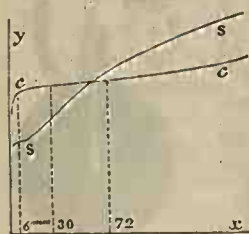


Fig. 675.

La loi est vraie, car, en divisant ainsi le logarithme du rapport des différences, par le logarithme du rapport des excès, on trouve le même résultat, égal à 1,233.

Pour vérifier la constance de l'exposant c , on prend trois vitesses totales, sous trois pressions p, p', p'' , et pour un même excès de température. On retranche de la première pression, successivement les deux autres, ce qui donne les différences $nt^b (p^c - p'^c)$, $nt^b (p^c - p''^c)$; en les divisant l'une par l'autre, on a le rapport $\frac{p^c - p'^c}{p^c - p''^c}$, indépendant de l'excès de température.

L'expérience montre qu'il en est ainsi dans l'air, en prenant $c = 0,45$, excepté pour les pressions très-faibles, inférieures à 6 ou 7^{mm}. Dans ce cas, le temps du refroidissement, d'un même nombre de degrés est le même pour les pressions de 2^{mm},8 et de 6^{mm}. Ce résultat se voit sur la courbe ss (fig. 675), dont les abscisses représentent les pressions, et les ordonnées, les vitesses de refroidissement. La formule de Dulong et Petit ne s'applique donc plus au cas des très-faibles pressions. La valeur de la constante n s'obtient en égalant l'expression $n (p^{0,45} - p'^{0,45}) t^{1,233}$ à la différence des vitesses mesurée directement dans l'air; on a alors une équation d'où l'on tire la valeur de n . En

prenant les moyennes d'un grand nombre de résultats obtenus par ce moyen, on a trouvé $n = 0,0003224$ pour le thermomètre argenté, et $n = 0,0003118$ pour le thermomètre à surface nue. La différence entre ces nombres confirme l'influence de l'état de la surface sur le pouvoir refroidissant de l'air.

943. Refroidissement par le rayonnement seul. — Pour obtenir le refroidissement dans le vide, on retranche de la vitesse totale, celle qui est due à l'air, calculée par la formule vérifiée $P = np^2 t^b$. On a trouvé ainsi que la formule $V = ma^a (a^t - 1)$ s'applique exactement quand on emploie un thermomètre à surface vitreuse ou noircie. Mais pour un thermomètre doré ou argenté, la valeur de m , que l'on regarde comme proportionnelle au pouvoir émissif, varie, et à peu près proportionnellement à la température; de sorte qu'il semble que le pouvoir rayonnant augmente avec la température, pour les surfaces métalliques. Dans toutes ces expériences, on a eu soin de dorer ou argenter la partie de la tige qui se trouvait dans le ballon; sans cela, le pouvoir émissif du verre étant très-grand, le refroidissement rapide de la tige aurait altéré notablement les résultats.

944. Influence de l'enceinte. — Après avoir ainsi vérifié les formules de Dulong et Petit, MM. de la Provostaye et P. Desains ont étudié d'abord l'influence de la grandeur et de la forme de l'enceinte, sur deux ballons sphériques noircis, de 24^{cm} et de 15^{cm} de diamètre, et sur un vase cylindrique de 6^{cm} de diamètre et de 20^{cm} de hauteur. Dans le petit ballon, le refroidissement total dans l'air est plus rapide que dans le grand, quel que soit l'état de la surface du thermomètre, et les différences sont d'autant plus prononcées que la pression est plus faible. Au-dessus de 20^{cm} de pression, la différence est très-petite. Sous la pression de 6^{mm}, le thermomètre doré mettait, pour s'abaisser d'un certain nombre de degrés, 40^m 10^s,5 dans le grand ballon, et 33^m 56^s, dans le plus petit.

On peut expliquer ces résultats en remarquant que, dans le petit ballon, le gaz en mouvement a moins de chemin à parcourir pour aller du thermomètre à la paroi et revenir de celle-ci au thermomètre pour lui enlever une nouvelle quantité de chaleur.

Dans l'enceinte cylindrique, le refroidissement est plus rapide que dans le grand ballon, depuis la pression 760^{mm} jusqu'à 45^{mm} environ, et c'est l'inverse pour les pressions plus faibles. Ce résultat se voit sur la courbe *cc* (fig. 675) qui correspond à l'enceinte cylindrique. On voit que la vitesse est sensiblement constante, de la pression de 15^{mm} à 70^{mm} environ; tandis que, dans l'enceinte sphérique, elle varie beaucoup entre les mêmes limites de pressions comme l'indique la courbe *ss*. Pour vérifier ce résultat, on observait la vitesse du refroidissement dans le cylindre, sous la pression de 70^{mm}; puis, on constatait que la marche du refroidissement n'était pas modifiée quand cette pression était abaissée à 15^{mm}.

Il résulte de ce qui précède que, lorsqu'on change les dimensions et la forme des enceintes, la loi du refroidissement par l'air se complique, surtout pour les

pressions très-faibles; en admettant, ce qui est très-probable, d'après des expériences faites à ce sujet, que l'effet dû au rayonnement est indépendant de la grandeur des enceintes. Du reste, le refroidissement dû à l'air semble pouvoir toujours être représenté par une expression de la forme $A p^c$, mais l'exposant c change avec la pression. Quant au pouvoir refroidissant de l'air dans l'enceinte cylindrique, il ne peut plus être représenté par la formule $np^{0,45}p^{1,233}$, même en modifiant les exposants.

945. Cas de divers gaz. — Nous avons vu (942) que le pouvoir refroidissant de l'air est indépendant de la pression au-dessous de 6 à 7^{mm}, dans un ballon de 24^{cm} de diamètre. Cette limite semble être d'autant plus élevée que le ballon est plus petit. On a constaté un phénomène semblable dans d'autres gaz. Des expériences faites avec un thermomètre argenté, dans une enceinte cylindrique noircie, ont montré que, dans le gaz hydrogène, le temps du refroidissement augmente à peine de $\frac{1}{12}$ de sa valeur, quand la pression passe de 760^{mm} à 60^{mm}, et d'un peu moins de $\frac{1}{12}$ quand elle passe de 60^{mm} à 20^{mm}. De manière qu'en passant de la pression de 760^{mm} à une pression 38 fois plus faible, la vitesse du refroidissement diminue dans le rapport de 7 à 6 seulement. Ce rapport serait de 3 à 1 pour l'air, dans la même enceinte et sous les mêmes pressions. Dans l'hydrogène, la vitesse devient moitié moindre à 4^{mm} qu'à 20^{mm} de pression, et la part de ce gaz dans le refroidissement, sous cette faible pression, est encore énorme; car la vitesse totale est plus grande, dans le rapport de 4 à 3 environ, que celle qu'on observe dans l'air sous la pression de 760^{mm}. Dans l'acide carbonique, la vitesse diminue jusqu'à ce que la pression ait atteint 35^{mm}, puis elle reste constante jusqu'à 12^{mm}; et, sous la pression de 4^{mm}, elle est plus grande que sous celle de 35^{mm}. Ce résultat inattendu, vérifié avec grand soin, se reproduit pour le protoxyde d'azote, dont la densité et la chaleur spécifique sont à peu près les mêmes que celles de l'acide carbonique; aussi les pouvoirs refroidissants de ces deux gaz sont-ils à peu près égaux.

Pour expliquer ces résultats, on peut remarquer que le pouvoir refroidissant d'un gaz dépend de sa densité et de sa mobilité, éléments qui varient en sens inverse quand on diminue la pression, et l'on conçoit que les effets puissent tantôt se compenser, tantôt se surpasser dans un sens ou dans l'autre. Une circonstance vient à l'appui de cette manière de voir: si l'on mêle à du gaz hydrogène, sous la pression de 30^{mm}, de l'air en volume égal, de manière à amener cette pression à 60^{mm}, le pouvoir refroidissant du mélange est moindre que celui de l'hydrogène seul. Ainsi, l'air introduit diminue le pouvoir refroidissant de l'hydrogène, au lieu d'y ajouter le sien; ce qui peut s'expliquer en admettant que la présence de l'air diminue la mobilité du gaz, à un point tel que le changement de densité ne peut compenser l'influence de cette diminution.

Il résulte de ce qui précède que la courbe *ss* (fig. 675), qui représente les vitesses totales dans l'air, présente une ou plusieurs inflexions dans les autres gaz, quand les pressions sont faibles. On voit, de plus, qu'on ne peut regarder comme négligeable l'effet d'un gaz sous une pression très-petite, puisque sous

la pression de 4^{mm} , le pouvoir refroidissant de l'hydrogène est supérieur à celui de l'air sous la pression de 760^{mm} . Lors donc que, pour corriger la vitesse observée dans le vide, on retranche l'effet de la petite quantité d'air qui reste, en calculant cet effet au moyen de la formule de Dulong et Petit, on fait une correction inexacte, cette formule ne s'appliquant plus aux très-faibles pressions, et l'influence du gaz très-raréfié pouvant n'être pas négligeable. De là aussi l'incertitude de la méthode par laquelle on voudrait mesurer les pouvoirs émissifs par le refroidissement, et l'explication de l'inexactitude du rapport trouvé par Dulong et Petit entre les pouvoirs émissifs du verre et de l'argent (935). De plus, on peut altérer un peu les valeurs des constantes m et n de la formule générale (939) sans changer sensiblement les vitesses de refroidissement qu'on en déduit.

9-16. Influence de la surface de l'enceinte. — C'est afin de pouvoir modifier la surface intérieure du ballon, qu'on l'avait formé de deux parties soudées à l'étain suivant la ligne *ab* (fig. 674). Les expériences ont été faites principalement avec l'intérieur garni de *noir de fumée* ou d'*argent*. Le pouvoir refroidissant d'un gaz ne paraît pas dépendre de l'état de la surface de l'enceinte. Dans le cas du thermomètre *nu*, la loi du refroidissement produit par rayonnement reste la même quand l'enceinte est argentée; seulement, les pertes par rayonnement sont réduites à peu près de moitié. On pouvait facilement prévoir cette diminution, puisque la surface argentée renvoie, par voie de réflexion, au thermomètre, une partie de la chaleur intense que ce dernier rayonne vers elle. Lorsque, au contraire, le thermomètre est couvert d'une feuille métallique, on trouve que son refroidissement est *indépendant* de l'état de la surface de l'enceinte. Ce résultat peut s'expliquer par le faible pouvoir absorbant de l'argent, qui rend insensible l'effet dû à la plus ou moins haute température des rayons que réfléchit l'enceinte. Au contraire, le moindre changement dans le pouvoir réflecteur de cette enceinte influence notablement le refroidissement d'une surface vitreuse. Ces considérations montrent une fois de plus combien est peu exacte la méthode du refroidissement, appliquée à la comparaison des pouvoirs émissifs des différents corps.

Une autre circonstance à remarquer, c'est qu'un thermomètre couvert d'une couche d'argent sur laquelle est déposé du noir de fumée, se refroidit moins vite dans le vide que lorsque le noir de fumée est appliqué immédiatement sur le verre. Ce fait a été vérifié directement au moyen d'un ballon de verre rempli de mercure chaud et placé en présence de la pile thermo-électrique. Ce ballon était recouvert de noir de fumée, et sur une ses moitiés, le noir était séparé du verre par une feuille d'argent. En tournant tantôt cette moitié et tantôt l'autre du côté de la pile, on voyait l'aiguille du rhéomètre se déplacer, quelquefois d'un degré entier. Ce fait jette de nouvelles incertitudes sur les déterminations des pouvoirs émissifs. Voici quelques-uns des résultats trouvés par MM. de la Provostaye et P. Desains par la méthode du refroidissement, pour les rapports, m , des pouvoirs émissifs du noir de fumée, de verre et de l'argent :

		RAPPORT DES VALEURS DE m .	
		à toute température.	
Thermomètre à réservoir <i>cylindrique</i>	{ vitré.	0,909	
	{ noirci.		
Thermomètre à réservoir <i>cylindrique</i>	{ argenté.	à 150°	à 63°
	{ vitré.	0,132	0,171
Thermomètre à réservoir <i>sphérique</i>	{ argenté.	à 105°	à 48°
	{ vitré.	0,170	0,199

On voit que, pour le thermomètre argenté, le pouvoir émissif augmente quand la température diminue, comme nous l'avons dit plus haut (943).

947. Lois du réchauffement. — Les formules de Dulong et Petit avaient été regardées, par analogie, comme s'appliquant à l'échauffement des corps, aussi bien qu'à leur refroidissement; mais on n'avait aucune expérience directe à ce sujet. La loi de Newton avait cependant été reconnue exacte, dans une expérience de Rumfort sur l'échauffement d'un vase de lait dans une chambre à 10° environ au-dessus de la température de ce vase. MM. de la Provostaye et P. Desains ont étudié directement le réchauffement d'un thermomètre, dans leur ballon noirci de 15^{cm} de diamètre, entretenu à une température constante par de la vapeur d'eau bouillante. Pour empêcher les corps gras qui se trouvent au point de jonction du thermomètre d'entrer en fusion, le ballon était muni d'un long col dont la partie supérieure était entourée d'eau froide. Comme le thermomètre s'échauffait pendant qu'on faisait le vide ou qu'on disposait l'appareil, on n'a pu opérer que dans un intervalle de 40°.

On a reconnu ainsi que le réchauffement dû à l'air suit les mêmes lois que le refroidissement, et est représenté par la même formule, excepté encore pour les faibles pressions (942). Le réchauffement dans le vide suit aussi les mêmes lois que le refroidissement, et est représenté par la même formule $V = ma^t (a^t - 1)$, en changeant le signe de t . Les deux phénomènes peuvent donc être représentés par la formule

$$V = ma^T - ma^{T'}$$

dans laquelle T représente la température du thermomètre, et T' celle de l'enceinte dans le cas du refroidissement; T' celle du thermomètre, et T celle de l'enceinte dans le cas du réchauffement.

Il est à remarquer que la valeur de m n'est pas la même dans les deux cas. Des expériences nombreuses ont prouvé qu'elle est moindre dans le cas du réchauffement, et que le corps se réchauffe moins promptement dans le vide qu'il ne se refroidit, pour une même différence de température avec l'enceinte. Le rapport des deux vitesses a été trouvé de 1,039; 1,0797; 2,153; quand

les valeurs de t étaient de 5° , 10° , 500° . La présence de l'air ne fait que modifier les différences, et peut même les rendre plus sensibles.

948. Expériences de MM. Jamin et Richard¹. — Pour obtenir le refroidissement produit par un gaz, on retranche du refroidissement total celui que produit le rayonnement, calculé tel qu'il a lieu dans le vide. Mais il est difficile d'admettre que la présence du gaz ne modifie pas ce rayonnement, surtout depuis que l'on sait que les gaz ne sont pas parfaitement diathermanes (867). En outre, le gaz n'est pas, comme on le suppose tacitement, à la température de l'enceinte; il s'échauffe au contact du thermomètre central, cède sa chaleur à l'enceinte et, si l'on suppose que le thermomètre ne varie pas, le gaz finit par rester stationnaire quand il perd à chaque instant autant de chaleur qu'il en reçoit. L'expérience montre que cet échauffement du gaz est d'autant plus prononcé que sa pression est plus faible et que l'enceinte est plus petite. De là, l'explication des anomalies trouvées par MM. de la Provostaye et Desains, dans leur petit ballon, et sous les faibles pressions (944).

Après avoir fait ces diverses remarques, MM. Jamin et Richard ont entrepris de nouvelles expériences sur le refroidissement dû aux gaz, par la méthode suivante, qui donne ce refroidissement sans qu'on ait besoin de connaître l'effet du rayonnement : Quand le gaz a atteint son état stationnaire de température, il enlève à chaque instant au corps chaud autant de chaleur qu'il en cède à l'enceinte. Si donc on connaissait celle-ci, le problème serait résolu; ce qui a conduit naturellement à chercher d'abord la loi du refroidissement d'un gaz renfermé dans une enceinte à température constante.

Lois du refroidissement d'un gaz. — L'appareil employé pour chercher ces lois consiste en un ballon de verre ayant 32^{cm} de diamètre, plongé dans de l'eau à 0° agitée par l'injection d'un courant d'air. Ce ballon communique, par un tube à robinet, avec un flacon plongé dans le même bain, et avec une des branches d'un manomètre différentiel formé d'un tube en U contenant de l'eau, et dont l'autre branche communique avec le flacon. Après avoir introduit le gaz dans les deux vases sous une pression p donnée par un manomètre à mercure, on ferme le robinet de communication, puis on échauffe le gaz en faisant rougir, au moyen d'un courant électrique, une spirale de platine, de masse négligeable, qui traverse le ballon suivant un diamètre horizontal. Le gaz se dilate, sa pression augmente d'une quantité h donnée en eau par le manomètre différentiel. Quand cette pression n'augmente plus, on supprime le courant, la spirale se refroidit en une dizaine de secondes, et l'on observe alors les valeurs de h , de 5 en 5 secondes. On en déduit les vitesses de diminution de pression, et, par suite, les vitesses de refroidissement, car les valeurs de h sont toujours proportionnelles aux excès t de température du gaz sur l'enceinte. En effet, si le gaz se dilatait librement, son volume v à 0° deviendrait $v(1 + at)$ après un échauffement de t° , sous la pression p , a étant la dilatation de l'unité de volume du gaz pour 1° .

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXV, pp. 405 et 453.

Si l'on ramène ce volume à la valeur v , la pression devient $p + h$, et l'on a, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{v(1 + at)}{v} = \frac{p + h}{p}; \quad \text{d'où} \quad h = tap.$$

On a reconnu d'abord que le refroidissement est d'autant plus rapide que la pression primitive est plus faible.

Il résulte des expériences faites sur l'hydrogène, l'air et le gaz oléfiant, que la vitesse de refroidissement d'un gaz renfermé dans une enceinte à température constante, est donnée par la formule $V = n' p^c t^b$ donnée par Dulong et Petit pour exprimer le refroidissement produit par un gaz sur leur thermomètre central (937). Les exposants c et b , les mêmes pour tous les gaz, sont ceux qu'a trouvés Dulong pour les corps solides; le coefficient n' est différent, mais garde les mêmes rapports que dans les expériences de Dulong et Petit.

La quantité de chaleur perdue par le gaz qui se refroidit, pendant l'unité de temps est donnée par la formule

$$q = SK p^c h^b, \quad [1]$$

dans laquelle h est l'excès de pression produit, S la surface intérieure du ballon, et K un coefficient qui dépend de la nature du gaz.

Chaleur enlevée par un gaz. — Cela fait, il s'agissait de trouver la chaleur qu'une masse gazeuse enlève à un corps chaud qui y est plongé. L'appareil restant le même, on introduit le gaz dans le ballon, sous une pression connue, et l'on fait passer dans la spirale centrale un courant électrique qui la maintient à une température constante. Quand la pression du gaz n'augmente plus, on calcule, au moyen de la formule [1], la quantité de chaleur qu'il cède à l'enceinte. Cette quantité étant égale à celle qu'il enlève à la spirale de platine, celle-ci est dès lors connue.

Pour obtenir la loi du refroidissement dû au gaz, il reste à évaluer l'excès t de température de la spirale centrale. Ce nombre se déduit de la résistance que cette spirale oppose au passage du courant électrique. M. Benoit a reconnu que, pour un fil de platine, cette résistance croît proportionnellement à la température; de sorte que, si l'on désigne par r_0 la résistance à 0° , et par μ la quantité dont elle augmente pour 1° , les accroissements de résistance, pour 0° et $(t + \theta)^\circ$, seront $r_0 \mu \cdot 0$, et $r_0 \mu (t + \theta)$. Les résistances r et r' , à 0 et à $t + \theta$ degrés seront donc

$$r = r_0 [1 + \mu \cdot 0], \quad r' = r_0 [1 + \mu (t + \theta)]; \quad \text{d'où} \quad r' - r = r_0 \mu t.$$

L'excès de température cherché t est donc proportionnel à l'accroissement de résistance. Celle-ci se mesure par des méthodes que nous décrirons plus tard en

traitant des propriétés des courants (Tome III). On peut, du reste, représenter les excès par $r' - r$, sans connaître r_0 et μ , ce qui revient à changer le point de départ de l'échelle thermométrique.

Par cette méthode directe, MM. Jamin et Richard ont retrouvé la loi de Dulong et Petit pour le refroidissement des gaz (937), loi qui se trouve ainsi confirmée par une méthode tout-à-fait différente.

949. Thermomètre dans une enceinte à température non uniforme.—

Proposons-nous de calculer la température finale T que prendrait un thermomètre, dans une enceinte dont toutes les parties n'auraient pas la même température. Soit $\theta, \theta', \theta'' \dots$ les températures des différentes portions de l'enceinte, correspondantes à des *capacités de cône* (924) $\alpha, \beta, \gamma \dots$, quantités qui sont des fractions d'une surface sphérique ayant pour rayon l'unité. Supposons d'abord que l'enceinte soit vide et qu'il n'y ait pas de pouvoir réflecteur. La quantité absolue de chaleur rayonnée par le thermomètre sera ma^T (935). Celle qu'il recevra des différentes parties de l'enceinte sera $m\alpha\theta + m\beta\theta' + \dots$. De sorte que, pour qu'il reste stationnaire, on devra avoir

$$ma^T = m\alpha\theta + m\beta\theta' + \dots, \quad \text{ou} \quad a^T = \alpha\theta + \beta\theta' + \dots,$$

équation dont on pourra tirer la valeur de la température finale T .

Si le thermomètre possède un pouvoir réflecteur, m sera plus petit et devra être remplacé par $m : r$. Mais comme le pouvoir absorbant est égal au pouvoir émissif, le thermomètre n'absorbera que la fraction $1 : r$ de la chaleur émise par l'enceinte, et l'équation restera la même. Le résultat ne dépend donc pas du pouvoir émissif du thermomètre.

S'il y a de l'air dans l'enceinte, il faudra ajouter la quantité P de chaleur qu'il enlève, à celle que rayonne le thermomètre, et l'équation deviendra

$$\frac{m}{r}a^T + P = \frac{m}{r}(\alpha\theta + \beta\theta' + \dots);$$

Comme P varie avec la nature de la surface du thermomètre, autrement que le pouvoir émissif, on voit que la valeur de T dépendra de ce pouvoir. C'est pour cela que deux thermomètres d'égale dimension, l'un noir et l'autre argenté, et exposés aux rayons d'une même source, atteignent des températures stationnaires différentes. Si l'on regarde P comme constant, ce qui a lieu quand on ne dépasse pas les limites de la loi de Newton, il en est encore de même.

Dans le cas où la loi de Newton est applicable, on peut démontrer directement ce résultat : soit S la quantité de chaleur qu'envoie la source de chaleur aux deux thermomètres placés à la même distance; a et n les pouvoirs absorbants de leurs surfaces, égaux aux pouvoirs émissifs; et t et t' les excès de leurs températures sur l'air extérieur quand ils sont devenus stationnaires. Les quantités de chaleur reçues, pendant le même temps, par les deux

instruments, seront Sa et S_n , et les quantités de chaleur perdues seront, d'après la loi de Newton, $kat + ct$, et $kn't' + ct'$; k étant un coefficient qui dépend de l'étendue de la surface des thermomètres et de leur masse, et ct , ct' les quantités de chaleur enlevées par l'air, proportionnelles aux excès t et t' . La quantité de chaleur reçue devant être égale, quand il y a équilibre, à celle qui est perdue, on a

$$Sa = kta + ct, \quad S_n = kn't' + ct',$$

$$\text{d'où} \quad \frac{a}{n} = \frac{t(ka + c)}{t'(kn + c)}, \quad \text{et} \quad \frac{t}{t'} = \frac{kan + ca}{kan + cn}.$$

On voit que, si n est plus grand que a , t' sera plus grand que t . Dans le vide, on aurait $c = 0$ et $t = t'$.

CHAPITRE III

CONDUCTIBILITÉ DES CORPS POUR LA CHALEUR

Permanat calor argentum, penetraque frigus;
Quando utrumque manu, retinentes pocula rite
Sensimus, infuso lympharum rore superne.

LUCRETII, *De rerum naturâ* (lib. 1).

§ 1. — CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES

I. Conductibilité dans les solides homogènes.

950. — La chaleur peut se propager lentement à travers les corps, de molécule à molécule, et avec une vitesse variable qui dépend de leur nature. L'existence de ce mode de propagation peut être mise en évidence par une foule d'expériences : la chaleur du feu contenue dans un poêle se fait bientôt sentir au dehors ; si l'on verse de l'eau bouillante dans un vase, sa surface extérieure devient brûlante ; une barre de fer s'échauffe à l'une de ses extrémités quand l'autre plonge dans un foyer, malgré la précaution que l'on prend de placer un écran qui empêche la chaleur du foyer de rayonner vers cette barre. Cette propriété est connue sous le nom de *conductibilité*, *conduction*, ou *pouvoir conducteur*. Les différents corps ne conduisent pas également la chaleur ; les

anciens en avaient fait la remarque, et l'on doit à Aristote quelques expériences à ce sujet. C'est surtout sur la conductibilité dans les solides qu'ont porté les travaux des physiciens et des mathématiciens. Voyons d'abord comment on explique la propagation de la chaleur dans l'intérieur d'un corps homogène.

951. Explication de la conductibilité. — Supposons un corps dont on échauffe une partie. Les molécules échauffées vont rayonner de tous côtés et lancer de la chaleur à celles, plus froides, qui les avoisinent. Celles-ci, échauffées au moyen de la partie de cette chaleur qu'elles absorbent, la rayonnent vers celles qui viennent ensuite, lesquelles s'échauffent à leur tour; et ainsi de suite de proche en proche. Ce mode de propagation est une conséquence du principe du *rayonnement particulaire* (900). La vitesse avec laquelle une molécule perd sa chaleur pour la céder aux molécules voisines, dépend de l'excès de sa température sur celle de ces dernières. Si donc T et t sont les températures de deux molécules voisines M et m , la molécule m recevra de M , une quantité de chaleur égale à $kF(T-t)$, k étant une constante qui dépend de la distance Mm et de la nature des molécules. Si le corps n'était pas homogène, la distance Mm varierait avec la direction de la ligne Mm , et la quantité de chaleur qui passerait dans différentes directions ne serait pas la même. Nous verrons plus loin (969) que l'expérience confirme cette prévision de la théorie.

Fourier, qui a traité par l'analyse la question de la conductibilité, a admis que la loi de Newton s'applique aux molécules, très-rapprochées, dont la différence de température ne peut être qu'excessivement petite; de sorte que la quantité de chaleur envoyée d'une molécule à une autre est $k(T-t)$. A l'époque où écrivait Fourier, l'on ne savait pas que la vitesse du refroidissement dépend de la température absolue du corps qui se refroidit. Cependant, les lois trouvées par Fourier ont été vérifiées par l'expérience, ce qui peut être regardé comme une justification *à posteriori* de son point de départ, et l'on a continué d'appliquer la loi de Newton aux molécules voisines, quelle que soit leur température absolue. Du reste, cette supposition n'implique pas contradiction avec les lois trouvées par Dulong et Petit, l'état relatif de deux molécules n'étant pas comparable à celui de deux corps de dimensions finies, rayonnant l'un vers l'autre.

Voici comment la conduction s'explique dans la théorie mécanique de la chaleur. Les molécules de la surface du corps, directement échauffées et dont l'amplitude des vibrations est ainsi augmentée, communiquent cet effet aux molécules voisines, par l'intermédiaire de l'éther qui les sépare; celles-ci agissent à leur tour sur les suivantes, et ainsi de suite, de manière que, si la chaleur ne se perd en aucun point de la surface du corps, l'état d'équilibre de température s'établit au bout d'un temps qui dépend, entre autres, du volume du corps et de la nature de ses molécules. Si la chaleur apportée du dehors transmet facilement ses vibrations à travers l'éther intermoléculaire sans ébranler les molécules, auquel cas le corps est très-diathermane (892), le phénomène de la conduction n'aura pas lieu de se produire; et l'on remarque en effet que les corps mauvais conducteurs sont généralement diathermanes ou transparents.

952. Comparaison des pouvoirs conducteurs des solides. — Quand on ne veut que comparer les pouvoirs conducteurs des solides, on se sert de l'appareil (fig. 676) nommé *appareil d'Ingenhousz*. Les corps dont on veut comparer les conductions sont mis sous forme de baguettes cylindriques de même diamètre, implantées dans une face latérale *aa* d'une caisse métallique, dont elles traversent l'épaisseur. On enduit ces baguettes d'une mince couche de cire et l'on remplit la caisse d'eau bouillante. La chaleur se propage dans les baguettes, et la cire fond partout où la température atteint au moins 55° ; et l'on admet que plus est long l'espace sur lequel la cire est fondue, plus est grande la conductibilité de cette baguette.

Cette méthode a été imaginée par Franklin et par Ingenhousz, qui plongeaient simplement le bout des baguettes dans de l'huile chaude. Mais l'air dilaté qui s'élevait au-dessus du liquide apportant de la chaleur aux baguettes, Gay-Lussac disposa l'appareil comme nous venons de le voir.

M. Tyndall fait remarquer que l'appareil d'Ingenhousz peut donner des résultats erronés, les divers corps n'ayant pas la même *capacité* pour la chaleur, c'est-à-dire ayant besoin de *quantités de chaleur* différentes pour s'échauffer de 1° , (819). Le temps qu'il faudra pour que la chaleur produise la température de 55° , à une distance donnée sur une baguette, sera donc d'autant plus long, toutes circonstances égales d'ailleurs, que la *capacité calorifique* de la substance sera plus grande. M. Tyndall met ce fait en évidence par une expérience frappante : Deux prismes égaux, l'un de *fer*, l'autre de *bismuth*, dont une des bases est enduite de cire, sont posés, par l'autre base sur une plaque très-chaude. La cire fond d'abord

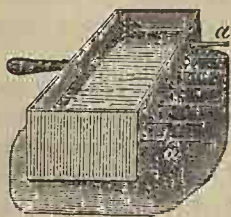


Fig. 676.

sur le *bismuth*, quoiqu'il soit 6 fois moins bon conducteur que le fer. C'est que la *capacité* du fer pour la chaleur est plus de 6 fois celle du bismuth.

Il y aurait donc à considérer deux sortes de *conductibilités*, l'une définie par la rapidité avec laquelle la chaleur se transporte dans un corps, de manière à apporter une température donnée à une certaine distance du point échauffé, celle-ci dépend de la *capacité* du corps pour la chaleur; l'autre représentée par la quantité de chaleur qui passe d'une tranche à la suivante, après que le corps a reçu toute la chaleur qu'il peut contenir et que la température est devenue constante en chacun de ses points. C'est de cette dernière façon que les physiciens et les géomètres ont considéré la *conductibilité*. Les méthodes que nous allons décrire remplissent presque toutes les conditions nécessaires pour en obtenir une évaluation.

953. Thermomètre de contact. — Quand les corps à étudier ne peuvent être mis sous la forme de baguettes, comme les étoffes, les matières filamenteuses, on compare leurs conductibilités au moyen du *thermomètre de contact* de Fourier. Cet instrument consiste en un thermomètre *t* (fig. 677), ajusté au col

d'un vase conique *a*, fermé en-dessous par une membrane de vessie, et rempli de mercure. Le corps dont on veut apprécier le pouvoir conducteur est mis en forme de lame, que l'on pose sur une table chauffée à une température constante; par exemple sur une caisse de métal dans laquelle on fait passer un courant de vapeur. On applique le thermomètre sur cette lame, la chaleur la traverse, se transmet au mercure et de là au thermomètre, qui, perdant une quantité de chaleur proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'air, finit par devenir stationnaire. Il reçoit alors autant de chaleur qu'il en perd; la quantité de chaleur qui passe dans un temps donné à travers la lame interposée, est donc aussi proportionnelle à l'excès de la température du thermomètre sur celle de l'air. On pourra donc, en opérant sur divers corps d'égale épaisseur et assez étendus pour dépasser notablement la base du vase *a*, comparer les pouvoirs conducteurs de ces corps.

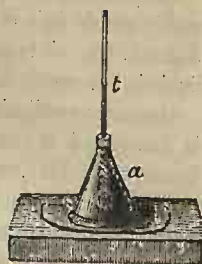


Fig. 677.

954. Résultats. — On a reconnu par ces divers moyens que les corps qui conduisent le mieux la chaleur sont généralement les plus denses, par conséquent la plupart des métaux; et parmi les métaux, les moins denses et les moins fusibles, sont les moins bons conducteurs. Après ces métaux viennent les substances pierreuses, le marbre, l'argile cuite, et les substances organiques, la corne, l'ivoire, la baleine, les bois secs, surtout les moins denses. Le verre, le soufre, les résines sont de très-mauvais conducteurs; on peut tenir un tube de verre sans se brûler très-près du point où il est en fusion.

La conduction des substances textiles est très-faible; elles sont placées dans l'ordre suivant : soie, laine, coton, lin, chanvre, la soie conduisant le moins. Nous verrons que la liste des corps rangés par ordre de conductibilité pour la chaleur est la même que celle de la conductibilité pour l'électricité.

On peut se rendre compte de la relation qui existe entre la conductibilité et la densité, en observant que, dans les corps les plus denses, il y a généralement plus de molécules dans un espace donné, et par suite plus de points matériels par lesquels la chaleur peut se propager de proche en proche. La nature des molécules a, du reste, aussi son influence; par exemple, le plomb est moins bon conducteur que le fer, le zinc, qui ont une densité moindre; l'or, le platine sont moins bons conducteurs que l'argent, qui est le plus conducteur de tous les corps.



Fig. 678.

Pour montrer le grand pouvoir conducteur des métaux, on applique sur une

masse de métal poli, une fine toile sur laquelle on appuie un charbon ardent (fig. 678). La toile ne brûle pas, la chaleur qu'elle reçoit lui étant aussitôt enlevée par le métal, qui la répand rapidement dans toute sa masse.

On peut encore appliquer une feuille de papier sur un cylindre, dont une moitié est de bois et l'autre de métal, et plonger ce cylindre dans une flamme d'alcool. On voit le papier fumer et se carboniser partout où il est appliqué sur du bois, et rester intact sur le métal.

On attribue ordinairement la propriété qu'ont les *toiles métalliques* d'intercepter la flamme, à la conductibilité du métal; mais nous verrons, en étudiant la flamme (ch. VII), que cette explication est insuffisante.

C'est à cause de leur bonne conductibilité que les métaux nous paraissent plus froids que d'autres corps, bois, étoffes, à la même température; la chaleur enlevée à la main se répandant dans leur masse de manière qu'une nouvelle quantité est aussitôt soustraite. De même un métal chaud produit une impression de chaleur plus vive qu'un corps mauvais conducteur de même température. L'état des surfaces peut modifier ces différences d'impression, le nombre des points en contact avec la main variant suivant que le corps est plus ou moins bien poli.



Fig. 679.

955. Conductibilité du charbon. — Le charbon conduit assez bien la chaleur *quand il a été calciné*; autrement, il est mauvais conducteur. Cette différence curieuse, qui se remarque aussi dans la conductibilité électrique, doit tenir à une différence de structure. Cette supposition est confirmée par les expériences de M. Violette, qui a reconnu que le charbon de bois de bourdaine conduit d'autant mieux qu'il a été obtenu à une plus haute température. Fabriqué à 200° et à 1500°, il a donné les conductibilités 0,595, et 0,663, par rapport au fer. La plombagine artificielle des cornues à gaz a donné le nombre 84,7, peu différent de celui que donne le fer, et supérieur à celui de l'étain et du plomb. M. Violette enfonçait à frottement un thermomètre dans la base d'un cylindre *c* (fig. 679) de la substance à essayer, cylindre dont il plongeait l'extrémité opposée dans du mercure *m*, dont la température était maintenue constante par un courant de vapeur arrivant par le tube *T*, et il observait les températures stationnaires que prenait le thermomètre. Cette méthode n'est pas très-précise, comme le remarque M. Violette, car elle donne les mêmes résultats pour le fer et pour le cuivre, dont les conceptions diffèrent notablement; mais elle était seule praticable sur les petits fragments dont on disposait.

956. LOIS DES TEMPÉRATURES DANS UN MUR. — Les méthode que nous avons citées ne donnent pas, en nombre, les rapports des pouvoirs conducteurs des corps. La proportionnalité des conductibilités aux excès indiqués par le thermomètre de contact, n'est pas exacte, parce que la loi de Newton n'est qu'approchée, et qu'il s'ajoute de la chaleur passant par les parties de la lame qui sont près de celles que recouvre l'instrument. Pour comparer numériquement

les conductibilités des différents corps, les géomètres ont considéré principalement les deux cas les plus simples : 1° la propagation dans une barre chauffée à une extrémité; 2° le passage à travers un mur indéfini, dont les faces sont à des températures constantes. Nous allons d'abord nous occuper de ce dernier cas.

Considérons un mur indéfini AA'B'B (fig. 680) dont les deux faces sont entretenues à des températures constantes a et b , divisons-le en tranches parallèles infiniment minces, et supposons $a > b$. Si la température du mur est d'abord partout égale à b , la chaleur de la face A se transmettra à la tranche voisine; celle-ci échauffera de même la tranche suivante, et ainsi de suite jusqu'à la face BB', où la chaleur sera enlevée par la cause qui empêche la température b de varier. Au bout d'un temps plus ou moins long, chaque tranche possédera une température constante, et quand il en sera ainsi, elle recevra autant de chaleur qu'elle en cédera à la suivante, laquelle cédera aussi ce qu'elle aura reçu; de manière que la quantité de chaleur qui traversera chacune des tranches, pendant un temps donné, sera la même pour toutes. Nous allons démontrer que cette condition est satisfaite quand les températures des couches successives forment une progression arithmétique.

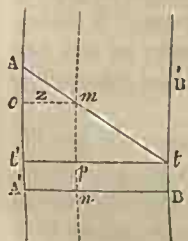


Fig. 680.

Cherchons d'abord, en partant de cette loi, la température d'une tranche quelconque mn . Représentons par AA', et Bt (fig. 680) les températures a et b . Si nous joignons les points A et t par une ligne droite, d'après la loi énoncée, la température de la tranche mn sera représentée par l'ordonnée nm .

Cette température sera donc $mn = \overline{AA'} - \overline{Ao} = a - \overline{Ao}$. Or les triangles semblables Aom, A't', donnent $\overline{Ao} = \overline{A't'} \frac{om}{t't'} = (a - b) \frac{z}{e}$, en représentant par e l'épaisseur du mur, et par z la distance om du plan mn à la face la plus chaude AA'. On a donc

$$\overline{mn} = a - (a - b) \frac{z}{e}. \quad [1]$$

Cela posé, pour montrer que la quantité de chaleur qui traverse une tranche est indépendante de sa position, considérons deux plans L, L' (fig. 681), et deux couples de molécules n, m et n', m' placés deux à deux très-près l'une de l'autre, et de la même manière de part et d'autre de chacun de ces plans. Soient T, t et T', t' les températures de ces molécules, et ζ la différence des valeurs de z dans chaque couple. En retranchant l'une de l'autre les valeurs de T et t données par la formule [1], on trouve $T - t = \frac{a-b}{e} \zeta$. On a de

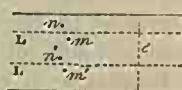


Fig. 681.

même $T' - t' = \frac{a-b}{e} \zeta$; d'où l'on conclut $T - t = T' - t'$; relation qui exprime, d'après la loi de Newton, que les quantités de chaleur qui traversent les tranches quelconques L, L sont égales.

957. Coefficient de conductibilité. — Supposons que les deux tranches que nous venons de considérer appartiennent à deux murs distincts de même substance. Soient e', a', b' l'épaisseur et les températures des faces du second mur. Nous aurons $T - t = \frac{a-b}{e} \zeta$, et $T' - t' = \frac{a'-b'}{e'} \zeta$. Soient q et q' les quantités de chaleur qui traversent les deux tranches pendant l'unité de temps, nous aurons aussi $q : q' = T - t : T' - t' = \frac{a-b}{e} : \frac{a'-b'}{e'}$. Supposons que l'on ait $a' - b' = 1$ et $e' = 1$, et soit k la valeur que prend alors q' ; il vient $q = k \frac{a-b}{e}$, expression qui sert à calculer q , quand la constante k est connue. Cette constante, qui dépend de la substance du mur, se nomme *coefficient de conductibilité*. On appelle donc ainsi la quantité de chaleur qui passe dans l'unité de temps par l'unité de surface, à travers un mur dont l'épaisseur est égale à l'unité, et dont les deux faces sont à des températures constantes différant de 1° .

Coefficient de conductibilité extérieure. — Supposons que la face BB' du mur ne soit plus à une température constante; elle finira par prendre une certaine température stationnaire b , et perdra alors autant de chaleur qu'elle en recevra des tranches qui la précèdent. Soit h la quantité de chaleur perdue alors pendant une minute, par l'unité de surface, quand la différence de température avec le milieu ambiant est de 1° , nous aurons ce que Fourier nomme *coefficient de conductibilité extérieure*. Cette quantité diffère du pouvoir émissif, puisque la chaleur est enlevée à la surface BB' par le contact du milieu contigu, aussi bien que par rayonnement, et qu'elle dépend aussi de la rapidité avec laquelle la chaleur arrive en dedans à la face BB' , c'est-à-dire de la *conductibilité intérieure* du mur.

Si nous supposons que l'excès de la température b de la face du mur sur la température 0 du milieu qui la touche, soit assez petite pour qu'on puisse appliquer la loi de Newton, la quantité de chaleur perdue pendant une minute par l'unité de surface sera $h(b-0)$; h étant le *coefficient de conductibilité extérieure*. Cette quantité est égale à celle qui passe pendant le même temps par l'unité de surface d'une tranche quelconque; on a donc $k \frac{a-b}{e} = h(b-0)$; relation qui fait connaître h quand le coefficient de *conductibilité intérieure* k est connu.

958. Expériences de vérification. Mesure de k . — La formule $q = k \frac{a-b}{e}$ montre que la quantité de chaleur qui traverse une tranche d'un mur est proportionnelle à la différence de température de ses faces, et est en raison inverse de son épaisseur. Cette formule a été trouvée en partant de l'hypothèse

du rayonnement particulière, et en lui appliquant la loi de Newton (894). Il était donc nécessaire de la vérifier par l'expérience. Une fois vérifiée, elle pourra servir à calculer le coefficient k , en partant de la chaleur de q donnée par l'expérience. Un procédé, proposé par Dulong, consisterait à former avec la substance un vase sphérique, d'épaisseur uniforme assez petite pour qu'on puisse négliger la différence d'étendue entre les surfaces intérieure et extérieure. Ce vase serait entretenu en dedans à la température de 100° par un courant de vapeur, et en dehors à la température 0° , au moyen de glace fondante. La chaleur passant de dedans en dehors fondrait, pendant l'unité de temps, un certain poids p de cette glace. La quantité de chaleur qui aurait traversé les parois du vase serait alors lp , l étant un nombre qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour fondre l'unité de poids de glace. Par l'unité de surface, il aurait passé seulement $lp : s$; en désignant par s la surface du vase; on aurait donc $q = lp : s = 100k : e$; d'où l'on déduirait la valeur de k . Mais une couche d'eau stagnante, qui adhère à la surface chauffée par la vapeur, forme un mauvais conducteur auprès duquel les épaisseurs des lames métalliques deviennent insensibles.

Peclet a cherché à vaincre la difficulté en agitant vivement un liquide près des faces de la lame. Après de nombreux essais, il s'est arrêté à la disposition suivante. Deux vases cylindriques de fer-blanc (fig. 682) placés l'un dans l'autre, sont séparés par du coton cardé destiné à arrêter la chaleur. Le vase intérieur, rempli d'eau, et soutenu par des tiges de verre u, u , est rétréci à

sa partie inférieure, et fermé par la plaque à étudier. Cette plaque, PP (fig. 683) est maintenue à une petite distance du bord inférieur du vase, par des tiges soudées sur le contour de cette plaque et s'enfonçant dans un anneau de liège oo qui sépare les deux vases; du mastic de vitrier recouvre le contour de la plaque et le dessous de l'anneau de liège. Dans l'axe de l'appareil (fig. 682) est disposé un tube de cuivre tournant sur lui-même quand on agit sur la manivelle m' . Ce tube est armé de palettes obliques destinées à produire une vive agitation, et à sa partie inférieure sont des bandes verticales de toile de crin, destinées à balayer la surface de la plaque pour renouveler continuellement l'eau qui la recouvre. Un thermomètre t fixé au couvercle du vase intérieur, occupe l'axe du tube de cuivre. Le système des deux vases est soutenu par des vis v, v , dans un réservoir rempli d'eau R, de manière que la plaque s'enfonce dans le liquide, de 1 à 2^{mm}. Une roue horizontale rr , mise en mouvement par une roue dentée et la manivelle m , frotte continuellement, de ses

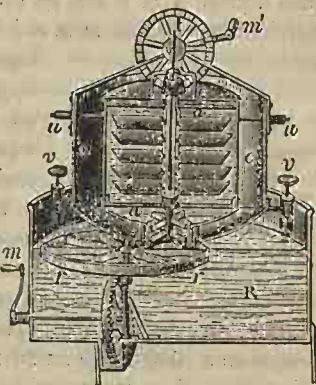


Fig. 682.

rayons formés de tresses tendues, la partie inférieure de la plaque. On peut ainsi renouveler jusqu'à 1600 fois par minute, le liquide en contact avec les faces de cette plaque.

L'eau du réservoir R étant plus chaude que celle du vase intérieur, Pecllet mesurait le temps employé pour échauffer la dernière, de 5° en 5°. Si l'on admet que les quantités de chaleur traversant la plaque pendant un temps très-court sont proportionnelles aux différences de température des deux surfaces, l'élévation de température pendant 1^s, pour une différence de température de 1°, sera donnée par la formule

$$a = \frac{m}{t} (\log A - \log T),$$

dans laquelle A et T sont les excès de température du réservoir sur le vase intérieur au commencement et à la fin du temps t , et m le module des tables de logarithmes. Si la loi supposée est vraie, on doit toujours trouver la même valeur pour a , quelles que soient celle de A et de T. C'est ce que Pecllet a constaté sur des plaques de *cuivre, plomb, zinc, étain, fer et fonte*.

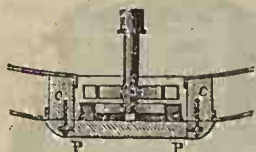


Fig. 683.

L'eau du réservoir R étant à 25°, et celle du vase intérieur à la température de l'air, les temps nécessaires pour produire une même élévation du thermomètre dans ce dernier vase, furent de 500^s

et 380^s, avec des plaques de plomb ayant pour épaisseur 20^{mm} et 15^{mm}; et comme on a $500 : 375 = 20 : 15$, il ne s'en faut que de 5^s que les temps soient proportionnels aux épaisseurs; ce qui vérifie la loi.

Mesure du coefficient. — Dans des expériences faites sur une plaque de plomb de 20^{mm} d'épaisseur, la température du réservoir R était de 24°,04, et les excès observés, de 8°,91 et 9°,55; ce qui donne $a = 0,000294$. La *quantité de chaleur* absorbée par l'eau du vase intérieur pour s'échauffer ainsi, n'est autre chose que celle qui a traversé la plaque pendant 1^s. On peut calculer cette quantité absorbée, en fonction de l'*unité de chaleur capable d'élever de 1° la température de 1^k d'eau*. Or le poids de l'eau du vase intérieur étant de 3^k287^g, on aura $0,000294 \times 3,287$, pour la quantité de chaleur qui a traversé la plaque de plomb en une seconde. Pour avoir la quantité qui serait passée à travers une lame de 1^{mm} d'épaisseur, il n'y a qu'à multiplier cette quantité par 20, d'après la loi des épaisseurs. Enfin, en divisant le résultat par la surface de la plaque, qui était de 0^{mc},005026, on aura la quantité qui aurait traversé

¹ Dans ce poids est compris le poids d'une quantité d'eau qui absorberait autant de chaleur que le vase métallique et les pièces solides qu'il contient. Nous verrons plus tard, en traitant des *chaleurs spécifiques*, comment on calcule cette quantité.

une surface d'un mètre carré. Pecllet a trouvé ainsi, pour représenter le coefficient de conductibilité du plomb, 3,82, *unités de chaleur*.

959. LOIS DES TEMPÉRATURES DANS UNE BARRE. — Considérons une barre prismatique dont une des extrémités est entretenue à une température constante. La première tranche transversale non échauffée directement recevra de la chaleur de celle qui la précède, en perdra une partie par son contour extérieur et transmettra le reste à la tranche suivante. De même celle-ci perdra par son contour une partie de la chaleur reçue et en cédera à la tranche qui vient après; et ainsi de suite. Il arrivera un moment où chaque tranche recevra autant de chaleur de celle qui la précède, qu'elle en perdra par son contour et par transmission à la tranche suivante, alors les températures des diverses tranches seront stationnaires; et la chaleur passant par une tranche sera égale à celle qui se perd, par rayonnement et par le contact de l'air, dans la portion de la barre qui est au-delà de cette tranche.

On voit que les températures seront de plus en plus faibles à mesure qu'on s'éloignera de l'extrémité chauffée. De plus, la température à une même distance de cette extrémité sera d'autant plus basse que la section de la barre sera plus petite; car, si nous considérons des barres de même substance et de sections semblables, le contour par lequel se perd la chaleur varie de l'une à l'autre proportionnellement aux côtés homologues, et l'aire de la section, par laquelle la chaleur passe d'une tranche à la suivante, varie comme le carré de ces côtés. La perte par le contour est donc plus faible relativement, quand la section est plus grande. C'est pour cela qu'on ne peut toucher une grosse barre de fer, assez loin de l'extrémité rougie au feu; tandis qu'un fil de fer peut être tenu sans inconvénient à quelques centimètres de la partie rouge.

960. Formule de Fourier¹. — Fourier, en supposant la section de la barre assez petite pour que la température soit la même dans toute son étendue, démontre par le calcul que l'excès V de température sur l'air extérieur, d'une tranche située à une distance x de l'extrémité chauffée, est donné par la formule

$$V = Ae^{-x\sqrt{\frac{ph}{sk}}} + Be^{x\sqrt{\frac{ph}{sk}}}$$

dans laquelle A et B sont des constantes, k et h les coefficients de conductibilité intérieure et extérieure, p le périmètre, s l'aire de la section de la barre, et e la base des logarithmes népériens.

Si nous supposons la barre infinie, ou seulement assez longue pour que la chaleur ne puisse arriver jusqu'à son extrémité, V devra être nul pour $x = \infty$, ce qui exige que l'on ait $B = 0$; et la formule se réduit à

¹ Fourier, *Théorie de la chaleur*, p. 60.

$$[2] \quad V = Ae^{-x\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = Ae^{-xr}, \quad \text{en posant } r = \sqrt{\frac{ph}{sk}}.$$

Si l'on y fait $x = 0$, on a $V = A$. La constante A représente donc l'excès de la température de la source sur l'air ambiant.

Conséquences. — Pour une autre barre à section semblable, exposée à la même source de chaleur, on aurait

$$V' = Ae^{-x'\sqrt{\frac{p'h}{s'k}}}.$$

Si l'on veut obtenir les distances x , x' , auxquelles les températures sont les mêmes pour les deux barres, il n'y aura qu'à écrire

$$e^{-x\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = e^{-x'\sqrt{\frac{p'h}{s'k}}}; \quad \text{d'où } -x\sqrt{\frac{ph}{sk}} = -x'\sqrt{\frac{p'h}{s'k}},$$

ou bien $x^2ps' = x'^2p's$. Mais on a $p^2:p'^2 = s:s'$, puisque les sections sont semblables; il vient donc, en éliminant s et s' ,

$$x^2p' = x'^2p, \quad \text{ou } x^2 : x'^2 = p : p'.$$

Les carrés des distances à la source, des sections qui ont la même température, sont donc proportionnels aux dimensions linéaires homologues des sections.

Supposons encore deux barres de substance différente, de même section, couvertes d'un même enduit, pour leur donner la même conductibilité extérieure h , et soumises par un bout à la même température. Les distances des tranches de même température seront données par l'équation

$$e^{-x\sqrt{\frac{ph}{ks}}} = e^{-x'\sqrt{\frac{ph}{k's}}}, \quad \text{d'où } x^2 : x'^2 = k : k'.$$

Les conductibilités des deux barres sont donc entre elles comme les carrés des distances à la source, des tranches de même température.

La formule [2] montre aussi que, dans une barre indéfinie, les excès V de température des tranches, décroissent en progression géométrique quand les distances à la source croissent en progression arithmétique. Car, si l'on donne

à x les valeurs successives $d, 2d, 3d, 4d, \dots$, on aura pour V les valeurs $Ae^{-dr}, Ae^{-2dr}, Ae^{-3dr}, Ae^{-4dr}, \dots$

Si l'on considère trois valeurs de V consécutives quelconques V', V'', V''' , en divisant la somme des extrêmes $V' + V'''$ par V'' , on trouve pour la valeur du rapport $(V' + V''') : V''$, une quantité constante $e^{dr} + e^{-dr}$. Résultat qui s'applique aussi au cas d'une barre de longueur finie.

961. Vérifications expérimentales. — Après des essais de Franklin, d'Ingenhousz, de Mayer et de Buffon, Amontons a fait des expériences remarquables sur la distribution des températures dans une barre. Plus tard Lambert énonça la loi de la progression géométrique décroissante. Cette loi a été vérifiée, par Biot et par Rumfort, au moyen d'une méthode indiquée par Fourier, sur des barres de fer et de cuivre¹. Des cavités creusées à des distances égales, et remplies de mercure, recevaient des thermomètres, pendant qu'une des extrémités de la barre était plongée dans du plomb fondu.

Despretz² a aussi vérifié cette loi avec beaucoup de soin, ainsi que la constance du rapport $(V' + V''') : V''$, au moyen de l'appareil (fig. 684). La barre, soutenue par des supports de bois sec, est chauffée à l'une de ses

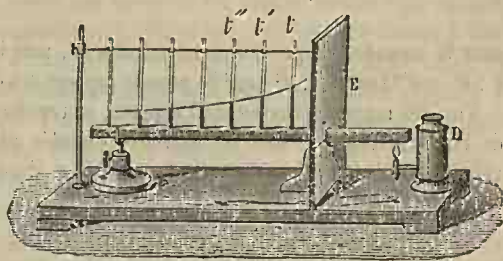


Fig. 684.

extrémités par la flamme d'une lampe L , et préservée partout ailleurs, par un écran E , du rayonnement de la source. Des thermomètres t, t', t'' , placés à des distances de 10^{cm} les uns des autres, sont enfoncés dans des cavités remplies de mercure. Les barres, dont la section était un carré de 21^{mm} de côté, étaient recouvertes d'un même vernis, qui leur donnait la même conductibilité extérieure. Quand la température des thermomètres était devenue stationnaire, on en retranchait celle de l'air ambiant, et l'on voyait que les différences étaient en progression géométrique, pour les métaux très-bons conducteurs. Pour le plomb, et les corps peu conducteurs, avec lesquels l'état stationnaire n'était atteint qu'au bout de 5 à 6 heures, il y avait des discordances sensibles.

Les corps mauvais conducteurs, comme le marbre, la terre à briques, s'écartent beaucoup de la loi; c'est que la théorie suppose que la température est la même dans toute l'étendue d'une section de la barre, ce qui ne peut être quand elle conduit mal. De plus, la perte par le rayonnement ne suit pas exactement

¹ Bibliothèque britannique (Sciences et arts, 1804), t. XXVII, p. 310.

² Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. XIX, p. 97; et XXXVI, p. 422.

la loi de Newton pour toutes les tranches, la température des premières étant à plus de 40° au-dessus de l'air ambiant.

962. Comparaison des pouvoirs conducteurs. — Pour comparer les pouvoirs conducteurs, il suffit de chercher à quelles distances de la source la température est la même sur deux barres égales; les coefficients étant en raison inverse des carrés de ces distances (960). Mais il est très-difficile de trouver la section où règne une température donnée, à moins qu'il ne s'y rencontre une des cavités à mercure. On emploie donc une autre méthode : soient d et d' les distances qui séparent les thermomètres, sur deux barres égales et de même conductibilité extérieure h . La raison de la progression est

$$R = e^{rd} = e^{d\sqrt{\frac{ph}{sk}}}, \text{ pour la première barre (960), et } R' = e^{r'd'} = e^{d'\sqrt{\frac{ph}{sk'}}$$

pour la seconde. En prenant des logarithmes, puis le rapport $k : k'$, on trouve $k : k' = d'^2 \text{Log}^2 R' : d^2 \text{Log}^2 R$, pour le rapport des coefficients de conductibilité.

Voici les rapports trouvés par Despretz, en représentant par 1000 le coefficient de l'or. En regard, sont les nombres calculés par Peclat en partant de la valeur 3,72, qu'il a trouvée pour le coefficient absolu du plomb (958) :

	Desp.	Pecl.		Desp.	Pecl.		Desp.	Pecl.
Or.	1000	21,28	Fer.	374,3	7,95	Marbre . . .	23,6	0,48
Platine?.. .	984	20,95	Zinc.	363,0	7,74	Porcelaine.	12,2	0,24
Argent?.. .	973	20,71	Étain. . . .	303,9	6,46	Terre cuite		
Cuivre. . . .	898,2	19,44	Plomb. . . .	179,5	3,82	T. des four.	11,4	0,23

Ces résultats ont été confirmés par M. Forbes, sauf pour le platine. Nous verrons aussi que l'argent est meilleur conducteur que l'or. Parmi les métaux communs, le cuivre conduit le mieux et le plomb, le moins. Pour les trois corps qui suivent les résultats sont douteux, la loi des températures ne se vérifiant plus exactement. Depuis, Despretz a comparé les coefficients des corps suivants : *fer, fonte, marbre, pierre lithographique, pierre de tonnerre bien sèche, bois de sapin*; pour lesquels le rapport de la progression a été, en moyenne, 2,004, 2,017; 2,133; 2,1; 2,30; 2,19.

M. Von Littrov a appliqué la même méthode aux terres sèches et humides renfermées dans des cylindres de caoutchouc. Généralement, les terres humides conduisent mieux que l'eau et mieux que les terres sèches, dont l'état d'agrégation a plus d'influence sur la conductibilité, que la composition chimique.

963. Vérification de la formule générale. — La formule générale $V = Ae^{-rx} + Be^{rx}$ n'avait été vérifiée que dans le cas où la barre est assez longue pour que la chaleur n'arrive pas jusqu'à l'extrémité non chauffée.

M. Gouillaud l'a vérifiée dans le cas général¹, et a constaté que : 1° si l'on fait varier la longueur, B diminue sensiblement en progression géométrique, quand la longueur augmente en progression arithmétique; 2° si, la longueur étant constante, on fait varier la température de la source, B varie proportionnellement à l'excès de celle-ci sur l'air environnant. On peut donc poser $B = kTm^l$, T étant l'excès de température, l la longueur de la barre, et k et m des constantes qui dépendent de sa substance et de sa section. Comme on a nécessairement $A = T - B$ pour $x = 0$, la formule devient

$$V = kTm^l e^{rx} + (T - kTm^l) e^{-rx} = kTm^l (e^{rx} - e^{-rx}) + Te^{-rx}.$$

On voit que la longueur influe sur la loi des températures stationnaires, et que la formule se réduit à $V = Te^{-rx}$ quand l est infini; car m^l devient nul, m étant nécessairement moindre que l'unité. Pour vérifier la formule ainsi transformée, M. Gouillaud a pris une barre de fer dont la section était un carré de 43^{mm} de côté. Les thermomètres enfoncés dans du mercure étaient à 20^{cm} les uns des autres. On avait $k = 0,409$, $m = 0,24$, $e^r = 2,24$, et $e^{-r} = 0,45$. On faisait varier l , x et T alternativement ou simultanément, et les résultats de l'expérience ont toujours été d'accord avec ceux de la formule. On a opéré principalement sur 6 barres de 1^m à 5^m de longueur.

961. Expériences sur des fils. — Quand on opère sur des barres un peu grosses, on ne peut admettre que la température soit exactement la même dans toute l'étendue d'une même section, surtout quand la substance est peu conductrice; c'est pourquoi, M. Langberg a opéré sur de simples fils métalliques. Il évaluait la température en chaque point, au moyen de la soudure d'un élément thermo-électrique (840), dans le circuit duquel était compris un rhéomètre. Mais différentes causes d'erreur inaperçues le conduisirent à des résultats en contradiction avec les lois de Fourier si bien vérifiées par Despretz.

MM. Wiedemann et Franz ont employé une méthode semblable, en s'entourant d'une multitude de précautions, et au moyen d'un appareil qui leur a permis d'obtenir de très-bons résultats².

La barre, ou le fil, b (fig. 685), est placée dans l'axe d'une cloche horizontale de verre, fermée par un plateau cc boulonné à une forte virole adaptée à la cloche, et auquel la barre est fixée par une vis de pression v . L'autre extrémité de cette barre passe par la tubulure de la cloche, et entre dans un tube o fermé à son extrémité et plus large en n , où il s'ajuste à un autre tube mastiqué dans la tubulure. Pour échauffer l'extrémité o de la barre, on fait circuler un courant de vapeur dans un manchon m qui entoure le tube o . La cloche est plongée dans un vase de zinc, zz , rempli d'eau qui maintient sa température constante, et l'on peut y faire le vide par le robinet r .

¹ Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXV, p. 699.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XII, p. 107, et LVIII, p. 126.

Les températures des différents points de la barre sont données par un élément thermo-électrique t , représenté à part en AB, formé d'un fil de fer soudé en s à un fil d'argent, et fixé par deux supports à une plaque d'ivoire I. Deux appendices en ivoire i , i embrassent la barre, dont on voit la coupe en B, et servent à guider l'élément quand on lui fait parcourir les différents points de cette barre. L'élément est suspendu à l'extrémité d'un ressort d'acier A, a , qui le presse contre la barre, et est soutenu lui-même par un tube de laiton L qui pénètre dans la cloche à travers une boîte à cuirs. Les fils, //, FF, de l'élément traversent le tube L sans se toucher, et leurs extrémités ρ , ρ sont mises en communication avec les fils du rhéomètre.

Les déviations du rhéomètre n'étant pas proportionnelles aux températures des points touchés, il a fallu construire une table donnant les températures correspondantes aux diverses déviations. Pour cela, on introduisait dans le tube o une barre de cuivre de 10^{mm} de diamètre, dont l'extrémité pénétrait plus ou

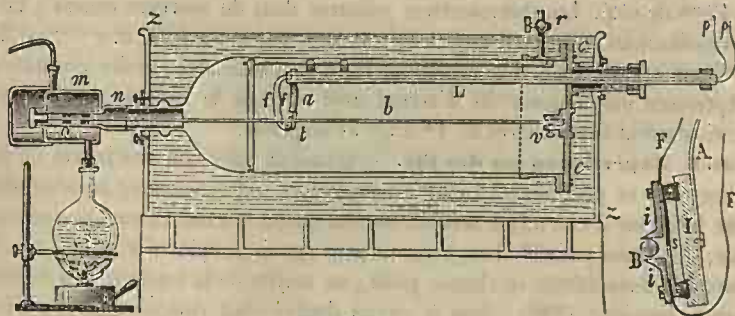


Fig. 685. — $\frac{1}{10}$.

moins dans la cloche, et portait un cylindre d'acier de 20^{mm} de longueur sur 5^{mm} de diamètre, dans l'axe duquel s'enfonçait un thermomètre donnant les dixièmes de degré. Du mercure achevait de remplir la cavité, et le thermomètre était maintenu par de la cire. Après avoir échauffé la tige de cuivre en mo , on arrêtait le passage de la vapeur; et, appliquant l'élément t sur le cylindre d'acier, on comparait les indications du rhéomètre à celles du thermomètre.

Voici maintenant comment on opérait. Les barres avaient environ 60^{cm} de longueur et de 6^{mm} de diamètre; elles étaient argentées par la galvanoplastie, et polies au gratte-brosse. Quand elles étaient trop peu conductrices pour que la chaleur parvint jusqu'à dans la cloche, on les fixait à l'extrémité du cylindre de cuivre qui avait servi à construire la table de graduation. Après avoir chauffé pendant une demi-heure, ce qui suffisait pour obtenir une distribution constante de température, on appliquait l'élément thermo-électrique en des points distants les uns des autres de 52^{mm}. Il suffisait de 4^s à 6^s pour que la déviation du rhéomètre devint constante. Pour s'assurer que les propriétés de l'élément

thermo-électrique ne variaient pas, on vérifiait de temps en temps la distribution de la chaleur dans une tige de laiton.

MM. Wiedemann et Franz ayant calculé, pour chaque barre, les rapports des excès $\frac{V+V''}{V'}$, $\frac{V'+V'''}{V''}$ les ont toujours trouvés constants, dans l'air comme dans le vide. Les lois de Fourier se trouvent donc de nouveau confirmées; et l'on a pu calculer les coefficients de conductibilité, par le moyen indiqué ci-dessus (962). Voici les résultats trouvés :

MÉTAUX	COEFFICIENTS OBTENUS		MÉTAUX	COEFFICIENTS OBTENUS	
	dans l'air.	dans le vide		dans l'air.	dans le vide
Argent.....	100,0	100,0	Acier.....	41,6	40,3
Cuivre.....	73,6	74,8	Plomb.....	8,5	7,9
Or.....	53,2	54,8	Platino.....	8,4	9,4
Laiton.....	23,6	24,0	Palladium.....	6,3	7,3
Étain.....	44,5	45,4	Alliage de H. Rose ¹ .	2,8	2,8
Fer.....	41,9	40,1	Bismuth.....	4,8	»

On voit que les conductibilités des métaux diffèrent beaucoup les unes des autres et que le platine s'est montré beaucoup moins conducteur que dans les expériences de Despretz et de Pelet (962), résultat confirmé depuis, comme nous allons le voir (965). Les métaux les plus conducteurs ont donné les résultats les moins certains, le rapport $(V+V'') : V'$ étant pour eux très-rapproché de 2, surtout dans le vide, où les températures décroissent moins rapidement que dans l'air. Nous verrons plus tard que les conductibilités calorifiques ci-dessus sont sensiblement les mêmes que les *conductibilités électriques*.

Ce dernier point avait été contesté, pour les alliages, à la suite d'expériences dont nous allons parler (965). Mais M. Wiedemann étant revenu sur cette question, a confirmé la proportionnalité des conductibilités calorifiques et électriques, pour les alliages comme pour les métaux simples. Il a reconnu en même temps, que la conductibilité des alliages de zinc et cuivre diffère peu de celle du zinc, représentée par 19, quelle que soit la proportion de cuivre, et que celle des alliages d'étain et bismuth est à peu près la moyenne des conductibilités des métaux constituants.

Despretz ayant placé bout à bout, dans son appareil (961), des barres de cuivre et d'étain, avait trouvé une différence de 1°,47 entre les températures de ces barres au point de contact, et de 5°,5, quand il interposait une feuille de papier

¹ 1 partie d'étain, 1 de plomb, 2 de bismuth.

mince. Il en avait conclu que la chaleur éprouvait une certaine difficulté à franchir la solution de continuité. M. Wiedemann a repris cette question¹, et comme dans son appareil (fig. 685), la chaleur enlevée par l'élément thermo-électrique est différente pour les deux barres en contact, à cause de la différence de leur conduction, il a employé la disposition suivante : Plusieurs barres, de 13^{mm} de diamètre, sont placées bout à bout; la série est serrée par les deux bouts dans un cadre de bois et chauffée à l'une de ses extrémités par un courant de vapeur. Quand la température est stationnaire, on enfonce la soudure de l'élément thermo-électrique, dans deux trous remplis d'huile pratiqués à 2^{mm} de chaque surface de contact, et l'on déduit les températures à cette surface, dans les 2 barreaux voisins, des indications données par l'élément thermo-électrique. On n'a trouvé ainsi que des différences insignifiantes entre les deux températures obtenues, aussi bien quand les barreaux étaient de même substance, que lorsque, étant de nature différente, le meilleur conducteur était placé le plus près ou le plus loin de l'extrémité chauffée. Quand le contact était imparfait, ou si l'on interposait une mince couche de papier, des différences se manifestaient entre les températures des deux barres à la surface de jonction; ce qui se conçoit facilement et explique pourquoi les corps très-divisés conduisent très-mal la chaleur.

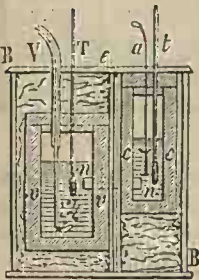


Fig. 686.

965. Expériences de MM. Calvert et Johnson.

— Une nouvelle méthode, directe et précise, a été employée par MM. C. Calvert et R. Johnson pour comparer les conductibilités, des métaux et des alliages². Deux vases rectangulaires à parois épaisses, *vv*, *cc* (fig. 686), en caoutchouc vulcanisé, substance qui conduit très-mal la chaleur, sont renfermés dans une boîte de bois *BB*, dont ils sont partout séparés par de la ouate. Un prisme *nn*, de la substance à étudier, ayant 6^{cm} de long et 1^{cc} de section, entre dans ces deux vases. Dans l'un, *cc*, on verse 50 centimètres cubes d'eau à 16°, et dans l'autre, *vv*, 200^{cc} d'eau maintenue à 90° par un faible courant de vapeur arrivant par le tube *V*.

La chaleur passe, d'un vase à l'autre, à travers le barreau *nn*, et l'on observe le nombre θ de degrés dont monte le thermomètre *t* en 15 minutes pendant qu'on fait mouvoir l'agitateur, *a*. Si l'on prend pour *unité de chaleur* la quantité de chaleur qui élève 1^{gr} d'eau de 1°, la quantité qui aura passé en 15 minutes dans le vase *cc*, sera $50 \times \theta$; produit proportionnel à la conductibilité du prisme *nn*, et pouvant servir à la représenter.

L'expérience a prouvé que la chaleur absorbée par les parois *e*, *c* ne modifie pas les rapports des conductibilités. On a reconnu aussi que le rayonnement, du

¹ Bibliothèque universelle de Genève, supplément, t. XXXI (1856), p. 40.

² Moniteur scientifique de M. Quesneville, t. IV (1862).

vase *vv* au vase *cc*, est négligeable; car ce dernier ne s'échauffe que de 0°,05 en 15 minutes, en l'absence du barreau *nn*.

Les expériences, poursuivies pendant plus d'une année, ont été faites sur les métaux communs et sur 100 alliages, dont 30 amalgames. Les nombres, rapportés à l'argent, qui a donné la plus grande conductibilité représentée par 100, sont tous plus forts que ceux qu'ont trouvés MM. Wiedemann et Frantz (964). Ainsi, l'or a donné 98; le cuivre fondu, 81; le fer, 43; le platine, 38; le bismuth, 6. La liste des métaux par ordre de conductibilité n'est pas non plus la même. Ces différences doivent tenir, au moins en partie, aux impuretés et à l'état physique des métaux; en effet, la méthode de MM. Calvert et Johnson est tellement sensible qu'elle a permis de constater que l'érouissage, le mélange de quelques centièmes de matière étrangère, modifient notablement la conductibilité. Par exemple, on a trouvé pour l'or pur ou allié à 0,01 d'argent les nombres 98 et 84; pour le fer doux, l'acier et la fonte, 44, 40 et 36; pour le cuivre laminé ou fondu, 84 et 81. Des barreaux de zinc et d'antimoine, coulés dans la position verticale ont donné les conductibilités 63 et 19; et les nombres 61 et 21, quand ils avaient été coulés dans une position horizontale.

966. Conductibilité de la glace. — La glace jouant un rôle important dans la physique du globe, M. Lucien de la Rive a cherché à en évaluer la conductibilité, en la comparant à celle du verre¹. Dans une auge de bois (fig. 687) sont disposées trois plaques équidistantes de verre, V, de fer, F, et de glace, G, contenue entre deux lames minces de tôle où elle s'est



Fig. 687. — ¹/₁₀.

formée par le froid de l'air. Entre les plaques, est du mercure dans lequel plongent des thermomètres *t*, *t'*, et l'on a mis, en *a*, de l'eau à 0°, et en *s*, de l'essence de térébenthine au-dessous de 0°. On agite ces deux derniers liquides, la chaleur passe de *a* en *s*, et l'on attend que le thermomètre *t* ait atteint sa température minimum. Le mercure reçoit alors autant de chaleur de la plaque V qu'il en cède à la plaque de glace G, et, à cet instant, les quantités de chaleur qui traversent les lames V et G sont égales. En appelant — *t* et — *t'* les températures des deux masses de mercure, qui sont sensiblement celles des surfaces qu'elles touchent, *k*, *e*, et *k'*, *e'*, les coefficients de conductibilité et les épaisseurs des lames de glace et de verre, on aura (957)

$$k' \frac{(t' - t)}{e'} = k \frac{t}{e}, \text{ d'où l'on tirera } \frac{k}{k'}.$$

La moyenne de trois expériences a donné pour ce rapport, 1,76; la glace conduit donc mieux que le verre.

¹ Bibliothèque universelle de Genève, supplément, t. IX (1864), p. 177.

Pour déterminer la conductibilité absolue du verre, on a mis dans une auge, d'un côté d'une lame de verre, de la glace pilée, et de l'autre, du mercure dont on a observé l'abaissement de température. On a déduit de l'expérience, le nombre 0,13, pour représenter la quantité de chaleur qui passe en 1^s à travers une lame de verre de 1^{mm} d'épaisseur et de 1^m carré de surface, pour une différence de température des deux faces égales à 1°. La quantité correspondante pour la glace sera donc 0,23, en multipliant 0,13 par 1,76.

967. Applications. — On a fréquemment à faire des applications de la mauvaise conductibilité de certains corps. Par exemple, on fait de bois, ou l'on garnit d'osier, les anses de certains ustensiles, les manches de certains outils qui doivent être portés à une haute température. Quand on veut saisir un corps brûlant, on interpose entre la main et ce corps, des substances mauvaises conductrices. On enveloppe de paille d'étoffes épaisses, les tuyaux destinés à transporter l'eau chaude, la vapeur, l'air chaud.

Dans la *marmite norvégienne*, on maintient à une température de plus de 75°, qui est suffisante pour cuire la viande et les légumes, un liquide qui a d'abord été porté à l'ébullition. Le vase métallique qui contient ce liquide est ensuite introduit dans une caisse (*fig. 688*) garnie intérieurement d'une épaisse couche de matière non conductrice, comme du feutre spongieux, de la ouate, de la sciure de bois. On recouvre le couvercle, d'un disque de même matière, et l'on abat le dessus de la caisse. La chaleur se conserve, et la cuisson continue sans autre dépense de combustible que celui qui a servi à porter d'abord le liquide à l'ébullition. — On peut aussi conserver de la glace avec ce même appareil, dans lequel la chaleur extérieure ne peut pénétrer.

Si les poêles destinés à chauffer rapidement doivent avoir des parois métalliques, à travers lesquelles la chaleur passe facilement, ceux auxquels on demande de la laisser échapper peu à peu doivent être faits de matières peu conductrices, comme la faïence, les briques.

Dans les contrées du Nord, on parvient à entretenir dans les appartements une température douce, au moyen de poêles très-élevés (*fig. 689*) faits de briques, et qu'on tient allumés seulement pendant une ou deux heures de la matinée. Leur masse s'échauffe par la chaleur du foyer F, et par la circulation de la fumée qui traverse plusieurs chambres superposées, A, B, descend par le conduit cc, et remonte par un autre conduit parallèle à celui-ci. Quand le bois s'est transformé



Fig. 688.

en braise, on ferme toutes les ouvertures, la chaleur continue à pénétrer la masse, et pendant le reste de la journée, cette chaleur s'échappe peu à peu et rayonne faiblement par la surface garnie de faïence vernie, de manière à compenser à chaque instant la déperdition qui se fait par les parois de la chambre, parois qui doivent aussi conduire mal la chaleur. Des murs de briques, de 0^m,70 à 1^m d'épaisseur, satisfont à cette condition. Des murs de pierre ou de marbre devraient avoir une plus grande épaisseur; aussi n'emploie-t-on que rarement ces matériaux, dans les climats froids.

Des murs en planches épaisses, formant une double cloison remplie de matières très-divisées, comme de la paille hachée, de la sciure de bois, de l'étonpe, des feuilles sèches, conservent très-bien la chaleur intérieure, et constituent un système de construction économique, dans les pays froids où le bois abonde. Il est essentiel que tous les joints soient parfaitement calfeutrés, pour que l'air froid ne puisse s'introduire. — Des murs mauvais conducteurs conviennent tout aussi bien dans les pays chauds, pour empêcher la chaleur extérieure de pénétrer dans les habitations. Pendant la nuit, on laisse entrer l'air frais, par les fenêtres, que l'on tient exactement fermées pendant le jour.

Glacières. — Les glacières, dans lesquelles se conserve la glace amassée pendant l'hiver, sont construites de manière que la chaleur du dehors ne puisse pas y pénétrer. Elles consistent ordinairement en une fosse profonde C (fig. 690), revêtue de murs, construits ordinairement en briques légères, qui conduisent mal la chaleur. Au fond, est une grille o, sur laquelle repose la glace, dont l'eau de fusion se rend dans un puisard, d'où on l'extrait de temps à autre. Un toit, recouvert d'une couche épaisse de paille, empêche la chaleur extérieure de pénétrer. Souvent, on plante tout autour, des arbres dont le feuillage intercepte les rayons solaires. On remplit la glacière pendant qu'il fait grand froid, et l'on jette de temps à autre de l'eau chaude, qui se congèle bientôt en formant sur la glace une couche continue qui empêche l'air de circuler dans la masse. On dispose sur le tout une couche de paille, puis des planches chargées de pierres.

M. Garnier cite, dans sa météorologie, un phénomène curieux qui montre



Fig. 689.

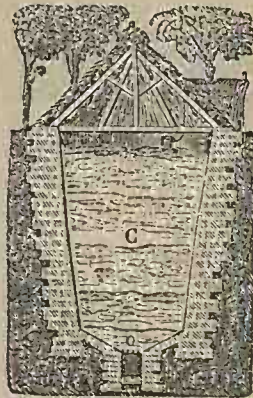


Fig. 690.

combien sont peu conductrices les matières terreuses. En 1828, après un été des plus chauds, la glace manqua en Sicile. Un géologue, M. Gemellaro, fit alors connaître l'existence, sur l'Etna, d'un banc de glace recouvert d'une couche épaisse de cendres et de scories, qui se trouvait là depuis un temps inconnu, préservé de la chaleur des étés par les masses non-conductrices qui le recouvraient. Pendant un hiver, cette glace avait été recouverte par les cendres lancées par le volcan; ces cendres s'étaient refroidies en en fondant une partie, puis avaient préservé le reste de la chaleur atmosphérique et de celle des laves vomies plus tard par le volcan.

On explique de la même manière la possibilité de maintenir des glaces comestibles au milieu de petits gâteaux brûlants, dont la pâte conduit très-mal la chaleur.

Aux États-Unis, on transporte au loin la glace des régions boréales. On la charge dans des navires, en blocs de 100 à 120 kilogrammes séparés à la scie, et que l'on préserve de la chaleur extérieure, en les isolant des flancs du navire au moyen de copeaux et de sciure de bois; on remplit aussi de sciure les vides qui séparent les blocs. En 1851, on exportait déjà, de Boston seulement, 55,000 tonneaux de glace, pour lesquels on employa pour 70,000 francs de sciure de bois, matière jusques-là sans valeur. Cette glace est transportée à la Havane, dans l'Inde, en Chine... Comme l'exportation se fait en toute saison, la glace est emmagasinée, au lieu d'extraction et au lieu d'arrivée, dans d'immenses glaciers construits au-dessus du sol, tantôt en briques, et la glace est alors séparée des murs par de la sciure de bois, tantôt en charpentes soutenant des couches épaisses de paille. A Boston, il y a de ces glaciers contenant jusques à 140,000 tonneaux de glace. Malgré toutes les précautions, une bonne partie de la glace fond pendant le voyage, et dans les magasins; l'on ne vend guère, à Calcutta, que le cinquième de celle qu'on y transporte.

M. Tellier a imaginé des appareils au moyen desquels on maintient pendant plusieurs mois, à la température de 0°, la viande fraîche, le gibier, les œufs, etc., ce qui les préserve de la décomposition. Les objets à conserver sont placés dans une enceinte fermée entourée de glace. La fusion de cette glace est rendue très-lente par une couche épaisse de matières non conductrices tapissant l'intérieur d'une caisse qui renferme le tout. — Un navire, *le Frigorifique*, contenant des chambres disposées par M. Tellier suivant le même système, est parti pour la première fois, en août 1876, pour aller chercher en Australie, à la Plata,..... et rapporter en Europe, la viande perdue provenant d'animaux abattus, dont on n'utilisait autrefois que la peau.

II. Conductibilité dans les solides non homogènes.

968. Conductibilité du bois. — MM. A. de La Rive et A. de Candolle ont étudié la conductibilité du bois, dans le sens de ses fibres et dans le sens

transversal¹; ils ont employé des barres à section rectangulaire, dont une extrémité, enveloppée d'une bande de fer-blanc, était chauffée par une lampe à alcool. Ils ont reconnu ainsi que le bois conduit beaucoup mieux dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire aux couches, suivant lequel le bois présente alternativement des densités différentes. Les différences sont plus prononcées dans les bois tendres que dans les bois durs. On a trouvé, pour les bois rangés dans l'ordre de leur conductibilité, dans le sens des fibres ou perpendiculairement, la série suivante : *alيزier*, *noyer*, *chêne*, *sapin*, *peuplier*, *liège*.

M. Tyndall a fait de nombreuses expériences sur la conductibilité du bois suivant trois directions : la 1^{re} parallèle aux fibres, la 2^e perpendiculaire aux fibres et dans le plan des couches ligneuses, la 3^e perpendiculaire à ces couches². Un cube de bois bien sec, dont les arêtes sont parallèles à ces trois directions est légèrement pressé entre une pièce d'ivoire et un curseur placés sur une table. Le curseur porte à son extrémité une cavité fermée par une mince membrane, remplie de mercure, et au fond de laquelle serpente un fil de platine engagé dans le bois, et que l'on chauffe par le passage d'un courant électrique d'intensité constante. La chaleur, qui entre par une face du cube, se propage jusqu'à la face opposée, qui s'appuie aussi sur une membrane fermant une cavité pleine de mercure creusée dans la pièce d'ivoire. La chaleur communiquée à ce mercure est évaluée au moyen d'un élément thermo-électrique accompagné de son rhéomètre, formé de deux barreaux, *bismuth* et *antimoine*, dont la jonction, en forme de coin, pénètre, par le fond, dans la cavité, où elle est enveloppée d'une mince membrane, pour empêcher le contact du mercure qui attaquerait le bismuth.

L'expérience consiste à observer la déviation de l'aiguille du rhéomètre au bout d'une minute. Voici quelques-unes des déviations publiées par Tyndall.

	Parallèlement aux fibres.	Perpendiculairement aux fibres.	
		Perpend. aux couches.	Dans les couches.
Chêne, bouleau	34° ⁰ ,5	11° ⁰ ,8	9° ⁰ ,3
Hêtre.....	33	10,8	8,8
Buis	31	12,0	9,9
Noyer	28	13,0	11,0
Frêne pleureur, tulipier.....	28	12,0	11,0
Pommier, bois de fer.....	26	12,4	10,1
Châtaignier	26	11,5	10,1
Acajou de Honduras.....	25	10,0	9,0
Orme, platane	24	11,8	10,0
Sapin d'Écosse.....	22	12,0	10,0

On voit qu'il n'y a pas de loi simple qui lie la conductibilité du bois à sa densité.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XL, p. 91.

² *La Chaleur, mode de mouvement*, trad. de M. l'abbé Moigno (1874), p. 202.

M. Tyndall a aussi appliqué la même méthode aux écorces diverses. Sous les mêmes dimensions et dans les mêmes conditions que les cubes de bois, les écorces de hêtre, chêne, orme, sapin, ont donné des déviations de 7° seulement, pour la transmission perpendiculairement aux couches. Cette faible conductibilité des écorces explique comment les arbres peuvent résister à des froids intenses.

La méthode de M. Tyndall lui a servi à comparer les conductions des corps qu'on n'a qu'en petites masses, ivoire, baleine, corne, gutta-percha, caoutchouc, cuir, cire. Les 4 dernières substances n'ont pas donné de déviation. Le *crystal de roche* en a donné une de 90°, et l'on peut dire que ce minéral conduit mieux que certains métaux; si bien qu'il suffit de le toucher, pour le reconnaître à l'impression de froid qu'il produit.

969. Conductibilité dans les cristaux. — Les cristaux non symétriques, dans lesquels la densité et l'élasticité ne sont pas uniformes (I, 785), ne possèdent pas le même pouvoir conducteur dans les différentes directions. De

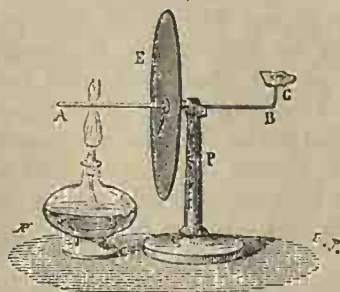


Fig. 691.

Sénarmont a constaté ce résultat, par une méthode ingénieuse, qui lui a permis d'opérer sur les très-petites masses que présentent ordinairement les cristaux¹. Des plaques soit minces polies C (fig. 691), obtenues soit par clivage, soit par des procédés mécaniques, et dont la direction, par rapport aux axes du cristal, est relevée avec soin, sont percées en leur centre d'un petit trou un peu conique, et enduites d'une légère couche de cire. On engage dans le trou central l'extrémité d'un gros fil d'argent AB, qui apporte la chaleur qu'il reçoit à son extrémité opposée, d'une lampe à

alcool, dans la lame, qui est horizontale et abritée par un écran. On voit alors la cire fondre et former, à la limite de la fusion, un bourrelet liquide qui correspond à une *ligne isotherme*, c'est-à-dire ayant partout la même température, celle de la fusion de la cire. Cette ligne, d'autant plus nettement marquée que la plaque est moins conductrice, est encore très-distincte quand la plaque est refroidie². De Sénarmont a aussi employé comme source, un tube d'argent traversant la lame, et dans lequel passait un courant d'air chaud; ou bien encore il concentrait les rayons solaires, au moyen d'un verre ardent, sur le

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXI, p. 657; et XXII, p. 479.

² Magnus, qui a répété les expériences de de Sénarmont, remplaçait la cire par l'iodure rouge de cuivre et mercure, qui devient brun à 70° et marque ainsi une limite de température, d'une manière peut-être un peu plus précise que la cire. M. Greiss a appliqué la même méthode aux substances organisées; il a trouvé, par exemple, qu'une plaque de bois donne une ellipse quand elle est taillée parallèlement aux fibres.

point qu'il voulait échauffer. Mais il s'est servi le plus souvent d'un fil d'argent, avec lequel on peut donner un diamètre très-petit, de 0^{mm},25 par exemple, au trou conique, qui peut, quand il est trop grand, avoir de l'influence sur la figure de la ligne isotherme. Du reste, pour éviter les défauts de forme du trou et du fil d'argent, on faisait tourner lentement la plaque dans son propre plan, pendant la fusion de la cire; et, pour éviter l'influence des défauts accidentels de structure, on répétait l'expérience sur plusieurs plaques égales de même espèce.

Lois. — En étudiant les courbes dessinées par le bourrelet de cire refroidi, de Sénarmont a d'abord constaté que : 1° les bords de la plaque n'ont pas d'influence sur la forme de la courbe dessinée par la cire en fusion, quand cette courbe n'est pas trop rapprochée de ces bords; 2° la courbe est toujours circulaire dans les corps homogènes; d'où l'on conclut que, si l'on faisait arriver de la chaleur en un point pris au milieu de la masse d'un corps homogène, les surfaces isothermes seraient des sphères ayant leur centre en ce point.

1° Les cristaux symétriques autour d'un point, appartenant au premier système cristallin (I, 490), se comportent comme les corps homogènes; les surfaces isothermes sont des sphères, car les lignes isothermes sont des circonférences sur des plaques prises dans des directions quelconques. Les expériences ont été faites sur le *spath fluor*, le *fer oxydulé*, le *cuivre oxydulé*, la *galène* et la *blende*.

2° Les cristaux du second et du troisième système cristallin, qui sont symétriques autour d'un axe, donnent des courbes isothermes circulaires, sur des plaques perpendiculaires à l'axe, et des courbes elliptiques, quand elles sont prises dans toute autre direction; et la différence entre le grand et le petit axe de l'ellipse est la plus prononcée quand la lame est parallèle à l'axe. Il résulte de là que les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes de révolution autour du grand axe, comme pour le *quartz*; d'autres fois ils sont aplatis suivant cette direction, comme dans l'*idocrase*, le *fer oligiste*. Cristaux observés : *oxyde d'étain*, *rutile*, *idocrase*, *protochlorure de mercure*, *spath d'Islande*, *quartz*, *béryl*, *fer oligiste*, *corindon*.

3° Dans le quatrième système cristallin, caractérisé par trois axes inégaux perpendiculaires entre eux, les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes à trois axes inégaux parallèles aux trois axes cristallographiques. Il y a donc trois directions suivant lesquelles la conductibilité est maximum, moyenne et minimum. Cristaux observés : *baryte sulfatée*, *topaze aragonite*, *bournonite*, *sulfure d'antimoine*, *staurotide*, *pinite*.

4° Dans le cinquième système cristallin, dans lequel un des axes est perpendiculaire au plan des deux autres qui sont obliques entre eux, les surfaces isothermes sont encore des ellipsoïdes à trois axes inégaux, dont un est parallèle à l'axe de symétrie du cristal. Les directions des deux autres ne peuvent être assignées *a priori*. Cristaux étudiés : *glauérite*, *feld-spath adulaire*, *feld-spath pierreux*, *pyroxène*, *augite*, *wolfram*, *gypse*.

5° Quant aux cristaux du sixième système, dans lequel les trois axes sont inégaux et obliques les uns par rapport aux autres, les analogies on conduit de Sénarmont à admettre que les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes à trois axes inégaux, dont les directions ne peuvent être connues d'avance. La difficulté de se procurer des échantillons convenables ne lui a pas permis de faire des expériences suivies sur ce système.

Une circonstance qui montre bien l'influence de l'arrangement régulier des molécules, sur la transmission de la chaleur, c'est que les cristaux impurs donnent des courbes presque circulaires, sur des plaques qui en donneraient d'elliptiques si elles étaient pures. L'idocrase, entr'autres, a manifesté nettement cette influence des impuretés.

970. Duhamel, qui a découvert par l'analyse mathématique la distribution inégale de la chaleur dans les milieux non homogènes, comme les cristaux, a repris la question après les expériences de Sénarmont, dont il a confirmé par l'analyse toutes les conclusions. Il a établi de plus que 1° les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes semblables, dont les axes sont dirigés suivant les axes principaux de conductibilité, et sont proportionnels aux racines carrées des conductibilités principales; 2° les courbes isothermes, sur une plaque indéfinie, sont des ellipses semblables qui sont les mêmes que les intersections des ellipsoïdes isothermes par un plan dirigé de la même manière que la lame; seulement les températures sont différentes sur l'ellipse et sur la surface isotherme dont elle serait l'intersection par un plan, à cause de l'influence de la conductibilité extérieure de la lame.

971. **Corps comprimés, etc.** — De Sénarmont a constaté que, si l'on comprime latéralement une plaque homogène, les courbes isothermes prennent, au lieu de la forme circulaire, la forme d'une ellipse dont le petit axe est dirigé dans le sens de la compression, comme si la ligne circulaire avait été aplatie par l'effort exercé¹. Ces résultats ont été constatés sur des plaques de verre à glace, de flint-glass et de porcelaine, de 8^{mm} environ d'épaisseur, serrées entre les mâchoires parallèles d'un étai, avec interposition de feuilles de plomb pour éviter la rupture. Un gros fil d'argent servait à apporter la chaleur au centre de la plaque percée et enduite de cire.

Une plaque de cristal de roche, parallèle à l'axe étant comprimée dans le sens du petit axe de l'ellipse qu'elle donne naturellement, cette courbe s'allonge; tandis que si on comprime dans le sens du grand axe de l'ellipse, et par conséquent dans le sens de l'axe du cristal, la courbe devient moins allongée.

Pour reconnaître l'effet d'une extension dans un seul sens, de Sénarmont a infléchi une lame de verre, de manière à distendre sa surface convexe, et a fait arriver la chaleur dans les couches les plus voisines de cette surface, en enfonçant le fil d'argent dans une cavité qui ne dépassait pas la couche moyenne, qui n'est ni dilatée ni comprimée. La fusion de la cire se fit sur la surface convexe, suivant

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIII, p. 257.

une courbe légèrement allongée dans le sens de la dilatation. Les courbes étaient, du reste, irrégulières, et les résultats peu marqués, mais néanmoins concluants, à cause de leur accord avec ceux que l'on observe dans la compression.

La trempe faisant varier la densité du verre, de Sénarmont a opéré sur des lames de cette substance, dont il avait mis diverses parties dans un état de trempe différent, en appliquant sur la lame chauffée des plaques de métal froid; mais les résultats ont toujours été peu prononcés. Ce qu'il y eut de plus marqué fut une irrégularité manifeste dans la forme des courbes dessinées par la cire fondue.

Citons enfin les expériences de M. Matteucci sur le *bismuth*, dont on peut obtenir de petits barreaux ayant leur clivage principal soit perpendiculaire soit parallèle à la longueur. Les conductibilités, comparées par le procédé d'Inghenousz, se sont montrées les plus grandes dans le cas du clivage parallèle à la longueur.

972. Expériences de M. E. Jannettaz. — Ces expériences ont eu pour objet d'étendre les résultats trouvés par De Senarmont à un plus grand nombre de cristaux, particulièrement à ceux du 6^e système¹. Les surfaces étaient enduites de graisse étendue au pinceau sur la masse tiède, et l'excédant était enlevé au moyen de papier à filtrer. Plusieurs appareils ont été employés. Avec la disposition de la figure 692 on n'a pas besoin de percer la lame; la chaleur est amenée au milieu de cette lame nn' placée horizontalement, par un fil de platine aca' replié sur lui-même, que l'on chauffe au moyen d'un courant électrique amené par les fils f, f' , et dont le bouton c s'appuie sur la plaque. En e , est un double écran qui préserve cette plaque du rayonnement des parties supérieures du fil aca' . L'ensemble est enfoncé dans une caisse entourée d'eau qui en rend la température constante.

La figure 693 représente un autre appareil destiné aux plaques percées. Une chaudière cylindrique contient de l'eau dont le niveau est indiqué en n , et que l'on chauffe au moyen d'une lampe à alcool placée en L . Dans cette eau, s'enfonce un petit cylindre fixé sous le couvercle de la chaudière, et rempli de sable au milieu duquel s'élève une colonne de cuivre rouge. Cette colonne porte une aiguille qui traverse la plaque horizontale m . En ee , est un écran dans lequel on fait circuler de l'eau au moyen des tubes t, t' . — M. Jeannettaz a encore procédé en faisant passer un courant électrique dans l'aiguille qui traverse la plaque.

La courbe dessinée par la fusion de l'enduit était étudiée au moyen d'un

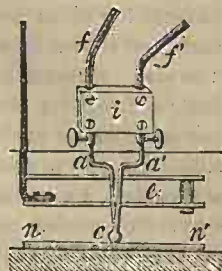


Fig. 692.

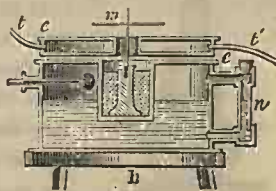


Fig. 693.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIX, p. 5.

appareil spécial dans lequel la plaque, placée sur un plateau tournant sur lui-même et pouvant se déplacer au moyen d'une vis micrométrique, était observée à travers un microscope grossissant 4 à 5 fois en diamètre.

Les expériences de M. Jeannettaz ont porté sur 44 espèces, dont 26 n'avaient pas encore été étudiées. Parmi les lois auxquelles il est arrivé, nous citerons la suivante : « Si un cristal offre un plan de clivage, la chaleur s'y propage plus facilement suivant les directions parallèles que dans la direction perpendiculaire à ce plan, » suivant laquelle on admet généralement que la densité est plus petite que dans les directions parallèles au plan de clivage. Cette manière de voir est confirmée par les expériences de M. Jeannettaz sur 14 espèces de roches schisteuses¹. Ayant soumis à l'expérience des plaques taillées perpendiculairement aux feuillettes, il a vu constamment le grand axe de l'ellipse dessinée par la graisse fondue être parallèle aux feuillettes, et le rapport des deux axes être d'autant plus grand que la structure schisteuse était plus nette. Des plaques taillées dans les feuillettes ont donné des cercles plus ou moins irréguliers.

L'expérience de de Sénarmont sur le verre comprimé (971) semble indiquer que la conductibilité est plus faible dans le sens de la plus grande densité. Mais l'état violent dans lequel se trouve le verre pendant la compression peut bien troubler la transmission de la chaleur.

§ 2. — CONDUCTIBILITÉ DES LIQUIDES

973. On a cru pendant longtemps que les liquides, et notamment l'eau, étaient de bons conducteurs de la chaleur. Rumfort, guidé par quelques observations faites accidentellement, entreprit une suite d'expériences par lesquelles il pensait démontrer au contraire que l'eau ne conduit pas. Il vit un jour l'alcool contenu dans un gros thermomètre éprouver, pendant son refroidissement, des mouvements rendus visibles par des parcelles de poussière en suspension²; le liquide refroidi près des parois du tube devenant plus dense et descendant, pendant que le liquide moins dense qui occupait l'axe, s'élevait. Pour éviter ces mouvements, Rumfort eut soin dès lors de toujours chauffer par le haut les liquides dont il voulait étudier la conductibilité. Voici une de ses principales expériences à ce sujet. Il fit congeler au fond d'une jarre de verre : de l'eau qui forma au milieu, un monticule de glace *n* (fig. 694), qu'il recouvrit d'une couche d'huile, ou de mercure, à 0°. Il enfonça ensuite dans le liquide, un cylindre de fer *f* chauffé à 100°, et ne remarqua aucune trace de fusion sur la glace, quoiqu'elle



Fig 694.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXVIII, p. 1202.

² *Essais politiques, économiques et philosophiques*, par B. comte de Rumfort, t. II.

fût à 0°, et que le cylindre en fût éloigné de moins d'un centimètre. Mais la durée de l'expérience fut sans doute trop courte, car nous allons voir que l'eau conduit un peu la chaleur.

Pictet et Nicholson ayant placé un thermomètre au fond d'un vase cylindrique rempli d'eau, et plongé un corps chaud dans ce liquide jusqu'à une petite distance du thermomètre, le virent monter légèrement. Pour être sûrs que la chaleur ne se communiquait pas par les parois du vase aux parties inférieures du liquide, J. Murray expérimenta avec de l'eau ou de l'huile à 0°, contenus dans une cavité cylindrique creusée dans un bloc de glace fondante. La chaleur reçue par les parois de glace pouvait en fondre une partie, mais ne pouvait l'échauffer (822). Au bout d'un quart d'heure, le thermomètre avait monté de 1°,5 environ, quand sa boule était recouverte d'une couche d'huile de $\frac{1}{2}$ pouce d'épaisseur. Dans une autre expérience, où la couche n'avait que $\frac{1}{4}$ de pouce, le thermomètre s'éleva de 2°,8 en 7 minutes. L'effet produit ne peut pas être attribué au rayonnement à travers le liquide, de la source, qui était un vase plein d'eau bouillante, car nous savons que l'eau n'est pas diathermane pour la chaleur obscure (875).



Fig. 695.

La figure 695 indique comment on dispose l'expérience : on verse de l'eau ou de l'huile bouillante dans un vase de métal dont la partie inférieure plonge dans le liquide, et l'on voit au bout de quelque temps le niveau se déplacer dans le thermomètre différentiel.

Pour le mercure, qui conduit beaucoup mieux que les autres liquides, probablement à cause de sa grande densité et de sa nature métallique, on peut employer un thermomètre ordinaire dont on fait passer la tige à travers les parois du vase (fig. 696). Si l'on prend pour source de chaleur une couche d'alcool enflammé, on voit ce thermomètre monter de plusieurs degrés en quelques minutes. Comme le mercure n'est pas diathermane, il est prouvé que l'état liquide n'est pas incompatible avec la conduction, ce qui confirme l'existence de cette propriété dans les autres liquides.



Fig. 696.

974. Expérience de Despretz. — Les doutes que l'on pouvait conserver sur la conductibilité de l'eau ont été complètement levés par les expériences de Despretz¹, qui a prouvé que les températures dans une colonne d'eau verticale, chauffée par le haut, forment une progression géométrique décroissante, comme dans une barre solide. L'appareil employé consiste en un vase cylindrique de bois rempli d'eau, de 1^m de hauteur et 0^m,218 de diamètre intérieur (fig. 697). Douze thermomètres, passant à travers les parois, son disposés horizontalement,

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LXXI, p. 306.

de manière que leur réservoir se trouve dans l'axe du vase. Une caisse de cuivre mince *c*, reposant sur la partie supérieure de la colonne d'eau et munie d'un thermomètre *a*, recevait de l'eau bouillante qu'on renouvelait de 5 en 5 minutes par les tubes *t*, *t'*, et qui maintenait sa température à $76^{\circ},9$, en moyenne. Au bout de 32 heures, les thermomètres furent stationnaires, et les six premiers ayant seuls monté d'une manière sensible, on put regarder la colonne comme infinie. Le rapport entre les excès de deux thermomètres consécutifs s'est trouvé sensiblement constant. Pour avoir une moyenne plus sûre, on prenait le rapport de deux en deux ou de trois en trois, et on en extrayait la racine carrée ou la racine cubique.

Dans une série d'expériences, Despretz avait disposé quelques thermomètres, dont les réservoirs étaient près de la paroi, et trois autres, θ , dans des trous obliques et remplis de mercure, pratiqués dans la paroi même. Ces thermomètres montrèrent que la température d'une même couche horizontale va en diminuant du centre à la circonférence, ce qui prouve que la propagation dans l'eau n'est pas due à l'influence des parois du vase. Un sel dissous ne paraît pas changer la conductibilité; car le quotient s'est trouvé sensiblement le même, quand l'eau contenait 4 et 11 pour cent de sel marin.

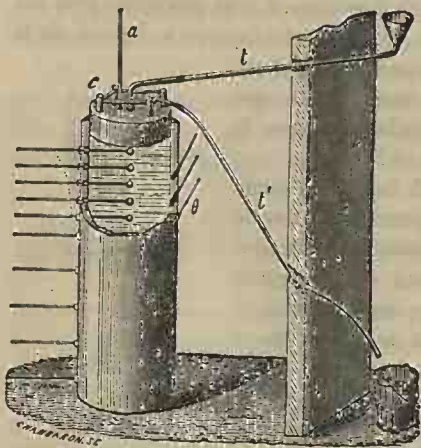


Fig. 697.

975. Convection dans les liquides. — Il résulte de ce qui précède que l'eau conduit la chaleur, mais très faiblement. Quand la chaleur se propage dans une masse liquide, c'est ordinairement

par des mouvements provenant de l'ascension des parties rendues moins denses par la chaleur, et de la descente de celles qui sont plus froides. La chaleur est donc *charriée* d'un point à l'autre par *convection*, c'est-à-dire par le transport des parties qui la contiennent, et non transmise par conductibilité proprement dite. Pour apercevoir ces mouvements, on chauffe par le milieu du fond, un vase large et profond (fig. 698), rempli d'eau à laquelle on a mêlé des poussières de même densité, comme de la sciure de bois, qui, une fois imbibée, reste en suspension. On voit se former un courant ascendant dans l'axe du vase, et des courants descendants le long des parois. Pendant le refroidissement, il se produit des mouvements en sens inverse. On voit donc que, pour échauffer rapidement un liquide, il faut introduire la chaleur par le fond du vase plutôt que par le côté. Si l'on chauffait le liquide en dessus, les couches supérieures pourraient

bouillir, pendant que les portions situées à une certaine profondeur resteraient froides, et pourraient même rester à l'état de glace.

Il résulte de ce qui précède, que tout ce qui gêne les mouvements d'un liquide doit empêcher la chaleur de s'y propager. C'est, en effet, ce que Rumfort a reconnu. Ayant introduit le réservoir d'un thermomètre à 100°, au centre d'un ballon rempli d'eau contenant des matières qui en diminuaient la fluidité, comme de l'empois, ou qui en gênaient les mouvements, comme du duvet, de la ouate, il vit le thermomètre se refroidir d'autant plus lentement que les mouvements du liquide étaient plus gênés. On explique de la même manière pourquoi les matières imbibées d'eau, les bouillies, les compotes se refroidissent si lentement. Les fruits charnus, les plantes grasses, dont les tissus sont imbibés de suc emprisonnés dans des cellules, conduisent très-mal la chaleur, et l'on peut produire l'ébullition en un point, au moyen d'un verre ardent, sans que la température des parties voisines change sensiblement.

Les tissus des animaux sont aussi mauvais conducteurs, parce qu'ils sont remplis de différentes humeurs. Aussi, peut-on fortement échauffer quelque

partie de la surface du corps, sans produire d'impression de chaleur générale. Si l'on éprouve une semblable impression quand on se met devant le feu, dans une chambre froide, c'est que le sang, en circulant, charrie la chaleur qu'il prend aux points échauffés directement, et que cete chaleur agit ensuite comme stimulant, pour accroître la quantité fournie par l'organisme.

976. Calorifères à eau chaude. — Les calorifères à eau chaude, fondés sur la convection des masses liquides chauffées par le bas, ont été imaginés par Bonnemain, vers la fin du xvii^e siècle,

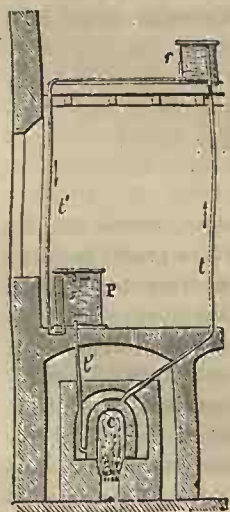


Fig. 699.

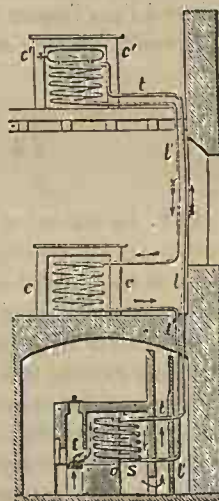


Fig. 700.

pour le chauffage des couverts artificiels, et appliqués par Léon Duvoir au chauffage des édifices. La figure 699 représente un des appels employés pour

cet objet. Une longue suite de tuyaux forme deux systèmes, dans l'un desquels l'eau chaude monte; pendant qu'elle descend dans l'autre, après avoir cédé une partie de sa chaleur aux tuyaux. L'eau est chauffée dans une chaudière *c*, dont elle gagne la partie supérieure, après s'être dilatée; elle monte par le tuyau *t*, qui doit présenter le moins de courbures possible, et arrive dans un réservoir supérieur *r*, sorte de poêle à eau chaude, où elle se refroidit en cédant de sa chaleur aux parois. Devenue plus dense, elle descend par le tuyau *t'*, arrive dans le poêle *P*, auquel elle cède encore de sa chaleur, et revient à la chaudière *c*, où elle se réchauffe pour monter de nouveau. Le dernier réservoir, *r*, porte à sa partie supérieure une ouverture qui sert à remplir l'appareil, et par laquelle s'échappe l'air qui se dégage de l'eau échauffée (I, 454).

La figure 700 représente un calorifère à haute température, imaginé par Perkins. L'eau est renfermée dans un système de tuyaux continus remplis d'eau. Ce liquide s'échauffe dans la partie *s* enroulée en hélice et exposée à la chaleur du foyer *f*. Cette hélice traverse un mur *o*, qui partage la chambre qu'elle occupe en deux compartiments égaux, que la flamme parcourt successivement en passant par dessus le mur, pour remonter enfin dans le conduit de la cheminée, suivant la direction des flèches. L'eau, échauffée dans l'hélice, s'élève dans le tuyau *ttt*, et redescend par le tube *t't't'*. Ce tube forme des hélices *c'e'*, *ce*, renfermées dans des espèces de foyers, où l'air est échauffé aux dépens de la chaleur que le tuyau reçoit de l'eau. Un réservoir placé en haut de l'hélice *c'e'* est destiné à laisser à l'eau l'espace nécessaire pour qu'elle se dilate librement, et sert aussi à recueillir l'air qui s'en dégage.

§ 3. — DE LA CONDUCTIBILITÉ DES GAZ

977. La chaleur se propage dans les gaz par *convection*, comme dans les liquides, et les mouvements s'y produisent avec une bien plus grande facilité, à cause de leur mobilité et de leur grande dilatabilité. Ces mouvements empêchent de décider nettement si les gaz possèdent une conductibilité propre; car si l'on essaie de les échauffer par la partie supérieure, comme ils sont très-diathermanes, la chaleur rayonne vers la paroi inférieure du vase qui les contient, l'échauffe, et les gaz en contact avec cette paroi se dilatant, des mouvements se produisent. La conductibilité étant due au rayonnement particulière, et les gaz n'ayant qu'un faible pouvoir rayonnant, on doit penser que, s'ils sont conducteurs, ils le sont à un degré excessivement faible: c'est ce que l'on montre en gênant leurs mouvements.

Thompson a fait une multitude d'expériences à ce sujet¹ par une méthode qui a aussi été employée par Rumfort, en 1792. L'appareil employé, nommé

¹ Bibliothèque britannique (Sciences et arts), t. I, p. 11.

thermomètre de passage, consiste en un thermomètre ordinaire dont la boule occupe le centre d'un ballon de verre. On remplit ce ballon de poids égaux de substances très-divisées, et on le plonge pendant longtemps dans l'eau bouillante, puis on l'enfonce dans la glace fondante, et l'on observe le temps que met le thermomètre à baisser de 10 degrés. Thompson a reconnu par ce moyen que la chaleur du thermomètre ne passe au-dehors qu'avec une extrême lenteur, les matières filamenteuses gênant les mouvements du gaz. Il existe aussi une adhésion entre le gaz et ces matières (I, 461); car, si on les plonge dans l'eau, et qu'on fasse le vide au-dessus, on voit chaque filament se couvrir d'une infinité de petites bulles d'air qui s'en détachent et lui donnent un aspect argenté. Les expériences ont été faites sur la *soie*, la *laine*, le *colon* non travaillés; le *linge* en fine charpie; le *duvet* de *castor*, de *lièvre blanc de Russie*, et l'*édredon*. Ces deux dernières substances sont celles qui retiennent le mieux la chaleur.



Fig. 701.

En général, le degré de ténuité et la distribution uniforme des filaments contribuent beaucoup à la faculté de conserver la chaleur; ce qui montre bien l'influence du gaz interposé. Les fourrures retiennent ainsi l'air logé entre les poils, et d'autant mieux qu'ils sont plus fins et plus serrés; c'est pourquoi elles empêchent le refroidissement des corps qu'elles enveloppent.

978. Conductibilité de l'hydrogène. — Parmi les gaz, l'hydrogène paraît jouir d'une conductibilité propre assez sensible. Nous avons déjà vu (938) combien est grand son pouvoir refroidissant, qui est dû au moins en grande partie à son extrême mobilité. Voici par quelles expériences on a cherché à prouver que ce gaz possède une conductibilité propre. Si l'on fait rougir un fil de platine *f* (fig. 701), par le passage d'un courant électrique, et qu'on le recouvre ensuite d'une éprouvette remplie d'hydrogène, on voit l'incandescence cesser aussitôt. Cette expérience, due à Grove, peut se faire aussi au moyen de l'appareil (fig. 702). Le fil de platine est tendu entre les tubulures *t, t* d'un vase de verre dans lequel on peut

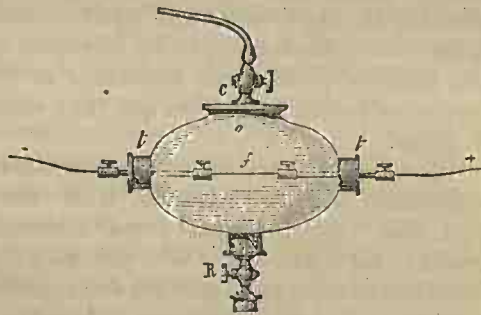


Fig. 702.

faire le vide par le robinet *R*, et introduire des gaz par le robinet *c*. Les résultats restent les mêmes quand on remplace le vase par un tube étroit, dans lequel le gaz ne peut former des courants, et même quand on y introduit du duvet, qui les empêche encore plus complètement.

Après ces expériences, nous citerons la suivante, due à Favre et Silbermann, sur laquelle nous aurons à revenir : on comprime un gaz en enfonçant brusquement un piston dans un corps de pompe ; ce gaz s'échauffe d'un certain nombre de degrés, et si, quand la chaleur est dissipée, on retire brusquement le piston, la température du gaz s'abaisse d'un nombre de degrés toujours un peu moindre, la surface abandonnée au contact du gaz par le piston qui se retire, allant en augmentant et cédant de la chaleur au gaz. Or, la différence, qui est ordinairement très-petite, est très-prononcée pour l'hydrogène. Par exemple, dans une expérience, l'échauffement étant de $9^{\circ},7$, le refroidissement ne fut que de 5° .

Magnus a constaté la conductibilité du gaz hydrogène par une méthode directe ¹. Ayant échauffé au moyen d'un vase plein d'eau bouillante placé au haut d'un tube vertical, un thermomètre placé au bas, ce tube étant successivement vide et rempli de divers gaz, il vit le thermomètre monter plus haut dans l'hydrogène que dans le vide, et d'autant plus que le gaz était plus comprimé. L'hydrogène ajoute donc l'effet de sa conductibilité à celui du rayonnement. Avec les autres gaz, la température finale est plus basse que dans le vide, ce qui montre que leur conductibilité ne compense pas ce qui manque à leur diathermanéité. Quand les mouvements des gaz sont gênés par des substances filamenteuses, l'hydrogène manifeste encore sa conductibilité exceptionnelle.

MM. Kundt et Warburg ² ont évalué le rapport entre les conductibilités de l'air et de l'hydrogène, par la méthode du refroidissement, appliquée avec trois enceintes différentes maintenues à 0° . Sous les pressions ordinaires, la convection des gaz masque l'effet de leur conductibilité propre ; mais au-dessous de 150^{mm} environ, la vitesse de refroidissement ne change plus avec la pression, et comme la théorie indique que la conductibilité est indépendante de la pression, on doit admettre que la convection n'a plus d'influence sensible. Il n'y a plus qu'à retrancher du refroidissement total, la part du rayonnement, qui a été évaluée en faisant le vide le plus complet possible, au moyen d'une pompe à mercure (I, 405), dans l'enceinte portée à une température de 200° . On a trouvé ainsi que l'hydrogène conduit 7 fois mieux que l'air ; résultat trouvé, de son côté, par M. Stefan.

Malgré toutes ces expériences, divers physiciens ont émis des doutes sur la conductibilité réelle de l'hydrogène. M. H. Buff attribue le refroidissement rapide dans ce gaz, à son grand pouvoir diathermane, qui est tel que le rayonnement s'y fait comme dans le vide ; mais alors le refroidissement dans le vide devrait être au moins aussi rapide que dans l'hydrogène empêché de se mouvoir ; ce qui n'est pas, comme nous venons de le voir.

La grande conductibilité relative de l'hydrogène nous semble donc devoir être admise. Ce gaz est aux autres gaz ce qu'est le mercure pour les autres liquides. Du reste, cette grande conductibilité se conçoit, quand on se rappelle que

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXI, p. 380.

² *Annales de Poggendorff*, CLV et CLVI ; et *Journal de physique*, d'Almeida, t. V, p. 418.

l'hydrogène se comporte dans les actions chimiques d'une manière analogue aux métaux, qui sont les meilleurs conducteurs de la chaleur ; si bien que beaucoup de chimistes le considèrent comme un *métal gazeux*. La grande conductibilité relative de l'hydrogène vient, à son tour, à l'appui de la manière de voir des chimistes.

979. Applications. — Les vêtements que l'on appelle chauds ne font qu'empêcher la chaleur du corps de se dissiper au-dehors. Ils doivent cette propriété à leur structure spongieuse, et à l'air qui remplit les interstices qui existent entre leurs filaments. Si on les condensait par compression, tout en leur donnant la même épaisseur, on leur ferait perdre de leur efficacité. Les fourrures sont plus chaudes quand le poil est tourné en dedans, parce que l'air ne pouvant s'y renouveler, forme une couche stagnante épaisse qui arrête la chaleur. Un tissu dense et appliqué sur la peau de manière à en écarter l'air, loin de conserver la chaleur, peut favoriser sa déperdition. C'est ainsi que certains gants collants refroidissent les mains.

Quand on veut empêcher un corps de se refroidir, il faut aussi l'envelopper d'une étoffe épaisse de laine non comprimée, ou d'une fourrure. La même précaution doit être prise pour empêcher la chaleur de pénétrer dans les vases où l'on veut conserver de la glace.

Dans les pays froids, on empêche la chaleur de sortir à travers les croisées des appartements chauffés, en mettant un double vitrage formé, soit en dressant deux châssis parallèles, soit en appliquant des vitres de chaque côté du même châssis. Dans le premier cas, on met du sable sec entre les deux châssis, et l'on y plante des cornets remplis de sel calciné, pour absorber l'humidité, qui, en se déposant sur les vitres, en troublerait la transparence. On emploie aussi ces doubles vitrages dans nos climats, pour les orangeries, les serres chaudes. L'air interposé arrête la chaleur, et pour rendre l'effet plus prononcé, on en gêne les mouvements au moyen de lames de verre disposées transversalement. Les doubles vitrages offrent un autre avantage ; quand il fait soleil, ils laissent entrer les rayons solaires, tout en empêchant la chaleur ainsi introduite de pouvoir s'échapper par la même voie, comme il résulte de ce qui suit.

980. Chambre de Saussure. — Cet appareil imaginé en 1767 par de Saussure, qui le nommait *héliothermomètre*, consiste en une caisse en bois mauvais conducteur, dont l'intérieur est noirci, et dont une des faces est formée par trois lames de verre séparées par des couches d'air. Quand cet appareil est exposé aux rayons solaires, un thermomètre placé dans l'intérieur peut monter jusqu'à 80° et 100°, et l'on peut y faire bouillir de l'eau. Pour nous rendre compte de ce résultat, remarquons que les rayons solaires qui frappent les parois intérieures de la chambre, ne pénétrant qu'à une faible profondeur, ces parois s'échauffent beaucoup à leur surface, et cèdent par contact leur chaleur à l'air intérieur. Cet air s'échauffe donc notablement. La chaleur ne peut s'échapper de la chambre, car les parois sont formées de mauvais conducteurs, et les lames de verre, ainsi que les couches d'air qui les séparent, ne laissent pas sortir la chaleur. Quand aux rayons émis par les parois échauffées, et dirigés

vers la cloison vitrée, ils ne peuvent non plus la franchir, le verre étant très-peu diathermane pour les rayons obscurs (865). Cette cloison laisse donc entrer la chaleur solaire, mais ne lui permet pas de sortir; d'où son accumulation dans l'intérieur de la chambre. C'est par les mêmes causes que l'air s'échauffe notablement sous les cloches de verre dont on recouvre certaines plantes.

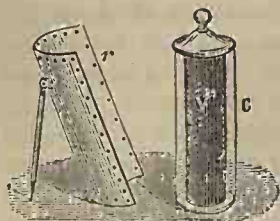


Fig. 703. — 1/20.

Ducarla a perfectionné l'appareil de de Saussure en le formant ainsi de cloches superposées portées par de mauvais conducteurs, et plaçant dans l'intérieur un vase noirci contenant les matières à échauffer. J. Herschell, au cap de Bonne-Espérance, faisant une application en grand de cette disposition, a fait cuire, au moyen des

rayons du soleil, un bœuf à la mode dans deux boîtes noircies garnies d'une vitre. **Machines solaires.** — M. Mouchot a combiné divers appareils dans lesquels il applique le principe de la chambre de de Saussure avec divers perfectionnements, et en y adjoignant des miroirs courbes pour concentrer les rayons solaires. La figure 703 représente la disposition adoptée pour cuire les aliments. Ils sont introduits dans un vase métallique noirci V, placé dans un cylindre de verre C,

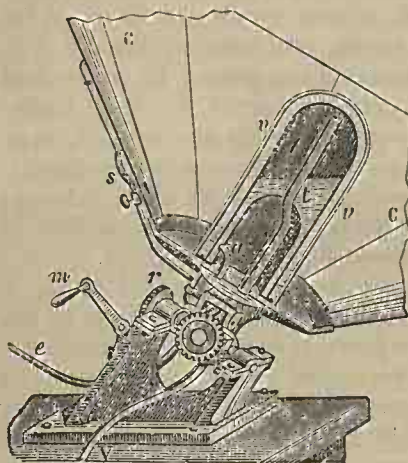


Fig. 704. — 1/40.

qui en est séparé par une couche d'air, et est fermé par un couvercle de verre. La chaleur solaire est réfléchiée et concentrée sur le vase V, par un miroir cylindrique r, garni de plaqué d'argent. Au bout de 1^h 30^m, trois litres d'eau sont entrés en ébullition; en 4^h, 1^{ki} de viande a produit un bouillon parfait; et, en 30^m, l'alcool de 2 litres de vin a été distillé. En plaçant un disque de fer sous le couvercle de verre, on forme une espèce de four, dans lequel 1^{ki} de pâte a donné, en moins de 3^h, un pain parfaitement cuit.

Générateur solaire. — Au moyen de l'appareil (fig. 704), M. Mouchot obtient, en moins

d'une heure, de la vapeur à 5 atmosphères de pression. Sur un plateau de fonte est fixée une petite chaudière noircie, en forme de cloche renversée, dans laquelle on introduit de l'eau par le tube ea. Cette chaudière est enveloppée d'une cloche de verre vv, qui ne la touche pas. Le tout est entouré d'un vaste

réflecteur en forme de tronc de cône CC, incliné suivant la déclinaison du soleil, et dont on maintient l'axe dans la direction de cet astre pendant son mouvement diurne, en faisant tourner la roue *r* au moyen d'une vis sans fin et de la manivelle *m*. La vapeur, sortant par le tuyau *tV*, a été employée pour faire marcher une petite machine à vapeur, cuire des racines en grande quantité, distiller 5 litres de vin en un quart-d'heure, etc.

Ces expériences ont été faites à Tours. Il est probable que, dans les pays où le soleil est plus ardent et le ciel habituellement pur, les résultats, plus importants, pourraient donner lieu à des applications suivies.

CHAPITRE IV

DILATATION DES CORPS

Le feu raréfie, et le froid condense.
PARMÉNIDE (— 500).

§ 1. — DILATATION DES SOLIDES

I. De la dilatation en général.

981. Dilatabilité. — Dans ce chapitre et les deux suivants, nous allons étudier les effets que la chaleur produit sur les corps, à commencer par la *dilatation*.

La chaleur *dilate* tous les corps. Nous avons vu comment on peut le montrer, dans le cas des solides, des liquides et des gaz. Ce phénomène paraît connu depuis l'antiquité la plus reculée. L'Académie *del Cimento*, puis Boerhave, ont prouvé, par des exemples multipliés, que la *dilatabilité* est une propriété générale des corps; et Buffon a complété la preuve en opérant sur les matières pierreuses.

Il y a des corps qui semblent faire exception. Par exemple, l'argile, le kaolin, bien desséchés se contractent dans le feu, mais cela tient à ce qu'ils sont des mélanges, dont les éléments se combinent en partie, en éprouvant une vitrification partielle. Ce qui montre qu'il y a changement dans la nature chimique du corps, c'est qu'il ne reprend pas son volume primitif après le refroidissement. Le bois se contracte aussi quand on l'échauffe, mais c'est qu'il perd de l'humidité et diminue de poids. Nous verrons d'autres exceptions plus réelles, mais qui se

produisent dans des circonstances particulières, qui font que la généralité du fait n'est pas atteinte.

L'augmentation du volume des corps sous l'influence de la chaleur, se nomme *dilatation*; on l'a appelé aussi *expansion*, *raréfaction*. On s'en rend compte, dans la théorie mécanique de la chaleur, en remarquant que l'échauffement augmente l'amplitude des vibrations des molécules, qui tendent dès-lors à s'écarter les unes des autres; de même qu'une barre qui vibre longitudinalement paraît plus longue, puisqu'elle vient choquer avec une grande énergie, des obstacles qu'elle n'atteignait pas dans l'état de repos (I, 763).

982. Effets de la dilatation des corps. — Les corps solides se dilatent moins que les fluides, cependant leur dilatation produit des effets assez étendus pour qu'il soit nécessaire d'y avoir égard dans une foule de circonstances. C'est à la dilatation qu'est due la rupture des corps mauvais conducteurs exposés brusquement au feu, comme les vases de verre épais; la dilatation se produisant d'abord dans les parties extérieures, les parties non échauffées sont écartées jusqu'à la rupture. Quand le vase est mince, il peut encore se briser par les flexions qui résultent de la déformation qu'il subit en se dilatant inégalement, suivant les parties échauffées. Si le vase est rempli d'eau, ce liquide distribue la chaleur par convection et la rupture est évitée. Un métal froid appuyé sur du verre brûlant le fait fendre, en enlevant la chaleur aux parties touchées, qui se contractent et se séparent; un fer rouge fend et divise un tube de verre sur lequel on l'applique.

La dilatation des métaux produit des effets intenses : les chaudières de plomb ou de zinc, engagées dans des fourneaux de briques, se tourmentent jusqu'à se déchirer, si on ne leur laisse pas de jeu. Les toitures en zinc se fendent si on en soude les pièces les unes aux autres, au lieu de les superposer comme des tuiles pour leur laisser la liberté de se dilater. Les tuyaux de conduite exposés à l'air, doivent être *compensés* : de distance en distance, on les dispose de manière qu'une partie puisse entrer dans l'autre, à travers une boîte à étoupes qui empêche les fuites. Les pierres des parapets sont quelquefois brisées par les barres de fer scellées à leur partie supérieure pour les lier les unes aux autres. On a soin de laisser un espace de quelques millimètres entre les rails placés bout à bout sur les chemins de fer, pour qu'ils puissent se dilater librement. Quand la température passe de -20° à 40° , un kilomètre de rails se dilate de $0^{\text{m}},72$.

Les murs des édifices se dilatent sensiblement. La clef de voûte des grands ponts s'élève et s'abaisse par les variations de température. Vicat a observé, au pont de Souillac, sur la Dordogne, de semblables effets, tellement prononcés que certains joints s'ouvrent quand il fait grand froid et se resserrent quand il fait chaud, surtout du côté exposé au midi¹. Les instruments astronomiques, quand ils sont placés sur des édifices élevés, sont quelquefois sensiblement dérangés par les dilatations des murs exposés au soleil. Les édifices peuvent même être

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXVII et XXXVI.

soulevés par la dilatation du sol; c'est ainsi qu'on a constaté que les observatoires d'Armagh, et du collège de la Trinité, à Dublin, sont plus hauts pendant l'été que pendant l'hiver.

983. Force développée par la dilatation. — Quand on chauffe une barre *non flexible*, appuyée par ses deux extrémités contre des obstacles même très-résistants, elle se dilate, et les écarte ou les traverse, tant est grande l'énergie avec laquelle se fait la dilatation. Pour empêcher cet effet, il faudrait exercer un effort capable de comprimer la barre dilatée, de toute la quantité dont elle s'est allongée; et nous avons vu (I, 501) combien cet effort est considérable. Si la barre est chauffée et fixée par ses extrémités à des obstacles, elle les rapproche quand elle se refroidit; à moins que la résistance qu'ils opposent ne soit équivalente à l'effort, *P*, capable de produire la rupture, ou capable d'allonger cette barre par tension, d'une quantité égale à celle dont elle se contracte par le refroidissement. Une barre de fer de 1^m de long se

dilate de 0,0012 pour 100°. La formule $l = \frac{1}{k} \frac{PL}{s}$

(I, 501) donne, dans le cas d'une barre de 25^{cm} carrés de section, ou 2 500^{mm} carrés, $P = 63\ 000\text{kil}$, en prenant pour le coefficient d'élasticité du fer, le nombre rond 21000. Cette valeur de *P* représente l'effort qu'il faudrait exercer pour empêcher une barre carrée de 5^{cm} de côté de se contracter, de 100° à 0°, ou de se dilater de 0° à 100°.

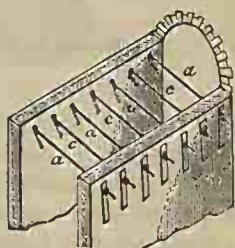


Fig. 703.

Applications. — On doit à Molard une application curieuse de la force développée par la contraction des barres qui se refroidissent. Les murs d'une galerie voûtée du Conservatoire des Arts et Métiers de Paris, avaient été écartés par la poussée de la voûte, et l'édifice menaçait ruine. Pour remédier à cet état de choses, Molard disposa une série de barres de fer, *a, c, a, c, . . .* (fig. 703) traversant les murs, et terminées aux deux bouts par des vis munies d'écrous. Ces barres furent chauffées fortement au moyen de charbons ardents placés sur des grilles qu'on y suspendait. D'abord on fit chauffer seulement les barres *a*, et quand elles se furent dilatées, on serra extérieurement les écrous, qui s'appuyaient sur des madriers épais, afin de répartir la pression sur une grande étendue. On laissa ensuite refroidir les barres *a*; elles se contractèrent, et les murs, pressés par les écrous, se rapprochèrent d'une quantité égale à la contraction. Les barres *c* furent chauffées à leur tour; on serra leurs écrous, on les laissa refroidir, et les murs furent de nouveau rapprochés. En continuant ainsi, on parvint à ramener les murs dans leur aplomb, et on laissa en place les barres chauffées en dernier lieu.

Une application analogue a été faite en Hollande, en 1873, au moyen de la chaleur solaire¹. Une poutre en fer, de plus de 150^m de longueur, entrant dans

¹ *Nature*, revue des Sciences, t. I, p. 438.

la construction d'un pont, se trouva trop avancée de 3^m dans le sens de sa longueur. L'extrémité trop avancée ayant été fixée le matin, la chaleur du soleil fit dilater la poutre, dont l'autre bout se déplaça d'une certaine quantité. Le soir on fixa à son tour cette dernière, l'extrémité opposée recula alors par la contraction due au refroidissement; et il suffit de répéter cette double opération le lendemain pour que la poutre fût ramenée à la place voulue.

On tire parti de la contraction des corps qui se refroidissent, pour frotter les roues des voitures : on entoure la jante d'un cercle de fer fortement chauffé et prenant bien juste. Par le refroidissement, cette bande de fer se contracte et serre fortement le contour de la roue, dont toutes les parties sont ainsi maintenues avec une grande force. Les cercles de fer à rebord qui entourent les roues des locomotives et des wagons, se placent par le même moyen. Quand on veut les enlever, on les fait chauffer pour les dilater et en grandir le contour.

II. Mesure de la dilatation linéaire des solides, entre 0° et 100°.

984. Pour calculer les effets de la dilatation, il est nécessaire de connaître la quantité dont les corps se dilatent, sous des dimensions et pour un échauffement connus. Cette quantité étant très-petite, il faut employer, pour la mesurer, des moyens très-précis que nous allons faire connaître. Dans le cas des solides, il y a deux espèces de dilatation à considérer : la dilatation dans un seul sens où *dilatation linéaire*, et la dilatation en volume, ou *dilatation cubique*.

Muschenbroek est le premier qui se soit occupé de mesurer les dilatations linéaires des solides. La barre en expérience traversait la paroi d'une caisse pleine d'eau chaude, et son extrémité poussait un système d'engrenages faisant mouvoir une aiguille. Ce procédé ne pouvait donner qu'une grossière approximation, la barre n'étant pas tout entière dans l'eau chaude. Bouguer, à Quito, a employé une méthode tout aussi défectueuse. Sméaton se servait d'un appareil analogue au *pyromètre au cadran* (819); il le plongeait entièrement dans l'eau chaude, de manière qu'il n'obtenait réellement que la différence entre la dilatation de la barre et celle de la table de bois de l'appareil. F. Berthoud a employé un moyen analogue : une des extrémités de la barre et l'axe de l'aiguille étaient fixés à une plaque de marbre, dont la dilatation affectait aussi les résultats. L'appareil était placé dans une étuve, et des thermomètres, appuyés sur le marbre, donnaient la température. Dans ces sortes d'expériences, la principale difficulté consiste à donner à la barre une température bien uniforme et à rendre une de ses extrémités parfaitement fixe. Lavoisier et Laplace, en 1781 et 1782, et le général Roy, en 1787, ont obtenu une température uniforme, en plaçant la barre horizontalement dans un bassin plein d'eau chaude.

985. Expériences de Lavoisier et Laplace. — Le travail de Lavoisier et Laplace, encore inédit, lorsque le premier de ces savants illustres tomba

victime de la fureur révolutionnaire, a été publié, en 1816, par Biot, qui en avait reçu le manuscrit de la veuve de Lavoisier¹.

L'appareil employé consiste en quatre massifs en pierre de taille m, m, m, m (fig. 706), fondés en plein air, à 2 mètres de profondeur, et entre lesquels se trouve une cuve de 2^m de long. Dans cette cuve est placée la barre bo que l'on veut étudier. Cette barre s'appuie sur des rouleaux soutenus par des bandes de verre l, l , dont on voit la disposition à part en l' ; r est un des rouleaux, et o' la section de la barre. Les bandes de verre l, l sont fixées à des traverses horizontales qui s'appuient sur les massifs. Cette disposition permet à la barre de se déplacer librement dans le sens de sa longueur. L'extrémité qui doit rester fixe presse une bande de verre verticale eo (fig. 706 et 707), soutenue en e, e par une traverse fixée à deux des massifs, et appuyée contre

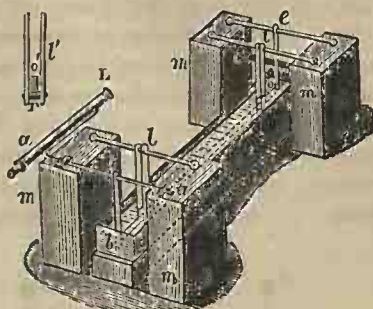


Fig. 706.

une barre horizontale e qui l'empêche de reculer. L'extrémité b de la barre bo pousse une bande de verre tb fixée à une tige cylindrique aa , pouvant tourner sur elle-même en entraînant dans son mouvement une lunette à réticule, L , qui lui est perpendiculaire, et qui décrit un angle quand la barre bo , en se dilatant, pousse la bande de verre tb . Le fil horizontal du réticule de la lunette parcourt alors les divisions d'une échelle verticale $\alpha\beta$ (fig. 707), placée à une distance d'une cinquantaine de mètres.

Voici comment on procédait : la barre étant d'abord entourée d'eau à 0°, on observait sur quelle division de l'échelle se projetait le fil de la lunette. On retirait ensuite cette eau par un robinet, et on la remplaçait par de l'eau bouillante². Quand la température, donnée par des thermomètres placés à côté de la barre, était devenue stationnaire, on observait sur quelle division de la mire se projetait le fil de la lunette, et l'on en déduisait le nombre de divisions que ce fil avait parcourues. Ce résultat servait à calculer la quantité dont la barre s'était allongée. Soient ax et $\alpha\beta$ (fig. 707) les deux directions

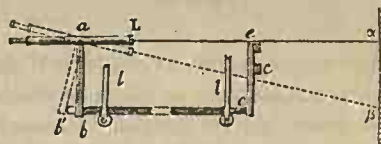


Fig. 707.

¹ *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. I, p. 446.

² Dans les premières expériences, on chauffait la cuve au moyen d'un fourneau placé dessous; mais ce moyen était long, et la chaleur pouvait se communiquer aux diverses parties de l'appareil, et, en les dilatant, en modifier les dimensions.

successives de la lunette, et bb' l'allongement cherché de la barre ; les triangles abb' et $ax\beta$ étant semblables, on a $bb' : \alpha\beta = ab : ax$. Le rapport entre bb' et $\alpha\beta$ est donc constant et égal à $ab : ax$. Si donc ce rapport est une fois connu, il suffira de mesurer $\alpha\beta$, pour obtenir la dilatation bb' . Or une expérience directe avait donné le rapport $\frac{4}{743}$. La dilatation cherchée sera donc $\frac{4}{743} \alpha\beta$. Cette dilatation est obtenue ainsi avec une grande précision, l'erreur commise dans la mesure de $\alpha\beta$ étant divisée par 744.

986. Méthode de Roy et Ramsden. — L'opticien Ramsden a construit, sous la direction du général Roy, un appareil dans lequel il a cherché à obtenir un point fixe plus invariable que dans l'appareil précédent, la lame de verre eo augmentant d'épaisseur en se dilatant. Trois cuves parallèles A, C, B (fig. 708), renferment trois barres d'égale longueur. La barre du milieu, posée sur des rouleaux, est celle dont on veut mesurer la dilatation, les deux autres sont des prismes de fonte. Toutes les trois portent à leurs extrémités des tiges verticales munies de plaques percées de très-petits trous (ou d'anneaux traversés par des fils croisés) o', o, o'' et n', n, n'' . Les barres étant entourées de glace fondante, on les dispose de manière que les trois trous soient en ligne droite à chaque extrémité, ce que l'on reconnaît facilement en regardant à travers ; alors la barre du milieu doit s'appuyer par son extrémité de droite sur la pointe d'une vis micrométrique v qui traverse la paroi de la cuve C. On rem-

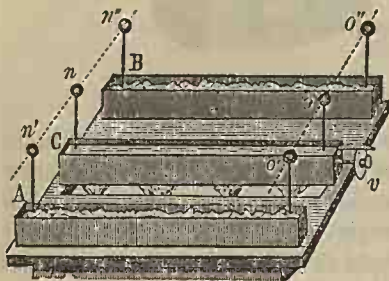


Fig. 708.

place ensuite la glace de cette cuve C par de l'eau chaude, dont la température, maintenue constante au moyen de plusieurs lampes à alcool placées au-dessous, est donnée par des thermomètres couchés le long de la barre. Cette barre se dilate, et les trous n', n, n'' n'étant plus en ligne droite, on la déplace, en retirant la vis, de manière à mettre de nouveau ces trous en ligne droite. La quantité dont a tourné la tête de la vis donne alors l'allongement qu'a éprouvé la barre. — La vis se dilatant par la chaleur, il en résulte une petite erreur provenant de son allongement ; mais il paraît qu'elle est insensible.

987. Lois et résultats généraux. — On nomme *coefficient de dilatation linéaire* l'augmentation de l'unité de longueur d'un corps, pour une élévation de température de 1° . Il est facile de passer de l'allongement observé l , au coefficient, quand on connaît la longueur L de la barre à 0° , et l'élévation de température t . En effet, l'allongement pour l'unité de longueur, est L fois plus petit que pour la longueur L , et pour 1° , l fois plus petit que pour t° . Le coefficient de dilatation sera donc $k = l : Lt$. Cela suppose que la dilatation est la même pour chaque degré. C'est, en effet, ce que Laplace et Lavoisier ont

constaté jusqu'à 100°; car ils ont toujours trouvé la même valeur pour k , quelle que fût l'élevation de température t . Il résulte de là que, jusqu'à 100°, la dilatation des solides est régulière. L'acier semble faire exception : sa dilatation pour 1° diminue quand la température s'élève, mais cela tient au recuit que lui fait éprouver la chaleur; car on a constaté que l'acier recuit se dilate moins que l'acier trempé. Le tableau qui suit contient les coefficients de dilatation linéaire d'un certain nombre de corps. Il faut remarquer qu'ils ne conviennent rigoureusement qu'aux échantillons qui ont servi à les déterminer. Lors donc qu'on a besoin d'une grande précision, on doit mesurer directement la dilatation de l'échantillon auquel on a affaire :

Suivant Lavoisier et Laplace.

SUBSTANCES	COEFFICIENTS	SUBSTANCES	COEFFICIENTS
Flint-glass anglais. . . .	0,000 008 116	Or de départ.	0,000 014 660
Verre de France avec plomb.	» 8 719	Or recuit (titre de Paris) »	45 135
Tube de verre sans plomb »	8 969	Or non recuit.	» 45 515
Verre de Saint-Gobain.. »	8 908	Cuivre.	» 17 173
Acier non trempé.	» 10 792	Laiton.	» 18 782
Acier trempé jaune, recuit à 65°.	» 12 395	Argent (titre de Paris).. »	19 086
Fer doux forgé.	» 12 204	Argent de coupelle.. »	19 097
Fer rond passé à la filière »	12 350	Étain de Malacca.	» 19 376
		Étain de Falmouth.. »	21 729
		Plomb.	» 28 483

Suivant Sméaton.

Verre blanc.	0,000 008 333	Soudure (2 cuiv., 1 zinc) 0,000 020 583	
Régule martiale d'antim. »	10 833	Étain fin.	» 22 833
Acier poule.	» 11 500	Étain en grains.	» 24 833
Acier trempé.	» 12 250	Soudure blanche (1 ét., 2 plomb).	» 25 053
Fer.	» 12 583	Zinc 8, étain 1, un peu forgé.	» 26 916
Bismuth.	» 13 916	Plomb.	» 28 666
Cuivre rouge battu.	» 17 000	Zinc.	» 29 416
Cuivre rouge, $\frac{1}{3}$ d'étain.. »	18 166	Zinc, allongé de $\frac{1}{12}$ au marteau.	» 31 083
Cuivre jaune fondu.. »	18 750		
Cuivre jaune, $\frac{1}{17}$ d'étain. »	19 083		
Fil de laiton.	» 19 333		
Métal des miroirs.	» 19 333		

Suivant divers observateurs.

Fer fondu (prisme de), (suivant Roy).	0,000 011 400	Platine (suivant Borda). 0,000 008 565	
Acier en vergé (Roy).	» 11 445	Acier (Troughton).	» 11 918
Cuivre jaune de Hambourg (Roy).	» 18 555	Fer tiré à la filière (id.) »	14 401
Platine (Troughton).	» 9 918	Cuivre (id.).	» 19 188
		Argent (id.).	» 20 826
		Palladium (Wollaston).. »	40 000

Pour trouver le coefficient de dilatation du palladium, qui est un métal très rare, Wollaston a appliqué et soudé l'une sur l'autre une lame étroite de palladium et une lame étroite de platine; il remarqua que cette double lame se courbait par la chaleur, et devenait concave du côté du platine. Ayant ensuite remplacé le platine par l'acier, il trouva que la double lame devenait convexe du côté de l'acier, d'où il conclut que le palladium se dilate plus que le platine et moins que l'acier; son coefficient est donc compris entre ceux du platine et de l'acier, et diffère peu de 0,00001.

Nous ajouterons que le bois desséché se dilate, dans le sens des fibres, beaucoup moins que le verre, d'après Rittenhouse. La poterie brune ne se dilate, en longueur, que de $0,0004 = \frac{4}{2500}$ pour 100° ; et, suivant Wedgwood, quand on la rend poreuse avec du charbon, elle se dilate encore trois fois moins.

Le tableau qui précède montre que les métaux les plus dilatables sont le zinc et ensuite le plomb; le moins dilatable est le platine, et le verre l'est à peu près au même degré.

988. Relation entre la dilatation et les autres propriétés physiques.

— La ductibilité et la dureté ne paraissent pas avoir d'influence sur la dilatabilité. Berthollet a fait remarquer que les métaux les plus dilatables sont les plus fusibles; d'où il a conclu que la dilatation pour 1° doit augmenter quand on s'approche de la température de la fusion, et, par conséquent, quand la température s'élève; ce que l'expérience a vérifié (994).

Compressibilité. — En comparant les dilatations des solides à leurs compressibilités, nous avons reconnu que les plus dilatables sont généralement ceux qui se compriment le plus facilement, c'est-à-dire qui ont le plus faible coefficient d'élasticité (I, 501). Dans les deux séries suivantes, les corps sont rangés par ordre de dilatabilité, dans la première, et par ordre de compressibilité dans la seconde :

Zinc, plomb, étain, argent, or, palladium, cuivre, platine, acier, fer, terre.
Plomb, étain, or, argent, zinc, palladium, platine, cuivre, acier, fer, terre.

Il y a des différences dans les deux séries; mais elles ne doivent pas étonner quand on sait combien l'élasticité est modifiée par l'état physique des corps et par les actions mécaniques qu'ils ont eu à supporter. D'un autre côté, si la compressibilité augmente avec la température, nous allons voir qu'il en est de même de la dilatabilité. Les cristaux, qui n'ont pas la même élasticité dans différentes directions, se dilatent inégalement en différents sens. Ajoutons que les liquides et surtout les gaz, qui sont plus compressibles que les solides, se dilatent plus que ces derniers, et d'autant plus qu'ils sont plus compressibles.

989. Formules des dilatations. — On a souvent à résoudre les problèmes suivants : 1° Étant donnée la longueur L d'une barre à 0° , trouver sa longueur L' à t° . Soit k le coefficient de dilatation linéaire de la barre, la dilatation de l'unité

de longueur pour t° sera kt , et celle de L unités de longueur, kLt ; de sorte que la barre dilatée aura la longueur $L + kLt$. On a donc

$$[1] \quad L' = L + kLt = L(1 + kt); \quad \text{d'où} \quad L = \frac{L'}{1 + kt}. \quad [2]$$

Le facteur $1 + kt$ se nomme *binôme de dilatation*. La formule [2] sert à calculer la longueur L à 0° , quand on connaît la longueur L' à t° .

2° Étant donnée la longueur L à t° , trouver la longueur L' à t'° . D'abord la longueur à 0° sera $\frac{L}{1 + kt}$, d'après la formule [2]; et pour obtenir la longueur à t' , il faut, d'après la formule [1], multiplier la longueur à 0° par le *binôme* $1 + kt'$, et l'on a

$$[3] \quad L' = L \frac{1 + kt'}{1 + kt}.$$

On peut trouver autrement la valeur de L' : l'échauffement étant de $(t' - t)^\circ$, l'augmentation de longueur sera $Lk(t' - t)$, et la longueur à t'° ,

$$[4] \quad L' = L [1 + k(t' - t)].$$

Cette formule ne coïncide pas rigoureusement avec [3]; car, en divisant $1 + kt'$ par $1 + kt$, on trouve $1 + (t' - t)(k - kt + kt^2 - \dots)$. Mais comme k est une fraction très-petite (sa plus grande valeur est 0,000031 pour le zinc), les termes en k^2 , k^3 ,..... doivent être négligés, comme étant beaucoup plus petits que les erreurs commises en mesurant k , le quotient devient $1 + k(t' - t)$, et les formules [3] et [4] se confondent l'une avec l'autre.

III. Dilatation cubique. — Dilatation au-dessus de 100°

990. Calcul du coefficient de dilatation cubique. — Quand on connaît le coefficient de dilatation linéaire d'un corps homogène, il est facile d'en déduire son coefficient de dilatation cubique. Considérons un cube ayant pour côté l'unité de longueur. Ce cube n'est autre chose que l'unité de volume. Si on l'échauffe de 1° , deux faces opposées s'écartent d'une quantité égale au coefficient de dilatation linéaire k , de manière que le cube aura pour côté $1 + k$. Son volume sera donc $(1 + k)^3 = 1^3 + 3k + 3k^2 + k^3$. L'augmentation de l'unité de volume pour 1° , ou le coefficient de dilatation cubique, est donc $3k + 3k^2 + k^3$; mais comme k est une fraction extrêmement petite, $3k^2$ et k^3 doivent être négligés, et le coefficient de dilatation cubique se réduit à $3k$. Il suffit donc, pour avoir le coefficient de dilatation cubique d'un corps homogène, de tripler son coefficient de dilatation linéaire.

On verrait de même que le *coefficient de dilatation en surface est égal au double du coefficient de dilatation linéaire.*

Formules des dilatations cubiques. — Connaissant le volume V d'un corps à une température t , et son coefficient de dilatation cubique K , on calcule son volume V' à une autre température t' , par les formules suivantes, qui se trouvent comme celles des dilatations linéaires.

$$V' = V \frac{1 + Kt'}{1 + Kt}, \quad \text{ou} \quad V' = V [1 + K(t' - t)]$$

991. Dilatation des enveloppes. — Les formules qui précèdent s'appliquent aux changements de capacité intérieure des vases échauffés; car *une cavité comprise dans une enveloppe solide homogène, augmente de la quantité même dont se dilaterait une masse solide de même substance qui la remplirait.* En effet, soit ma et nt (fig. 709) deux plans parallèles tangents à la surface intérieure d'un vase. Divisons la paroi en tranches minces parallèles à ces plans tangents. Quand on échauffera le vase, les tranches $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ se dilateront, et les plans qui les limitent s'écarteront de quantités proportionnelles à leur épaisseur. Les plans tangents ma, nt s'écarteront donc de la somme des dilatations des tranches, c'est-à-dire d'une quantité égale à celle dont s'écarteraient ces mêmes plans s'ils étaient tangents extérieurement à la masse solide qui remplirait le vase, et à la surface extérieure de laquelle appartiendraient les points m et n . Ce raisonnement étant indépendant de la direction donnée aux plans ma, nt , le principe se trouve démontré.



Fig. 709.

On voit aussi que le volume extérieur augmente comme si la cavité intérieure n'existait pas.



Fig. 710.

Expérience de la dilatation des enveloppes. — L'augmentation du volume extérieur se constate au moyen du pyromètre de Sgravesande (I, 37), et l'augmentation de la capacité intérieure, par l'expérience suivante : On plonge dans l'eau chaude un ballon de verre (fig. 710) rempli d'un liquide qui occupe une partie du tube capillaire qui le surmonte, et l'on voit, au premier moment, le niveau baisser dans ce tube, l'enveloppe s'échauffant et se dilatant la première. Quand ensuite la chaleur pénètre jusqu'au liquide, le niveau remonte, le liquide se dilatant plus que le verre.

Amontons a, le premier, donné l'explication de ce phénomène, qui a longtemps intrigué les physiciens.

992. Mesure directe de la dilatation cubique. — Quand on passe du coefficient de dilatation linéaire au coefficient de dilatation cubique, on multiplie par 3 l'erreur qui entache la première valeur. Il vaudrait donc mieux mesurer directement le coefficient de dilatation cubique et en déduire le coefficient linéaire, auquel cas l'erreur serait divisée par 3. C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit en

partant du coefficient de *dilatation absolue* du mercure, qu'ils ont d'abord déterminé comme nous le verrons plus loin (1008).

Relation entre les dilatations absolue et apparente d'un liquide. —

Cette méthode s'appuie aussi sur une relation simple entre les coefficients de dilatation *absolue* et *apparente* d'un liquide, et le coefficient d'une enveloppe solide dans laquelle ce liquide serait renfermé. On entend par *dilatation apparente* d'un liquide l'augmentation de volume observée, en ne tenant pas compte de l'augmentation de capacité du vase qui le contient. Supposons du mercure renfermé dans un tube thermométrique, et soit v son volume à 0° , et v' son volume à la température de 1° , tel que l'indique la graduation du tube; D et Δ les coefficients de dilatation absolue et apparente du mercure, et K le coefficient de dilatation cubique du verre. Le volume réel occupé par le mercure sera $v'(1+K)$, car le volume v' indiqué sur l'enveloppe doit être augmenté de la quantité dont cette enveloppe se dilate pour un degré. Le volume réel du mercure à 0° étant v , on a aussi $v(1+D)$ pour son volume à 1° . En égalant ces deux valeurs, il vient

$$v'(1+K) = v(1+D); \text{ d'où } D - \frac{v'}{v}K = \frac{v'-v}{v} = \Delta,$$

en divisant tous les termes par v . Or, v' diffère très peu de v , on peut donc, K étant très petit, remplacer, sans erreur sensible, le rapport $v' : v$ par l'unité, et l'on aura

$$[5] \quad \Delta = D - K, \quad \text{ou} \quad D = \Delta + K.$$

Le coefficient de dilatation absolue d'un liquide est donc égal à son coefficient de dilatation apparente, augmenté du coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe qui le contient.

Coefficient du verre.

— Cela posé, il suffira, pour obtenir K , de mesurer Δ , en supposant connu le coefficient D de dilatation absolue du mercure. Nous avons vu



Fig. 711.

(828) comment on mesure son coefficient Δ de dilatation apparente dans le verre, au moyen du thermomètre à poids. C'est ainsi que Dulong et Petit ont mesuré le coefficient de dilatation cubique du verre. Ils ont essayé d'appliquer la même méthode au fer façonné en forme de réservoir à bec; mais comme on ne pouvait voir s'il ne restait pas quelque bulle d'air, ils ont employé le procédé suivant, en s'appuyant sur la connaissance du coefficient du verre.

993. Méthode générale. — Le corps à étudier est introduit dans un tube de verre de 40 à 60^{cm} de longueur, dont on effile ensuite l'extrémité ouverte, comme pour faire un thermomètre à poids. On a soin que ce corps présente

des saillies, de manière à ne toucher les parois du tube que par quelques points (fig. 711). On remplit ensuite le tube, de mercure que l'on dessèche par l'ébullition, et qu'on laisse refroidir pendant que l'ouverture plonge dans du mercure sec. L'appareil étant ainsi rempli de mercure à la température t de l'air ambiant, on le pèse, et on le dispose horizontalement dans une cuve remplie d'huile qu'on agite et dont on peut élever la température jusqu'à 300° . Quand cette température T est devenue stationnaire, on l'évalue au moyen d'un thermomètre à poids couché à côté de l'appareil, et l'on pèse le mercure sorti de cet appareil par l'extrémité effilée qui traverse les parois de la cuve. Pour déduire de cette expérience le coefficient de dilatation du corps, on exprime par une équation que le volume du réservoir de verre à la température T , est égal au volume dilaté du mercure qui reste, augmenté du volume du corps aussi dilaté. Soient $\theta = T - t$ l'élévation de température de l'appareil, P le poids du corps et d sa densité à t° , P' le poids du mercure contenu dans l'appareil à t° , et d' sa densité à la même température. Les volumes du corps et du mercure seront, à t° , $P : d$ et $P' : d'$, et celui du réservoir de verre à la même température, sera égal à leur somme $\frac{P}{d} + \frac{P'}{d'}$. Soient enfin x , D et K les coefficients de dilatation cubique du corps, du mercure et du verre, et p le poids du mercure sorti de l'appareil à T° . Le mercure qui reste, ramené à t° , occupera le volume $\frac{P' - p}{d'}$. On aura donc

$$\left(\frac{P}{d} + \frac{P'}{d'}\right) (1 + K\theta) = \frac{P' - p}{d'} (1 + D\theta) + \frac{P}{d} (1 + x\theta), \quad \text{d'où l'on tire}$$

$$\frac{p}{d'} (1 + D\theta) = \frac{P}{d} x\theta + \frac{P'}{d'} D\theta - \left(\frac{P}{d} + \frac{P'}{d'}\right) K\theta,$$

équation d'où l'on tirera la valeur de x . Elle exprime que le volume de mercure sorti est égal à la dilatation du corps, augmentée de celle du mercure et diminuée de celle de l'enveloppe; car le premier membre représente le volume du mercure sorti, ramené à la densité $\frac{d'}{1 + D\theta}$ qui correspond à la température T . On aurait pu poser l'équation sous cette dernière forme.

Par cette méthode, qui peut s'appliquer aux corps dont on n'a que de petites quantités, Dulong et Petit ont mesuré le coefficient de dilatation cubique du *fer*, du *platine* et du *cuivre*. Comme ce dernier corps est attaqué par le mercure, on en avait oxydé légèrement la surface.

994. Dilatation au-dessus de 100° . — Par ces différents moyens, Dulong et Petit ont d'abord confirmé que la dilatation des solides, pour une même élévation de température, est constante jusqu'à 100° ; au-delà, il n'en est plus ainsi, et la dilatation, quand on passe de t° à $(t + 1)^\circ$, augmente avec t , cette température étant donnée par le thermomètre à air. Pour rendre ces résultats plus faciles à saisir, Dulong et Petit ont calculé les températures, τ , qui

seraient indiquées par l'allongement de règles formées de diverses substances, en se servant de la formule $L' = L(1 + k\tau)$ (989), dans laquelle on suppose k constant et égal à la valeur trouvée au-dessous de 100° , et L' , donné par l'expérience, pour la température t indiquée par le thermomètre à air. Dans le tableau suivant sont inscrits les coefficients, K , de dilatation cubique du verre, du fer, du cuivre et du platine, et à côté, les températures τ , comparées à celles du thermomètre à air, que donneraient des thermomètres fondés sur les dilatations linéaires, supposées constantes, de ces substances.

TEMPÉRATURE du thermomètre à air.	VERRE		FER		CUIVRE		PLATINE	
	K	τ	K	τ	K	τ	K	τ
100°	$\frac{1}{38700}$	100°	$\frac{1}{28200}$	100°	$\frac{1}{10400}$	100°	$\frac{1}{37700}$	100°
200°	$\frac{1}{30300}$	213,2	"	"	"	"	"	"
300°	$\frac{1}{32900}$	352,9	$\frac{1}{24700}$	372,6	$\frac{1}{17700}$	328,8	$\frac{1}{36300}$	314,6

Les coefficients moyens de dilatation linéaire des mêmes substances sont alors pour les diverses températures données par le thermomètre à air :

	ENTRE 0° ET 100°	ENTRE 0° ET 200°	ENTRE 0° ET 300°
Platine.....	0,000 008 842	" " "	0,000 009 483
Verre.....	" 8 613	0,000 009 225	" 10 108
Fer.....	" 11 821	" " "	" 14 684
Cuivre.....	" 17 182	" " "	" 18 832

On voit que la dilatabilité des solides, rapportée au thermomètre à air, va en croissant au-delà de 100° , et différemment pour chacun d'eux. Ce résultat est confirmé par des expériences antérieures, faites aussi par Dulong et Petit¹, par la méthode de comparaison qui suit, déjà employée par Deluc et par Borda.

995. Comparaison des dilatations de deux barres. —

La méthode dont il s'agit offre l'avantage de se passer de point fixe. Les deux règles à comparer sont liées d'une manière invariable à l'une de leurs extrémités, au moyen d'une plaque de fer o (fig. 712). A l'autre extrémité, sont adaptées des tiges verticales l dont une porte une échelle e , divisée en cinquièmes de millimètre, et

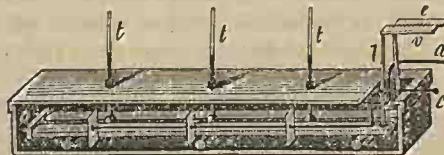


Fig. 712. — 1/20.

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. II, p. 254.

l'autre, un vernier v , donnant les vingtièmes de ces divisions. Les règles reposent sur des rouleaux disposés au fond d'une auge remplie d'huile qu'on agite au moyen de plaques mises en mouvement par les manches a et c . Plusieurs thermomètres, dont un est couché entre les barres, donnent la température. — Quand elle est arrivée à peu près au point où l'on veut observer, on ferme toutes les ouvertures du fourneau de briques sur lequel est placée l'auge, la température devient stationnaire pendant 10 à 12 minutes, on observe les thermomètres, et l'on voit la quantité dont a marché le zéro du vernier par rapport à la division avec laquelle il coïncidait avant l'échauffement. Cette quantité représente l'excès e de la dilatation d'une des règles sur l'autre. Si l est la dilatation absolue de l'une d'elles, celle de l'autre sera donnée par l'équation $x = l + e$.

Le système des deux règles forme un thermomètre particulier, dont le degré est représenté par le centième du déplacement relatif du zéro du vernier, pour une augmentation de température de 0° à 100°. Dulong et Petit ont reconnu que cette espèce de thermomètre est d'accord avec le thermomètre à air jusqu'à 100°; mais au-delà, il y a des différences, d'autant plus grandes que la température est plus élevée. Avec des barres de platine et de cuivre, la température indiquée était de 320°, lorsque le thermomètre à mercure marquait 310°, et le thermomètre à air, 300°.

996. Dilatation du verre. — Cette dilatation a une grande importance à cause de l'emploi si fréquent du verre dans les expériences. Dulong et Petit ayant comparé comme ci-dessus, des règles de cuivre et de verre, reconnurent que la dilatation du verre augmente, au-delà de 100°, suivant une loi plus rapide que celle du cuivre.

Les nombres donnés pour le coefficient du verre, par plusieurs physiciens, parmi lesquels il faut citer Despretz, Rudberg, Magnus, M. I. Pierre, ne sont pas d'accord, même entre 0° et 100°. Cela tient d'abord à la différence de composition chimique des verres employés. De plus, M. Regnault a constaté que la dilatabilité d'un même verre varie suivant la manière dont il a été travaillé, comme on le voit dans le tableau suivant, qui contient les dilatations totales de différentes sortes de verre, entre 0° et 100°¹.

SUBSTANCES	EN TUBE Dilatation.	SOUFFLÉ EN BOULES DE DIFFÉRENT DIAMÈTRE			
		Diamètre.	Dilatation.	Diamètre.	Dilatation.
Verre blanc.....	0,002 648	46 ^{mm}	0,002 592	33 ^{mm}	0,002 514
Verre vert.....	0,002 299	36	0,002 432	»	»
Verre de Suède.....	0,002 363	34	0,002 441	32	0,002 411
Verre infusible français..	0,002 442	32	0,002 242	»	»
Cristal ordinaire.....	0,002 401	39	0,002 330	»	»

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. V, p. 64.

On voit que la dilatabilité est tantôt plus grande, tantôt plus petite, quand le verre est soufflé en tube ou en boule. Les boules les plus grosses, qui sont aussi les plus minces, semblent se dilater plus que les autres. Lors donc qu'on a besoin d'une grande précision, on doit mesurer directement la dilatation des vases de verre dont on veut faire usage, et non la déduire de la dilatation linéaire; car la manière dont le vase a été travaillé a de l'influence, et ses parois ne sont pas homogènes, comme nous l'avons déjà remarqué ailleurs (I, 347). — Enfin, M. Regnault a encore constaté que le coefficient d'un même appareil de verre ne reste pas toujours constant entre les mêmes limites de chaleur, quand il a été porté à des températures très-différentes. C'est que le verre a éprouvé des modifications de structure semblables à celles qui produisent le déplacement du zéro des thermomètres (830).

997. Dilatation de la glace. — Les changements de volume que la glace éprouve par les variations de température, sont importants à connaître pour l'explication de certains phénomènes naturels, par exemple de ceux qui s'observent dans les *glaciers*. On avait émis des doutes sur la contraction de la glace par le froid, et l'on avait même avancé qu'elle se dilatait. Des expériences de M. Brunner fils, et d'autres faites à l'Observatoire de Poulkova, ont prouvé que le froid agit sur la glace comme sur les autres corps solides. M. Brunner a procédé en déduisant la densité de la glace à différentes températures, de sa perte de poids dans l'huile de pétrole. La densité de ce liquide par rapport à l'eau, aux différentes températures des expériences, était en même temps déterminée par la perte de poids d'une masse de verre, ramenée toujours au même volume par une méthode de correction que nous avons indiquée précédemment (I, 210). Les morceaux de glace étaient choisis exempts de bulles d'air, et l'on opérait quand la température ambiante était au-dessous de zéro. M. Brunner a trouvé ainsi entre 0° et — 6°, un coefficient moyen de dilatation *linéaire* égal à $0,0000375 = \frac{1}{26700}$. La glace se contracte donc par le froid plus que les autres solides; ce qui provient en partie de la proximité de son point de fusion.

998. Corps divers. — Le mode de d'évaluation de la dilatation par la densité a été appliquée par M. H. Kopp à divers métaux et diverses substances minérales, en se servant de la méthode du flacon. Quoique peu précise, à cause de la difficulté d'apprécier le poids de l'eau et le volume du flacon à différentes températures, cette méthode a conduit à des résultats approchés, qui se sont trouvés assez bien d'accord avec les nombres obtenus, pour quelques corps, par la méthode du thermomètre à poids (993). Ces expériences ont montré en outre que certains minéraux cristallisés (*spath fluor, aragonite, sulfate de baryte, célestine, quartz*) se dilatent plus que les métaux, contrairement à ce que l'on eroit généralement.

M. Matthiessen a fait un grand nombre d'expériences sur la dilatation des métaux simples ou alliés, en pesant ces corps dans l'eau à différentes températures. Il a reconnu que le coefficient de dilatation des *alliages* est à peu près la moyenne entre les coefficients des métaux combinés.

999. Caoutchouc. — La dilatation du caoutchouc présente des singularités

qui ont beaucoup occupé les physiciens, à cause de leur rapport avec certains mouvements de chaleur que produit l'extension de cette substance. Une bande de caoutchouc non tendue, se dilate comme les autres corps solides et même plus fortement. Mais quand elle est tendue, elle se *contracte* lorsqu'on l'échauffe, et d'autant plus que la tension préalable est plus grande. Ce phénomène, découvert par MM. Thomson et Joule, se vérifie facilement en suspendant un poids à une bande de caoutchouc entourée d'un tube dans lequel on fait passer un courant d'air chaud ou de vapeur. Une aiguille adaptée au bas et disposée comme celle du pyromètre à cadran (819) montre aussitôt la contraction de la bande. M. Joule a vu une bande de caoutchouc vulcanisé, qui, par un échauffement de 50° , se dilatait de 0,01 de sa longueur quand elle n'était pas tendue, se contracter de 0,1 quand elle l'était par un poids capable de doubler sa longueur.

Cette énorme contraction ne peut provenir d'une simple action de la chaleur sur la distance des molécules. La bande tendue n'est pas homogène, et son coefficient d'élasticité n'est plus le même dans le sens transversal et dans le sens longitudinal. On doit donc penser que la chaleur agit surtout en augmentant l'élasticité suivant la longueur, de manière que le poids tenseur soit soulevé. Ce qui confirme cette manière de voir, c'est que le caoutchouc vulcanisé est moins extensible à chaud qu'à froid. — M. Schmulewitsch montre cet accroissement d'élasticité dans un cordon de caoutchouc chauffé, en le tendant sur un sonomètre, avec une corde à boyau au bout de laquelle il est attaché et qui en est séparée par un chevalet. Le son de la corde monte quand on chauffe le caoutchouc.

Du reste, l'influence de la chaleur sur l'élasticité du caoutchouc tendu se conçoit facilement quand on considère la structure particulière de cette substance, dans laquelle on distingue, au microscope, une multitude de cellules irrégulièrement arrondies communiquant entre elles, que la traction doit allonger. De plus, l'élasticité peut être modifiée d'une manière permanente par le froid; ainsi, des fils de caoutchouc naturel allongés de 5 à 10 fois leur longueur, perdent toute élasticité quand on les a soumis à un froid prolongé et ne reviennent plus à leur longueur primitive quand on les abandonne à eux-mêmes, à la température ordinaire; c'est sous cet état qu'on en fabrique des tissus. On leur rend leur élasticité en passant un fer chaud, sous l'influence duquel les fils se resserrent et reprennent leur longueur primitive.

On peut enfin rapprocher le raccourcissement que produit la chaleur sur le caoutchouc de celui que produit l'humidité sur les cordes de chanvre ou à boyau, dans lesquelles les filaments ont reçu par torsion un arrangement particulier; tandis que l'effet direct de l'humidité sur les fibres organiques est de les gonfler et de les allonger.

Il résulte de certaines considérations théoriques sur lesquelles nous reviendrons, que la contraction ne doit se manifester sur le caoutchouc qu'à partir d'une certaine tension, au-dessous de laquelle il y aurait dilatation; d'où il résulte que, sous cette tension de passage, la chaleur n'aurait aucune influence pour l'allonger ou le raccourcir.

IV. Dilatation des corps non homogènes.

1000. Dilatation du bois, etc. — Pour établir la relation entre les coefficients de dilatation linéaire et cubique, nous avons supposé que le corps se dilatait également dans tous les sens, ce qui a lieu pour les substances homogènes. Mais il n'en est plus ainsi des corps non homogènes, qui se dilatent différemment dans divers sens. Par exemple, le bois se dilate plus perpendiculairement aux fibres que dans le sens des fibres. M. E. Villari, par une méthode analogue à celle de Laplace et Lavoisier, a trouvé entre 2° et 34°, les coefficients suivants exprimés en millièmes :

	Perpendiculairement aux fibres.	Parallèlement aux fibres.		Perpendiculairement aux fibres.	Parallèlement aux fibres.
<i>Buis</i>	61,4	2,6	<i>Peuplier</i>	36,5	3,8
<i>Sapin</i>	58,4	3,7	<i>Noyer</i>	48,4	3,5
<i>Chêne</i>	54,4	4,9	<i>Pin</i>	34,1	5,4
<i>Orme</i>	44,3	5,6	<i>Châtaignier</i> ..	32,5	6,5

D'après M. Fizeau, les roches schisteuses, et notamment l'ardoise, présentent la dilatation la plus prononcée dans le sens perpendiculaire aux feuillets. — Les métaux qui ont été fortement écrouis par le laminoir, le choc du balancier ou du marteau, se dilatent le plus dans le sens où s'est exercée la compression. Un lingot de platine allié à 10 pour cent d'iridium, dont le coefficient était 8,864 millièmes, a donné le coefficient 9,02, après le choc du balancier, puis, après avoir été recuit deux fois à 1300°, le nombre 8,896.

1001. Dilatation des cristaux. — Les cristaux appartenant au système régulier (I, 490) se dilatent également dans tous les sens, comme les corps homogènes; mais ceux qui ne sont pas symétriques autour d'un point, se dilatent différemment dans les diverses directions. Ce phénomène, découvert par Mitscherlich, en 1825, et que l'on peut rapprocher de l'inégalité en divers sens de l'élasticité (I, 785) et de la conductibilité (969), s'établit en mesurant, à différentes températures, les angles du cristal, par les moyens très-précis que fournit l'optique. On constate que ces angles varient avec la température, ce qui n'aurait pas lieu si, la dilatation étant la même dans toutes les directions, le volume du cristal conservait toujours une forme semblable.

Dans les cristaux symétriques autour d'un axe, la dilatation, comme l'élasticité et la conductibilité, reste la même dans toutes les directions perpendiculaires à cet axe. — Dans les cristaux non symétriques autour d'un axe, elle est différente suivant les trois axes cristallographiques.

L'inégalité de dilatation dans divers sens se voit facilement sur la variété de sulfate de chaux dite *gypse lenticulaire* ou *en fer de lance*, formée de cristaux altérés et arrondis, dont la masse affecte la forme de lentilles, souvent accolées

deux à deux et paraissant se pénétrer mutuellement. On peut, par le clivage en détacher des plaques présentant la figure de fer de lance (fig. 713). Si l'on taille dans cette plaque une lame *abba* à faces polies et bien planes, *aa*, *bb*, perpendiculaires à la ligne *oo'*, et si on le chauffe à 100° , on constate qu'un objet délié, vu par réflexion très-obliquement sur ces faces, donne deux images; ce qui prouve que les faces *aa*, *bb* ne sont plus dans le même plan, mais qu'elles forment des angles *a'ca'*, *b'db'*.

Le *spath d'Islande* présente une particularité curieuse : quand on l'échauffe, de 0° à 100° , les angles varient de $8',5$, de manière à indiquer que la dilatation suivant l'axe du rhomboédre est la plus grande. Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que, dans les directions perpendiculaires à l'axe, il y a contraction au lieu de dilatation. Le rapport des deux coefficients, de dilatation *d* et de contraction *c* est égal à $\frac{1}{0,03}$. Mitscherlich a trouvé, pour la somme de ces coefficients, 0,0000 362. Des mesures prises directement au sphéromètre, sur des plaques taillées perpendiculairement et parallèlement à l'axe, lui ont donné, pour la même somme, 0,0000 321.

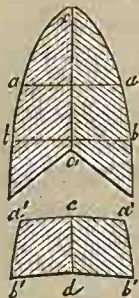


Fig. 713.

Il résulte de là qu'il doit y avoir dans le *spath d'Islande* une direction suivant laquelle il n'y aura ni dilatation ni contraction. M. Fizeau a trouvé que cette direction forme avec une perpendiculaire à l'axe, un angle β donné par la formule $\text{tang. } \beta = c : d$, et égal à $24^{\circ} 1' 50''$.

M. Fizeau a trouvé aussi dans l'*émeraude* une contraction bien marquée, seulement elle a lieu dans la direction de l'axe.

1002. Expériences de M. Fizeau. — La méthode employée dans ces expériences est tellement délicate qu'elle permet d'évaluer des *millionièmes* de millimètre; en voici le principe¹. Quand on projette de la lumière sur une lame transparente très-mince, elle se réfléchit en donnant des couleurs, comme les bulles d'eau de savon nous en offrent un exemple familier. Ce phénomène se produit aussi dans l'espace qui sépare deux plaques très-rapprochées, et si leurs surfaces étaient rigoureusement planes et parallèles, la teinte serait uniforme. Mais une semblable perfection étant impossible, on aperçoit des bandes ou *franges* irisées, qui sont remplacées par des franges alternativement sombres et brillantes quand on se sert de la lumière jaune simple d'une lampe à alcool salé. Si l'on rapproche les deux plaques, ces franges se déplacent, et quand une d'elles arrive à la place de celle qui la suit, c'est que la distance des plaques a diminué de $0^{\text{mm}},000 2944$, nombre qui représente, comme nous le verrons dans l'optique, la demi-longueur d'ondulation, $\frac{1}{2} \lambda$, de la lumière jaune.

Cela posé, la lame de cristal à faces parallèles est appuyée sur un disque de 4^{cm} de diamètre, en platine contenant $\frac{1}{10}$ d'iridium. Ce disque est traversé par

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. II, p. 143, et t. VIII, p. 335.

trois vis de même matière, dont le pas est de $\frac{1}{4}$ mm, normales à son plan et formant un triangle équilatéral. Leurs extrémités supportent un disque de verre placé parallèlement au disque de platine et à une distance de quelques centièmes de millimètre de la face supérieure du cristal. Il se produit des franges avec la lumière jaune simple; on place le système dans une étuve munie de glaces, à travers lesquelles on suit le mouvement des franges, jusqu'à ce que la température t' soit devenue constante, et l'on constate, en s'aidant de points noirs marqués sur le disque de verre, le nombre n de rangs dont s'est déplacée une frange. La surface de la plaque de cristal s'est alors rapprochée du disque de verre de $n \cdot \frac{1}{2} \lambda$. Ce rapprochement provient de la dilatation de la plaque diminuée de celle des vis dans les parties qui se trouvent entre les deux disques; cette dernière dilatation soulevant d'autant le disque de verre¹. En appelant $t' - t$ l'augmentation de température et e l'épaisseur de la plaque de cristal, son coefficient de dilatation linéaire sera $d = n \frac{\lambda}{2e(t' - t)}$.

Pour connaître la dilatation des vis, on approche le disque de verre du disque de platine à une distance de quelques millimètres, et on le porte dans l'étuve; les mouvements des franges formées dans la lame d'air qui sépare les deux disques fait connaître l'augmentation de distance, d'où l'on déduit le coefficient de dilatation des vis.

La méthode précédente donne la dilatation linéaire dans la direction perpendiculaire à la plaque. Si l'on veut connaître la dilatation cubique, il faudra prendre les dilatations linéaires dans les directions des trois axes rectangulaires d'élasticité du cristal, et les ajouter. En effet, si nous supposons un cube ayant ses arêtes, égales à l'unité, parallèles aux trois axes d'élasticité suivant lesquels les coefficients de dilatation sont α , α' , α'' , le volume échauffé de 1° sera $(1 + \alpha)(1 + \alpha')(1 + \alpha'') = 1 + \alpha + \alpha' + \alpha''$, en négligeant les termes qui contiennent deux ou trois des facteurs très-petits α , α' , α'' .

M. Fizeau a su s'affranchir de la difficulté de tailler trois lames perpendiculaires aux axes d'élasticité, en en choisissant une seule, dans une direction telle qu'elle donne la dilatation linéaire moyenne $\frac{1}{3}(\alpha + \alpha' + \alpha'')$. Pour trouver cette direction, il part de la formule $D = \alpha \cos^2 \delta + \alpha' \cos^2 \delta' + \alpha'' \cos^2 \delta''$, dans laquelle D est la dilatation dans une direction faisant les angles δ , δ' , δ'' avec les axes d'élasticité. Si l'on fait $\delta = \delta' = \delta''$ on a $D = (\alpha + \alpha' + \alpha'') \cos^2 \delta$; et comme, les axes étant rectangulaires, les angles δ , δ' , δ'' sont liés par la relation connue, $\cos^2 \delta + \cos^2 \delta' + \cos^2 \delta'' = 1$, qui donne alors $3 \cos^2 \delta = 1$, la valeur de D devient $D = \frac{1}{3}(\alpha + \alpha' + \alpha'')$, et l'on a $\cos^2 \delta = \frac{1}{3}$, d'où $\delta = 54^\circ 44'$. Il faudra donc, pour obtenir la dilatation moyenne, opérer sur une plaque taillée perpendiculairement à une direction faisant un angle de $54^\circ 44'$

¹ Le nombre n doit être corrigé de l'effet de la couche d'air interposée, dont la densité change avec la température. En appelant m et m' les indices de réfraction de l'air aux températures t et t' , la correction est $(m - m') 2e : \lambda$.

avec les trois axes d'élasticité. C'est ainsi qu'a procédé M. Fizeau pour le plus grand nombre des cristaux dont il a étudié la dilatabilité.

I. Applications des dilatations des solides.

1003. On a souvent à faire usage des coefficients de dilatation linéaire ou cubique des corps solides. Nous en avons vu des exemples dans la mesure des poids spécifiques, et dans la correction du baromètre. Dans les constructions, où l'on emploie aujourd'hui beaucoup de matériaux différents, comme la fonte, la pierre, les briques, etc., on pourrait craindre que leur inégale dilatation n'entraînant des mouvements discordants capables de les disjoindre. Des expériences de M. Adie, ont heureusement montré que ces matériaux ont un coefficient qui diffère très-peu de celui de la fonte, de sorte que, pour les variations de température de l'atmosphère, les différences sont insensibles ¹.



Fig. 713.

1001. Pendules compensateurs. — La durée des oscillations d'un pendule dépend de sa longueur d'oscillation (I, 124). Or cette longueur varie avec la température; d'où il résulte qu'une horloge à pendule retarde quand il fait chaud, et avance quand il fait froid. Ces irrégularités n'avaient pas échappé aux premiers observateurs; Graham, en 1726, les attribua à la dilatation du pendule et chercha à les faire disparaître par la combinaison de deux métaux possédant des coefficients différents. Il imagina plus tard la disposition que nous allons décrire, et construisit le premier *pendule compensateur* ou *pendule compensé*; c'est-à-dire un pendule dont la durée de l'oscillation n'était pas affectée par les changements de température.

Compensateur de Graham. — La tige *ab* (fig. 713) est de verre, et la lentille, remplacée par un gros tube de verre, *bc*, contenant du mercure. Quand la température s'élève de t° , la longueur $ac \equiv l$ se dilate de la quantité lkt , en appelant k le coefficient de dilatation linéaire du verre, et le centre de gravité du mercure s'abaisse de cette quantité. D'un autre côté, la colonne de mercure en se dilatant, monte dans le vase *bc*; et si sa hauteur est h , son centre de gravité s'élève de $\frac{1}{2}h\Delta t$, en appelant Δ la dilatation apparente du mercure dans le verre. Si donc on a $lkt \equiv \frac{1}{2}h\Delta t$, ou $lk \equiv \frac{1}{2}h\Delta$, le centre de gravité sera relevé par la dilatation du mercure d'autant qu'il sera abaissé par l'allongement du verre. En prenant $k \equiv \frac{1}{116100}$ et $\Delta \equiv \frac{1}{6850}$, on trouve à peu près $l \equiv 9h$. Si la tige était de laiton, elle devrait être beaucoup plus courte. Comme le centre d'oscillation du pendule ne se confond pas avec son centre de gravité (I, 125), la compensation n'est pas

¹ Bibliothèque universelle de Genève, (nouvelle série, 1837), t. IX, p. 403.

rigoureusement complète; on l'achève alors, en ajoutant ou retranchant un peu de mercure. On peut encore procéder en élevant ou abaissant le tube à mercure, au moyen d'une vis *b*.

Compensateur de J. Leroy. — Un tube fixe de laiton *cc* (fig. 714), soutient par sa partie supérieure une barre de fer *f*. A cette barre, est suspendue la tige *f'*, aussi en fer, du pendule, au moyen d'une lame d'acier mince et flexible.



Fig. 714.

Cette lame peut glisser à travers une fente dont les bords représentent l'axe de suspension du pendule. Quand la température s'élève de 1° , le tube de laiton se dilate de $c \times k.t$, en appelant *c* la longueur du tube de cuivre et *k* son coefficient de dilatation, et le pendule est raccourci d'autant. En même temps les barres de fer *f* et *f'*, se dilatant de $(f + f')k.t$, en appelant *k'* le coefficient du fer, le pendule s'allonge; il y aura donc compensation si l'on a $(f + f')k' = ck$. Comme *k'* est à peu près $\frac{2}{3}$ de *k*, il faudra que le tube de laiton ait à peu près les $\frac{2}{3}$ de la longueur totale du fer, ou le



Fig. 715.

double de la longueur *f'*. On achèvera d'établir la compensation, par tâtonnement, en déplaçant la lentille au moyen

d'une vis qui se trouve à sa partie inférieure. Ce système est peu employé, parce qu'il augmente beaucoup la hauteur de l'horloge.

On l'a remplacé par la disposition suivante. Le pendule est soutenu par une lame d'acier (fig. 715) qui traverse une fente pratiquée dans la pièce *a*, et est fixée à un levier coudé *col*, dont le bras *ob* s'appuie sur une barre de cuivre *nb*. Cette barre, en se dilatant, pousse le levier, et fait remonter le point *c*, de manière à compenser l'effet de l'allongement du pendule. Si *L* est la longueur *ah*, *l* la longueur *bn*, *k* et *k'* les coefficients des métaux dont sont formées ces barres, il faudra,

pour la compensation, qu'on ait à peu près $Lk = lk' \frac{oc}{ob}$. On achève de compenser, soit en faisant varier la position de la lentille, soit en changeant, au moyen de la vis *b*, la distance à l'axe *o*, du point sur lequel agit la barre *bn*.



Fig. 716.

Leroy a aussi disposé un compensateur formé de deux verges, l'une d'acier *aI*, l'autre de cuivre *cc'* arrêtée en *c* (fig. 716). Ces verges sont articulées avec un levier *c'o*, articulé lui-même en *o* avec une troisième verge qui porte la lentille. On voit que la verge *cc'*, en se dilatant plus que l'acier, abaissera le point *c'*, et par conséquent relèvera le point *o* avec la lentille. Ce pendule, qui paraît avoir été aussi imaginé par Graham, se dilate souvent par secousses.

Reid, en 1812, a établi un compensateur de la manière suivante : une tige d'acier *ab* (fig. 717) soutient par sa partie inférieure un tube de zinc *bc*, qui l'enveloppe, et à la partie supérieure duquel est fixée la lentille, qu'il soulève en se dilatant, pendant que la dilatation de la tige *ab* la fait descendre.



Fig. 717.

M. Henri Robert a imaginé une disposition plus simple (fig. 718) : la tige est en platine, et supporte par sa partie inférieure une large lentille de zinc. Le centre de gravité de cette lentille conserve toujours la même distance au point de suspension, si la dilatation de la tige de platine est égale à celle du rayon de la lentille de zinc ; ce qui a lieu quand ce rayon est égal au tiers environ de la longueur de la tige.



Fig. 718.

Pendule à cadre ou à grill. — Le pendule compensé le plus employé est celui que J. Harrison a imaginé peu de

temps après celui de Graham. Le point de suspension est placé au milieu d'une petite barre transversale (fig. 719), aux extrémités de laquelle sont fixées deux verges de fer, réunies à

leur partie inférieure par une traverse. Cette traverse supporte deux verges de laiton, réunies à leur partie supérieure par une seconde traverse à laquelle sont suspendues deux autres verges de fer. Celles-ci supportent deux nouvelles verges de laiton, à la partie supérieure desquelles est enfin suspendue une tige de fer qui porte la lentille. Les traverses sont percées de manière à laisser glisser les tiges qu'elles ne soutiennent pas, et deux brides servent à maintenir l'ensemble de l'appareil.



Fig. 719.

Il est facile de voir que les tiges de laiton, en se dilatant, font remonter la lentille, tandis que les verges de fer la font descendre. Pour que le centre de gravité reste à la même hauteur, il faudra que l'on ait $(f + f' + F)k = (c + c')k'$, en appelant *f*, *f'* les longueurs des couples de verges de fer, *c* et *c'* celles des couples de verges de laiton, et *F* la longueur de la tige de fer qui porte la lentille.

En supposant *f* et *f'* égaux à *c* et *c'*, ce qui a lieu sensiblement, il vient $(c + c') \left(\frac{k'}{k} - 1 \right) = F$. On a, à peu près,

$k : k' = \frac{5}{3}$, de sorte que la longueur *F* du pendule est sensiblement égale à $\frac{2}{3}$ de *c + c'*. Ces calculs ne donnent qu'une première approximation, car le centre de gravité de la lentille est loin de coïncider avec celui du pendule, à cause du poids des tringles, et d'ailleurs ce

point ne se confond pas ici, même à peu près, avec le centre d'oscillation. Il faut donc achever de régler la compensation par tâtonnement, en déplaçant la lentille au moyen de la vis qui est au-dessous. Si l'on voulait n'employer que deux verges de laiton, et par conséquent trois verges de fer, la longueur des premières devrait être $\frac{3}{2} F$, ou $F + \frac{1}{2} F$, de sorte que ces verges dépasseraient l'axe de suspension.

1005. Lames de compensation. — L'horloger Martin, a imaginé de fixer transversalement en *c* à la tige du pendule (fig. 720), un système de deux lames métalliques de nature différente et soudées entre elles dans toute leur longueur. La lame la plus dilatable étant en dessous, le système se courbera suivant *msm*, quand la température s'élèvera, de manière à soulever les masses *m, m* qui sont aux extrémités de la double lame. Si, au contraire, la température baisse, le système se courbera suivant *m'cm'*. Les masses *m, m* peuvent se déplacer en glissant le long des vis qui les traversent; de manière qu'on peut les mettre, par tâtonnement, à une distance telle de la tige, que le pendule soit exactement compensé.

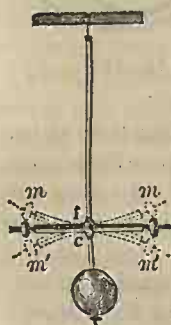


Fig. 720.

Compensateur des chronomètres.

— Cette association de deux lames superposées était employée depuis longtemps pour compenser les balanciers des chronomètres. On sait que, dans ces instruments, comme dans les montres, le mouvement est régularisé par une roue ou balancier, munie d'un ressort spiral (fig. 721), et dont la durée de l'oscillation dépend de la force du ressort, de la



Fig. 721.

masse de la roue et de son rayon. Or, quand la température s'élève, ce rayon augmente et le chronomètre retarde. Pour empêcher ce retard, il faudrait ramener vers l'axe une partie de la masse du balancier. Pour cela, on fixe sur sa circonférence des lames de compensation *a, a, a*, dont le métal le plus dilatable est en dehors, terminées par des vis qui portent de petites masses *n, n, n*. Quand la chaleur augmente le rayon de la roue, les masses *n* se rapprochent de l'axe par l'effet de la courbure des lames. En déplaçant plus ou moins les masses le long des vis qui les portent, on parvient à obtenir que la quantité dont elles se rapprochent compense l'effet de la dilatation du balancier.

1006. Thermomètres métalliques. — A. Breguet a appliqué les lames de compensation à la construction d'un thermomètre très-sensible et d'une très-faible masse. Il soude ensemble trois lames, de platine, d'or et d'argent, l'or entre les deux autres, et les passe au laminoir. Il découpe ensuite dans la mince feuille ainsi obtenue un ruban qu'il enroule en hélice, l'argent en dedans. Cette hélice *s* (fig. 722) est suspendue verticalement, et son extrémité inférieure soutient une aiguille horizontale qui parcourt les divisions d'un cadran. Quand

la température s'élève, chaque spire de l'hélice diminue de courbure, l'argent se dilatat plus que le platine, et l'aiguille change de position. Pour obtenir la grandeur d'un degré sur le cadran divisé, on porte l'instrument à deux températures différentes t et t' , données par un thermomètre à mercure, et l'on divise

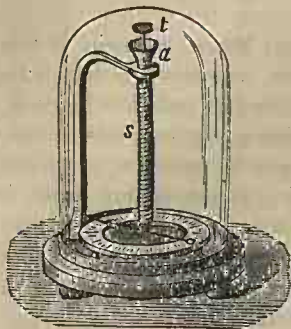


Fig. 722. 1/3.

la distance entre les deux positions successives de l'aiguille, en un nombre $t' - t$ de parties égales. L'anneau a qui soutient l'hélice s peut tourner dans son support, de manière qu'on peut placer l'aiguille sur le zéro de la division, avant de commencer les expériences. — Une

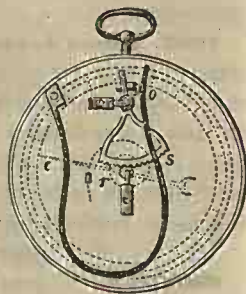


Fig. 723.

tige t , qui traverse l'hélice dans toute sa longueur, est destinée à en empêcher les oscillations quand on transporte l'instrument.

Le thermomètre de Breguet est d'une extrême sensibilité. Il est surtout utile quand on veut accuser des variations rapides; sa faible masse lui permettant de se mettre rapidement en équilibre de température.

On donne aussi au thermomètre métallique une forme sous laquelle il est très-portatif. La triple lame est courbée en forme d'U (fig. 723); une des extrémités est fixe, et l'autre s'appuie en o sur un levier du premier genre, dont le bras opposé prend la forme d'un secteur denté, s , ayant son centre au point d'appui du levier. Ce secteur mène un pignon denté portant une aiguille qui parcourt les divisions d'un cadran. Un ressort en spirale, r , agit de manière que le levier presse toujours la triple lame, en o . Cet instrument, qui présente la forme et les dimensions d'une montre, se gradue comme le précédent.

Thermomètre de Borda. — Dans la mesure d'une base entre Melun et



Fig. 724.

Lieusaint, lors de la grande opération de la méridienne en France, Borda sentit la nécessité de se servir d'une règle étalon dont les dilatactions pussent être évaluées exactement, afin de pouvoir en tenir compte. Il eut l'idée de faire indiquer par la règle elle-même la température moyenne de ses différentes parties, qui pouvaient n'être pas toutes également échauffées, à cause de la présence des opérateurs, et du contact de leurs mains. La règle de platine avait

12 pieds de longueur ; à l'une de ses extrémités était fixée une règle de cuivre un peu plus courte (*fig. 724*), qui lui était superposée, et dont l'autre extrémité portait un vernier pouvant glisser sur une division tracée sur la règle de platine, et donnant les millièmes de la longueur de cette règle. Si la température s'élevait, le zéro du vernier s'avancait sur les divisions, le cuivre se dilatant plus que le platine. Une loupe servait à distinguer plus facilement les coïncidences. En portant l'appareil dans la glace fondante, puis dans de l'eau chaude, dont la température était donnée par des thermomètres, on avait les traits de divisions correspondant à ces deux températures, et il était facile dès lors de calculer le nombre de degrés centigrades correspondant à un nombre de divisions parcourues par le zéro du vernier (825). L'appareil constituait donc un véritable thermomètre qui donnait exactement sa propre température moyenne. Celle-ci une fois connue, il était facile de calculer la longueur exacte de la règle principale en se servant du coefficient de dilatation du platine.

Nous avons vu (844) les applications que l'on fait des dilatations linéaires des solides à la construction de divers *pyromètres*.

1007. Régulateurs du feu. — On se sert souvent des dilatations des solides pour régler la température dans les enceintes, fourneaux, étuves, etc. Une barre métallique prend la température de l'enceinte et, en s'allongeant, pousse un levier qui fait tourner plus ou moins une plaque. Cette plaque ferme alors en partie le tuyau de la cheminée pour diminuer le tirage ; ou l'ouverture par laquelle l'air arrive sur le combustible, de manière à déterminer un ralentissement dans la combustion et, par suite, un abaissement de température.

Le *thermostat* du Dr Ure est fondé sur l'emploi des lames de compensation (1005). Une des extrémités de la double lame est fixe, et l'autre, en se déplaçant par les variations de courbure que produit la chaleur, agit sur un levier qui ferme plus ou moins des registres. La dilatation des gaz nous fournira d'autres régulateurs de la chaleur.

§ 2. — DILATATIONS DES LIQUIDES

I. Mesure de la dilatation absolue du mercure.

1008. Expériences de Dulong et Petit. — Nous avons vu que Dulong et Petit ont fait usage, dans leurs recherches sur les dilatations cubiques des solides, du coefficient de dilatation absolue du mercure. Beaucoup d'observateurs, Dalton, Cavendish, Deluc, Roy, Shuckburgh, Lavoisier et Laplace, Haellstroem, Lalande et Delisle, Casbois, ont mesuré la dilatation absolue du mercure au-dessous de 100°, soit en évaluant sa dilatation apparente dans le verre et y ajoutant celle de l'enveloppe, soit en mesurant la hauteur du baromètre sous une même pression et à différentes températures. Mais leurs résultats diffèrent

beaucoup, à cause de l'incertitude des méthodes. Dulong et Petit ont donc repris la question en partant du principe suivant dû à Boyle ¹.

Considérons deux tubes verticaux A et B (fig. 725) contenant du mercure et communiquant par un tube horizontal *c*, long et étroit, pour que les liquides des deux colonnes ne puissent se mêler lorsqu'ils sont à des températures différentes. Quand ces liquides sont en équilibre, les hauteurs, comptées à partir de l'axe du tube *c*, sont en raison inverse de leurs densités (I, 193). On a donc, en appelant *d* et *d'* les densités du mercure aux températures 0° et *t*°, et en représentant par *h* et *h'* les hauteurs des colonnes de mercure ayant ces densités, $h : h' = d' : d$. De

plus, si l'on représente par *v* et *v'* les volumes d'une même masse de mercure aux températures 0° et *t*°, et ayant des densités *d* et *d'*, on a $v : v' = d' : d$. En combinant cette proportion avec la précédente, il vient

$$h : h' = v : v'; \quad \text{d'où} \quad \frac{v' - v}{vt} = \frac{h' - h}{ht},$$

$v' - v$ étant l'augmentation qu'éprouve le volume *v* en passant de 0° à *t*°, $\frac{v' - v}{vt}$ représente le coefficient de dilatation absolue du

mercure; et il suffit, pour l'obtenir, de mesurer les quantités *h*, *h'* et *t*, qui sont indépendantes des dimensions et de la forme des vases.

Dans les cours, on montre la différence de hauteur de deux colonnes d'un même liquide à des températures différentes, au moyen de deux tubes communicants *t*, *t'* (fig. 726) contenant de l'alcool coloré, et enveloppés chacun d'un gros tube de cristal dans lequel on verse, d'un côté, *t*, de l'eau froide, et de l'autre, *t'*, de l'eau bouillante. On voit le niveau *n* s'élever de plusieurs centimètres au-dessus du niveau *n'*.

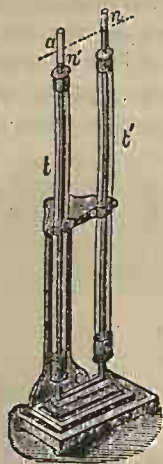


Fig. 726. — 1/20.

Dans l'appareil (fig. 727), au moyen duquel Dulong et Petit ont appliqué la méthode qui précède, les tubes communicants ont la forme AcB (fig. 725); les branches verticales, assez larges pour qu'il n'y ait pas d'effet capillaire, sont réunies par un tube horizontal très-fin *c*, partout de même diamètre. Ce tube s'appuie sur une barre de fer horizontale TF (fig. 727), en forme de T, et bien dressée en dessus. Elle porte

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. VII, p. 124.

deux niveaux à bulle d'air n, n' perpendiculaires l'un à l'autre, et repose par trois pieds sur une table munie de vis calantes. Les tubes verticaux sont soutenus par des montants de fer. Celui de la branche A, qui doit être maintenue à la température de 0° , porte à sa partie supérieure un index r qui sert de repère pour la mesure des hauteurs.

La branche A est enveloppée de glace fondante, contenue dans un cylindre de fer-blanc; une échancrure permet d'apercevoir le niveau du mercure, en écartant la glace. L'autre branche B est entourée d'un manchon de cuivre portant deux prolongements horizontaux en forme de demi-cylindres m, m' , au-dessous desquels est fixée par des vis, une plaque de métal, de manière que la barre TF soit entièrement enveloppée. Du mastic appliqué en m, m' , sur la barre, empêche de sortir le liquide contenu dans le manchon. Ce manchon, fermé à sa partie supérieure par une plaque fixée par des vis à un rebord assez

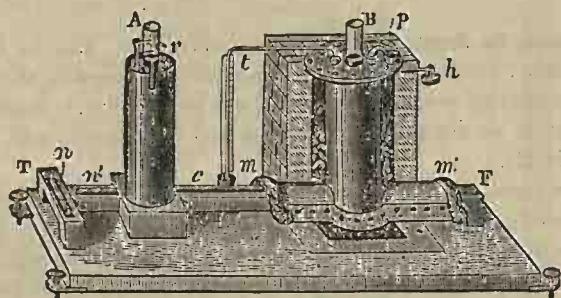


Fig. 727. — $\frac{1}{30}$.

large, est rempli totalement d'huile fixe, qu'on chauffe par le moyen d'un fourneau de briques dont on voit la moitié dans la figure. L'excédant de l'huile dilatée par la chaleur s'écoule par le tube h . Le mastic m, m' est en dehors du fourneau, et on l'arrose avec de l'eau pour l'empêcher de brûler ou de se fendre. La température de l'huile est donnée par un thermomètre à poids, dont le réservoir occupe toute la profondeur du bain, et par un thermomètre à air t , que nous décrirons en traitant de la dilatation des gaz (1027). Enfin, un cathétomètre, instrument imaginé à l'occasion de ces expériences, est en avant et à égale distance des tubes A et B.

Les expériences se faisaient de la manière suivante : quand la température avait atteint la limite où l'on voulait observer, on fermait toutes les issues du fourneau, pour rendre cette température stationnaire, on observait les thermomètres, et l'on mesurait les hauteurs des colonnes au-dessus de l'axe du tube c . Pour cela on ajoutait ou l'on enlevait du mercure à la colonne B, de manière que le niveau dépassât d'un demi-millimètre à peu près, le dessus du couvercle du manchon. On mesurait ensuite au cathétomètre, la distance verticale de ce

niveau au repère r , puis, écartant la glace, la distance du même repère au niveau de la branche A. La différence de ces deux distances donnait la quantité $h' - h$. Pour avoir h , il suffisait de connaître la distance du repère r à l'axe du tube c , distance qui était invariable dans la glace fondante. Cette distance, relevée d'avance avec beaucoup de soin, était égale à $0^m,5825$; en la représentant par R , et appelant δ la distance du repère au niveau dans le tube A, on avait évidemment $h = R - \delta$. Voici les résultats trouvés par Dulong et Petit, pour moyennes d'un grand nombre d'expériences.

Température du thermomètre à air.	Dilatation moyenne absolue du mercure à partir de 0° .	Température indiquée par la dilatation du mercure supposée constante.
100°	$\frac{4}{5550} = 0,00018018$	100°
200	$\frac{4}{5425} = 0,00018433$	204,61
300	$\frac{4}{5300} = 0,00018868$	314,15

La dilatation du mercure est uniforme jusqu'à 100° , mais au delà elle va en augmentant, quand on mesure les températures au moyen du thermomètre à air. Les nombres qui précèdent comportent une petite erreur, le nombre employé pour coefficient de dilatation de l'air étant trop fort, comme nous le verrons plus loin (1032).

Dans les expériences remarquables que nous venons de décrire, il reste quelques incertitudes, provenant d'abord de la couche de mercure qui dépasse le couvercle dans le vase B, et dont le refroidissement n'est pas négligeable lors les hautes températures. En outre, l'huile n'étant pas agitée, ne pouvait avoir partout la même température. Cet inconvénient était seulement atténué par la longueur verticale des réservoirs des thermomètres. Enfin, les colonnes étant assez courtes, la différence de leurs hauteurs était très-petite, et, par suite, la moindre erreur dans la mesure de cette différence avait de l'importance. M. Regnault, auquel nous empruntons ces remarques, a repris la question en parlant du même principe, mais au moyen d'un appareil perfectionné¹.

1009. Expériences de M. Regnault. — L'appareil de M. Regnault est représenté dans la *fig. 728* : a, a' sont deux tubes verticaux en fer, de $1^m,50$ de hauteur et de 10^{mm} de diamètre intérieur, réunis à leur partie supérieure par un tube horizontal $axxz$, et communiquant avec l'air extérieur par deux petits tubes t, t . A leur partie inférieure sont deux tubes horizontaux $o'o, o'o$, fermés en o', o' , et portant à l'extrémité opposée deux tubes verticaux de verre, réunis en v par un tuyau flexible en plomb, qui les fait communiquer avec un ballon de cuivre V entouré d'eau froide. On peut comprimer de l'air dans ce ballon, par le tube à robinet r . Le tube vertical a' est contenu dans une chaudière cylindrique remplie d'huile, et maintenue sur un fourneau au moyen de vis n, n ; cette chaudière est enveloppée d'un manchon de tôle, destiné à

¹ Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut, 1847.

en empêcher le refroidissement. Un thermomètre à air, dont on voit une partie en AA et dont nous décrirons plus tard la disposition (1040), donne la température de l'huile. L'autre tube vertical, a , est entouré d'un manchon dans lequel on fait passer un courant d'eau froide, dont la température est donnée par plusieurs thermomètres. Cette eau, amenée jusqu'au fond du manchon, s'échappe en débordant par sa partie supérieure; une portion est dirigée sur une mèche de coton ou de chanvre c, c sur les tubes horizontaux $\alpha x, o'o$, pour empêcher la chaleur de la chaudière de passer au-delà. Enfin, des écrans doubles, qui ne sont pas représentés dans la figure, entourent cette chaudière de tous côtés, pour intercepter la chaleur qu'elle rayonne.

Tout l'appareil est appuyé contre un mur, et porté par une barre supérieure CPP mobile autour d'un axe C scellé dans le mur, et soutenue par deux pièces fixes P, P munies de vis au moyen desquelles on peut la rendre bien horizontale. Cette barre supporte le tube $\alpha x x x$, au moyen de quatre paliers que l'on peut monter ou abaisser un peu, de manière à le rendre horizontal. On peut vérifier à chaque instant si cette condition est remplie, au moyen de repères $\alpha, \alpha, \alpha, \alpha$ formés par de petits anneaux de laiton, sur chacun desquels est tracée une croix dont le point central est placé à la hauteur de l'axe du tube. La barre CP se contourne en un demi-cercle qui enveloppe la chaudière, et est complété en avant.

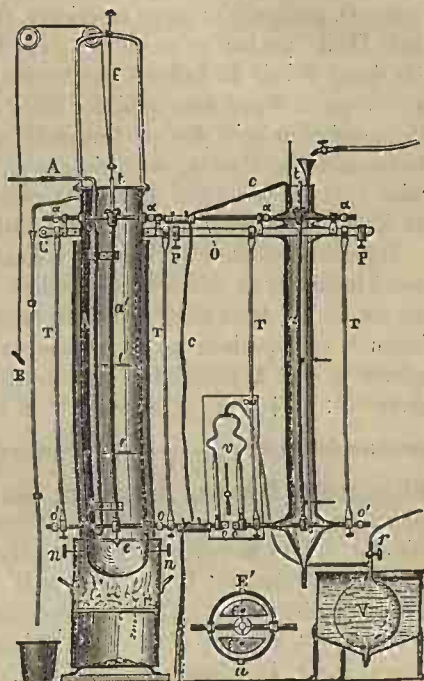


Fig. 728.

La chaudière s'appuie sur l'anneau ainsi formé, par deux vis verticales placées en avant et par derrière, comme on la voit dans la coupe transversale E'. Les tubes horizontaux $o'o, o'o$ sont soutenus par des tirants verticaux de fer T, T, T, T, suspendus à la barre CP. Au moyen de vis disposées au bas des tirants, on rend ces tubes horizontaux, et l'on vérifie s'il en est ainsi, au moyen de repères o', o, o, o, o' . Le tube αx traverse la chaudière, dont les parois sont pressées par des écrous, roulant dans des vis taillées dans l'épaisseur de ce tube. Le tube αx et la barre CP traversent le manchon de droite par des tubulures garnies de membranes de vessie. Les tubes $o'o, o'o$ sont disposés de

la même manière que le tube αx , dans leur passage à travers la chaudière et le manchon. Enfin, un agitateur *ceef*, dont on voit à part la projection $e'e'$ dans la coupe E' , sert à mêler l'huile dans la chaudière; il est mis en mouvement au moyen d'un cordon que l'on tire en E. L'huile dilatée peut s'échapper par un tube latéral, qui descend à gauche de la chaudière.

Voici comment se font les expériences : l'appareil étant bien réglé, on verse du mercure par les tubes supérieurs t, t , et en même temps on comprime de l'air dans le ballon V, pour empêcher le mercure de monter dans les tubes de verre v . Le mercure s'étend bientôt dans le tube αx , et l'excès de ce liquide sort par un orifice O, pratiqué à sa partie supérieure. On chauffe ensuite la chaudière et l'on agite l'huile, pendant qu'un courant d'eau froide traverse le manchon de droite. On donne à l'air du ballon V une tension telle que le niveau du mercure ne s'élève que très-peu dans celui des tubes v qui est du côté chauffé. Quand le thermomètre ne varie plus que lentement, on vérifie les repères, et quand il est stationnaire, on observe, au cathétomètre, les niveaux du mercure dans les tubes v , et l'on prend leur distance au repère o placé au bas du tube de verre de droite, repère d'où l'on compte toutes les hauteurs.

Supposons les tubes horizontaux infiniment minces et la colonne a , à 0° . Soit h la hauteur du mercure dans le tube v de droite, et II la distance du repère qui est au bas de ce tube, à l'axe du tube αx . La force élastique de l'air du ballon V est équilibrée par la colonne de mercure II à 0° , diminuée de la colonne h , dont la température t est connue. Cette colonne h , ramenée à 0° , serait $h : (1 + \delta' t)$ en appelant δ' le coefficient de dilatation absolue du mercure de 0 à t° . $II - \frac{h}{1 + \delta' t}$ représente donc la force élastique de l'air du ballon. Soit h' la hauteur du mercure dans le tube v de gauche, au-dessus du repère du tube de droite, et h'' la différence de hauteur des deux repères voisins o, o . L'air du ballon V est tenu en équilibre par la colonne de mercure a' , dont la température est T et la hauteur II' , diminuée de la colonne $h' + h''$, dont la température est t . Cette dernière colonne ramenée à la température T , devient $(h' + h'') [1 + \delta'' (T - t)]$, δ'' étant le coefficient moyen du mercure entre t° et T° . La colonne $II' - (h' + h'') [1 + \delta'' (T - t)]$ représente donc la force élastique de l'air dans le ballon V. En ramenant à cette température T , la colonne du tube a qui est à 0° , on aura, en désignant par δ le coefficient moyen du mercure entre 0° et T° .

$$\left[II - \frac{h}{1 + \delta' t} \right] (1 + \delta \cdot T) = II' - (h' + h'') [1 + \delta'' (T - t)].$$

$$\text{d'où } \delta T = \frac{(II' - II) + h \frac{1}{1 + \delta' t} - (h' + h'') [1 + \delta'' (T - t)]}{II - \frac{h}{1 + \delta' t}}. \quad [1]$$

Pour calculer δT , on employait la méthode des corrections successives (I, 23);

on prenait d'abord pour δ' et δ'' les valeurs données par Dulong et Petit, et l'on obtenait ainsi une série de valeurs de δT , que l'on renfermait dans une formule d'interpolation, pour pouvoir calculer les valeurs intermédiaires à celles qui étaient données par l'expérience. De cette formule d'interpolation, on déduisait la valeur de $\delta' t$ et celle de $\delta'' (T - t)$, qui est égale à $\delta T - \delta' t$. On portait ces nouvelles valeurs dans la formule [1] et l'on calculait de nouveau δT .

L'expérience ayant montré que la glace laisse rapidement de grands vides autour du tube *a* (fig. 728), M. Regnault a préféré employer un courant d'eau pour maintenir ce tube à une température constante 0. Alors, dans la formule [1], il faut multiplier la colonne II, par $\frac{1}{1 + \delta''' 0}$, pour la ramener à ce qu'elle serait à 0°, δ''' étant le coefficient de dilatation moyen du mercure entre 0° et 0°.

M. Regnault a fait aussi un grand nombre d'expériences par une méthode un peu différente : les deux tubes *a*, *a'* étaient réunis à leur partie inférieure par un tube de fer, et le tube *ax*, coupé vers le milieu, formait deux tubes séparés, aux extrémités voisins desquels se trouvaient deux tubes de verre verticaux, dans lesquels le niveau du mercure se tenait à des hauteurs différentes qu'on observait. La méthode se rapprochait dans ce cas, de celle de Dulong et Petit.

Voici quelques-uns des résultats trouvés par M. Regnault; ils diffèrent à peine de ceux qu'ont trouvés Dulong et Petit, et viennent en confirmer l'exactitude.

TEMPÉ- RATURE du thermomètre à air.	COEFFICIENT moyen de dilatation du mercure de 0° à T.	COEFFICIENT réel de dilatation de T° à (T + 1)°.	TEMPÉRATURE déduite de la dilatation absolue du mercure.	DIFFÉRENCE avec le thermomètre à air.
0°	0	0,00017905	0°	0°
30	0,00017905	18051	29,709	—0,291
50	18027	18152	49,650	—0,350
70	18078	18253	69,777	—0,223
100	18153	18305	100	0
150	18279	18657	151,044	+ 1,834
200	18405	18909	202,782	+ 2,782
250	18531	19161	255,214	+ 5,214
300	18658	19413	308,340	+ 8,340
350	18754	19666	262,160	+ 12,160

On voit dans la troisième colonne que la dilatation du mercure, à peu près régulière jusqu'à 100°, augmente de plus en plus au-dessus.

Pour mieux saisir la marche du phénomène, M. Regnault a employé la *méthode graphique*. Comme le papier peut éprouver un retrait inégal quand il est plus ou moins humide, il a fait la construction sur une planche de cuivre à graver,

formant un carré de 98^{cm} de côté. Chaque côté était divisé en 100 parties égales, et la surface, en 10000 petits carrés égaux, par des droites passant par les points de division. Les degrés de température étaient représentés par les divisions horizontales, et les *millièmes* des dilatations, par les divisions verticales. Les fractions de division se déterminaient dans chaque petit carré, au moyen d'une machine à diviser à pied lourd que l'on posait sur la plaque. La courbe ainsi construite tourne sa convexité vers l'axe des abscisses, ce qui montre l'accroissement de la dilatation avec la température.

1010. M. D. Mendeleeff a représenté par la formule suivante le volume du mercure à t° , en prenant pour unité le volume à 0°

$$V_t = 1 + 0,0001801 t + 0,00000002 t^2.$$

Cette formule a été calculée en partant des expériences de M. Regnault, et en tenant compte des poids de l'air contenu dans le tube de communication *v* (fig. 728).

II. Dilatation des liquides autres que le mercure et l'eau.

1011. Les liquides se dilatent plus que les solides : ainsi, le mercure, qui est le moins dilatable des liquides, se dilate plus que le zinc, qui est le plus dilatable des solides. C'est pour cela que les vases fermés et entièrement pleins de liquide se brisent quand on les chauffe, à moins que les parois ne soient assez ductiles pour s'étendre sans se déchirer.

La force avec laquelle se fait la dilatation des liquides est énorme, et égale à l'effort qu'il faudrait exercer pour ramener, par compression, la masse dilatée à son volume primitif. Or, nous savons quelle énorme pression il faut exercer pour réduire le volume d'un liquide de quelques cent millièmes. Par exemple, le mercure se dilate de 0,0017905 pour 10° , sa compressibilité est 0,00000295 par atmosphère ; il faudrait donc une pression de plus de 600 atmosphères pour l'empêcher de se dilater par un échauffement de 10° seulement ! Il est vrai que le mercure est le moins compressible des liquides, mais c'est aussi le moins dilatable.

1012. Mesure de la dilatation des liquides. — Nous avons vu comment on peut, en partant de la dilatation absolue du mercure, évaluer le coefficient d'une enveloppe de verre. Il est facile ensuite d'obtenir la dilatation *absolue* d'un liquide, en mesurant d'abord sa *dilatation apparente* dans le verre, par une des méthodes que nous avons indiquées pour la dilatation apparente du mercure (828), et y ajoutant la dilatation du verre (992).

Deluc, un des premiers, a fait des expériences précises sur les dilatations des liquides ; mais sans tenir compte de la dilatation de l'enveloppe qu'il regardait comme négligeable. Il avait soin de chasser, par l'ébullition, l'air dissous dans

le liquide, et reconnu combien il est difficile de réussir complètement¹. Il constata aussi que des thermomètres faits avec les divers liquides dont il s'est occupé, étaient en retard sur le thermomètre à mercure à partir de 0°, et que le retard diminuait en s'approchant du point d'ébullition. D'où il déduisit cette loi, confirmée depuis, que *la dilatation des liquides, pour un degré, va en augmentant à mesure que la température s'élève à partir de zéro.*

On ne peut donc plus employer un coefficient, dans les calculs sur les volumes liquides. On se sert alors des dilatations *totales* entre 0° et les températures successives. Biot, en discutant les observations de Deluc, a reconnu qu'on peut représenter les dilatations des liquides qu'il a considérés, par la *formule empirique*

$$\hat{z}_t = at + bt^2 + ct^3,$$

dans laquelle \hat{z}_t représente la dilatation totale de 0° à t° , et a , b , c des constantes que l'on détermine, pour chaque liquide, au moyen de trois observations directes. Il n'y a pas de terme constant, car on doit avoir $\hat{z}_t = 0$, pour $t = 0$. La formule servira à calculer, dans chaque cas, la valeur de \hat{z}_t dont on aura besoin. Ces formules empiriques dont nous avons déjà cité des applications (929) s'emploient toutes les fois qu'on ne trouve pas de lois simples; elles remplacent les constructions graphiques. On en attribue l'invention à un astronome lyonnais, Gabriel Mouton.

Gay-Lussac a mesuré la dilatation de quelques liquides par la même méthode que Deluc, et aussi par le moyen suivant : le tube thermométrique, gradué, était étiré en pointe à son extrémité, rempli de liquide, puis plongé dans un bain chaud à température connue. Du liquide sortait par la pointe; on ramenait l'appareil à zéro, et l'on voyait sur la graduation combien il en était sorti. La dilatation du liquide restant était représentée par la portion vide du tube: Cette dernière méthode permet de procéder par pesées, comme avec le thermomètre à poids. Gay-Lussac a trouvé ainsi que la dilatation de l'eau est moindre que celle de l'alcool, et surtout du sulfure de carbone, et de l'éther dont la dilatation est la plus grande. Il mesurait la contraction de ces liquides à partir de leur point d'ébullition, où la force répulsive des molécules est la même, car elle fait équilibre à la pression atmosphérique.

Thomson avait remarqué que *les liquides les plus dilatables, à partir de 0°, sont ceux dont la température d'ébullition est la plus basse.* En effet, les points d'ébullition des quatre liquides observés par Gay-Lussac sont 100°, 78°, 41°, 46°, 60°, 35°, 86°. Cette loi rend bien compte de ce fait, que la dilatation d'un même liquide augmente quand la température s'élève, ce liquide se rapprochant alors de son point d'ébullition. Le mercure, le moins dilatable des liquides, ne bout qu'à 360°, et sa dilatation est uniforme jusqu'à 100°. Il en est de même de l'huile d'olive, qui bout à 300°, et forme des thermomètres à peu près

¹ Recherches sur les modifications de l'atmosphère, t. I.

d'accord avec le thermomètre à mercure. L'eau salée, qui bout plus difficilement que l'eau pure, forme un thermomètre moins irrégulier que celle-ci : à 25°, il marque, d'après Davy, 21°, 6, tandis que l'eau pure ne donne que 5°, 1. Il semble donc que, plus un liquide est difficile à réduire en vapeur, plus sa dilatation est faible et plus elle est régulière, surtout quand on s'éloigne du point d'ébullition. Mais nous allons voir que cette loi n'est vraie que pour les liquides appartenant au même groupe chimique.

Dans ses expériences, Gay-Lussac n'a pas tenu compte de la dilatation du verre. Muncke, qui a étudié les dilatations d'un grand nombre de liquides, particulièrement du carbure de soufre et de l'alcool absolu¹, s'est mis à l'abri de cette cause d'erreur, par une méthode de compensation qui consiste à introduire dans le réservoir du tube thermométrique une quantité de mercure dont la dilatation soit égale à celle de l'enveloppe. Si V est le volume total de l'appareil à 0°, et v le volume du mercure, aussi à 0°, on devra avoir, pour qu'il y ait compensation, $VK = vD$, en appelant K le coefficient de dilatation cubique du verre, et D celui du mercure.

Nous réunissons ici les résultats trouvés par Dalton, pour la *dilatation totale* et *apparente* de divers liquides dans le verre entre 0° et 100°. Certains de ces liquides bouillent naturellement au-dessous de cette température; mais quand ils sont privés d'air, ils peuvent la supporter sans bouillir.

Acide nitrique.....	$\frac{1}{9} = 0,11$	Acide chlorhydrique.....	$\frac{1}{17} = 0,06$
Alcool.....	$\frac{1}{9} = 0,11$	Acide sulfurique.....	$\frac{1}{17} = 0,06$
Huiles fixes.....	$\frac{1}{12} = 0,08$	Eau saturée de sel.....	$\frac{1}{20} = 0,05$
Éther sulfurique.....	$\frac{1}{13} = 0,07$	Eau pure.....	$\frac{1}{22} = 0,0466$
Essence de térébenthine..	$\frac{1}{13} = 0,07$	Mercure.....	$\frac{1}{50} = 0,02$

Application. — L'alcool ordinaire se dilate environ trois fois plus que l'eau, et d'autant plus qu'il contient moins de ce liquide. M. Silbermann a imaginé d'en déterminer le titre, en partant de cette propriété. Le liquide est aspiré dans une espèce de pipette jusqu'au zéro d'une graduation tracée sur le tube; on ferme l'orifice de la pipette et on la chauffe à 50°. L'alcool se dilate, et le nombre de divisions dont s'élève son niveau fait connaître approximativement son titre.

1013. Expériences de M. I. Pierre². — Dans ces expériences, qui ont porté sur 44 liquides différents, préparés dans un grand état de pureté, le liquide, purgé d'air par l'ébullition, était renfermé dans un tube thermométrique t (fig. 729) ajusté, au moyen d'un bouchon i , au fond d'un manchon de verre me à côté d'un thermomètre t' . Ce manchon était fixé en e , au couvercle d'un réservoir R , rempli d'eau ou d'huile, et placé sur un fourneau. Un courant d'eau arrivant en c

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LXIV, p. 5.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XV, XIX, XX, XXI, XXXI, XXXIII.

et sortant en d traversait le manchon et maintenait les tiges des tubes t , t' à une température constante donnée par deux thermomètres, l'un à mercure, l'autre formé du liquide à étudier, afin qu'on pût calculer la correction relative à la moindre température de ces tiges (932). Un double agitateur AaA' remuait l'huile du réservoir R et l'eau du manchon. On observait toujours les températures quand elles atteignaient leur maximum en montant, ou leur minimum en descendant.

Dans une autre série d'expériences, le tube à liquide, que l'on est convenu depuis d'appeler *dilatomètre* était entièrement plongé dans une grande caisse de cuivre, de 45 litres de capacité, remplie d'huile ou d'eau.

La correction pour la dilatation de l'enveloppe se faisait au moyen de la formule $\Delta = D - \frac{v'}{v} k$ (992), et les valeurs comprises entre celles qui étaient

données par l'observation directe étaient calculées au moyen de la formule $\delta_t = at + bt^2 + ct^3$, dans laquelle a , b , c étaient déterminés par trois observations. δ_t : t représente alors la dilatation moyenne pour 1° , entre 0° et t° . Si t est très-petit, la valeur de δ_t : t est égale à a , qui représente la dilatation pour le premier degré à partir de 0° .

Le tableau ci-dessous, qui contient une partie des résultats publiés par M. I. Pierre, montre que la dilatation augmente avec la température, et d'une manière très-différente pour les divers liquides considérés à partir de leur point d'ébullition. On remarque cependant que les liquides, réunis par une accolade, qui appartiennent au même groupe chimique, se dilatent sensiblement suivant la même loi, c'est-à-dire que des volumes égaux à la température d'ébullition de ces liquides, restent égaux, à d'autres températures également distantes de ce point. Ce résultat a été observé sur cinq groupes différents, mais composés de deux ou trois liquides seulement.

Dans chaque groupe, le liquide le plus dilatable est celui dont le point d'ébullition est le moins élevé. Mais quand on passe d'un groupe à un autre, la loi remarquée par Thomson n'est plus vraie; par exemple, le *chlorure de silicium*, qui bout à 59° , est plus dilatable que le *bromure d'éthyle*, qui bout à $43^\circ,8$. De tous les liquides, le plus dilatable est l'*aldéhyde*, qui bout à 22° . L'*éther* et le *chlorure d'éthyle*, qui bouillent à 35° et à 11° , ont à peu près la même dilatation.

La dilatation de la plupart des liquides peut être représentée par une expression de la forme $\delta_t = at + bt^2 + ct^3$, avec les mêmes coefficients pour toutes les températures; d'autres, au contraire, par exemple l'eau, demandent des coefficients différents pour les basses températures et pour celles qui se rapprochent du point d'ébullition.

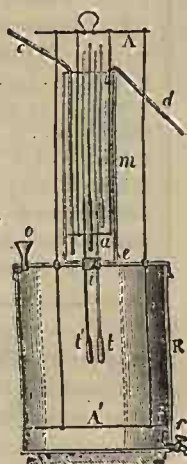


Fig. 729.

SUBSTANCES	COEFFICIENT MOYEN de dilatation.		POIDS spécifique à 0°.	TEMPÉ- RATURE d'ébulli- tion.
	à 0°.	au point d'ébullition.		
{ Acétate d'oxyde d'éthyle.	0,001 258 496	0,001 489 001	0,907	74,1
{ — de méthyle.	0,001 295 954	0,001 484 159	0,867	59,5
{ Alcool amylique.....	0,001 890 011	0,001 068 560	0,827	131,8
{ — éthylique.....	0,001 048 630	0,001 195 509	0,815	78,3
{ — méthylique.....	0,001 185 570	0,001 329 747	0,821	63,0
{ Bromure de méthyle...	0,001 445 206	0,001 493 693	1,664	43,0
{ — d'éthyle.....	0,001 337 628	0,001 448 731	1,473	40,7
{ Iodure de méthyle.....	0,001 199 591	0,001 327 135	2,199	43,8
{ — d'éthyle.....	0,001 142 251	0,001 263 687	1,975	70,0
{ Butyrate d'oxyde d'éthyle	0,001 202 792	0,001 439 571	0,902	119,0
{ — de méthyle....	0,001 239 896	0,001 440 012	1,029	102,1
Aldehyde.....	0,001 653 523	0,001 827 064	0,805	22,0
Brome.....	0,001 038 186	0,001 167 673	3,187	63,0
Chloroforme.....	0,001 107 146	0,001 320 490	1,525	63,5
Chlorure d'éthyle.....	0,001 574 578	0,001 607 429	0,921	11,0
Chlorure de silicium....	0,001 294 149	0,001 563 537	1,524	59,0
Ether sulfurique.....	0,001 513 245	0,001 647 354	0,736	35,5
Huile des Hollandais....	0,001 118 932	0,001 282 410	1,280	84,9
Sulfure de carbone.....	0,001 139 804	0,001 249 336	1,233	47,9

M. Hermann Kopp a fait aussi beaucoup d'expériences sur la dilatation d'un grand nombre de liquides entre 0° et la température de leur ébullition, par la méthode du tube thermométrique ou *dilatomètre*¹. M. Frankenheim a employé la même méthode pour étudier les dilatations de plusieurs liquides; et il a comparé ces dilatations à la cohésion aux mêmes températures, évaluée par la hauteur du liquide dans un tube capillaire².

1014. Dilatation des liquides au-dessus de leur point d'ébullition.

— Le grand accroissement de la dilatabilité des liquides quand on s'approche de la température de leur ébullition, a conduit à chercher quelle serait cette dilatabilité au delà de cette température. Thilorier avait trouvé que l'acide carbonique liquéfié par une grande compression, se dilate environ 4 fois autant que l'air, dont la dilatabilité est considérable, comme nous le verrons; mais ce résultat n'avait été accepté qu'avec hésitation. Depuis, M. Baudrimont a trouvé que le liquide formé par la condensation du gaz provenant de la distillation de l'eau régale, se dilate à peu près comme l'air, entre — 6° et 18°; et M. Ch. Drion a

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLVII, p. 412.

² *Ann. de Pogj.*, t. LXXII, p. 422, et *Bibl. de Gen.* (arch. des sc., 1848), t. VII, p. 423.

constaté une dilatabilité tout aussi grande dans les liquides volatils, au delà de leur point d'ébullition ¹.

M. Drion a opéré sur l'éther chlorhydrique, l'acide hypoazotique, et l'acide sulfureux, liquides tellement différents par leur constitution chimique, qu'il a pu généraliser les résultats obtenus. Le liquide était renfermé dans un tube à déversement (fig. 730), analogue à celui du thermomètre métastatique (836). Après avoir divisé ce tube en parties d'égal volume, et déterminé le rapport entre la capacité d'une division et celle du réservoir, on effilait le tube à son extrémité, on soudait autour de la pointe *b*, un réservoir *r*, et par-dessus, une olive *a* destinée à l'introduction du liquide. Ce liquide étant versé dans l'olive, pendant que tout l'appareil était dans la glace fondante, on fermait à la lampe la pointe *a*; on chauffait le réservoir *R* pour faire passer l'air qu'il contenait dans l'olive, et le tube se remplissait par le refroidissement.

Cela fait, on ouvrait l'olive, on enlevait l'excès de liquide, en en laissant en *r* la quantité nécessaire pour pouvoir remplir totalement le tube, on séparait l'olive, et l'on fermait le tube en fondant le verre en *n*. De cette façon, il n'y avait pas de perte sensible de liquide par évaporation dans le tube, toute la vapeur nécessaire étant fournie par le liquide du réservoir *r*.

Le tube était placé à côté d'un thermomètre métastatique, dans l'axe d'une cloche renversée suspendue dans une enveloppe de tôle et chauffée par une flamme de gaz réglée de manière à obtenir une température constante donnée. La marche des thermomètres était observée de loin, avec des lunettes, à travers deux ouvertures garnies de lames de mica. — Quand la température doit être inférieure à 30°, le gaz dépose de la rosée sur la cloche, ce qui empêche de distinguer les tubes. Dans ce cas, on les suspend étant dans une grande masse d'eau fortement agitée.

Voici maintenant comment se font les expériences : le tube étant entièrement rempli de liquide à la température de 15°, on le plonge dans la glace fondante et l'on note la position du niveau, puis on le plonge dans de l'eau à une température *t* un peu inférieure à 15°; le niveau s'élève, et l'on note sa position. On a alors le rapport des volumes apparents du liquide à *t*° et à 0°, c'est-à-dire la dilatation entre ces deux températures. On porte ensuite le tube à ($t + 15$)°; du liquide sort du tube et tombe dans le réservoir *r*, on ramène la température à *t*°, le niveau descend, et de sa position on déduit la dilatation entre *t*° et *t*'°; et ainsi de suite.

Il résulte des expériences de M. Drion que les dilatations apparentes de l'éther chlorhydrique, de l'acide hypoazotique, et de l'acide sulfureux croissent



Fig. 730.

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. LVI, p. 5.

très-rapidement avec la température. Ce qui se voit facilement par le procédé graphique. M. Drion a aussi représenté les volumes par deux formules empiriques de la forme $\log y = ax + bx^2 + cx^3$; des coefficients différents étant nécessaires pour représenter les résultats entre 0° et 80°, et entre 80° et 130°. A 130° la dilatation de l'éther chlorhydrique pour 1°, est à près de 3 fois et demie celle qui a lieu à 0°, et 1 fois et demie celle de l'air; et vers 110° les dilatations du liquide et de l'air sont égales. Pour l'acide sulfureux, l'égalité a lieu vers 80°, et la dilatation est presque triple de celle de l'air, à 130°. Les expériences sur

l'acide hypoazotique n'ont été poussées que jusqu'à 90°, mais comme la dilatation de ce liquide s'accroît moins rapidement que celle de l'éther, jusqu'à 50°, pour la dépasser ensuite, on peut admettre qu'à 110° il se dilate aussi, plus que l'air.

M. Drion n'a pas eu égard à l'extension de l'enveloppe par la chaleur et par la pression intérieure des vapeurs; mais ces effets ne faisant que diminuer la dilatation observée, les conclusions sont vraies à fortiori.

Des expériences de M. d'Andréeff, faites sur l'acide sulfureux, l'ammoniaque, l'acide carbonique et le protoxyde d'azote à l'état liquide, n'ont fait que confirmer que les liquides volatils se dilatent autant et plus que l'air, au delà de leur point d'ébullition. Pour éviter les effets de l'extension intérieure, M. d'Andréeff opérait dans un long tube cylindrique épais et sans réservoir; quelquefois ce tube était renfermé dans un autre plus gros, contenant du même liquide, de

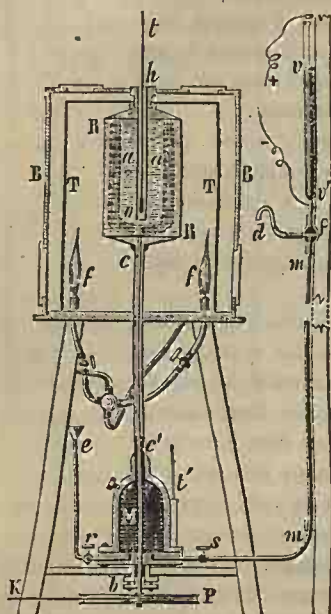


Fig. 731. — 1/4.

manière que la pression fût la même en dedans et en dehors du tube dans lequel il observait les volumes.

1015. Expériences de M. A. Hirn¹. — Ces expériences ont été faites en vue d'obtenir des données essentielles relatives à la théorie mécanique de la chaleur. Elles ont été faites au-dessus du point d'ébullition, sur des liquides moins volatils que ceux qui avaient été étudiés jusque-là, et par une méthode qui permettait, en opérant sur une grande échelle, de se débarrasser de la plupart des corrections que doivent ordinairement recevoir les résultats bruts des

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. X, p. 32.

expériences. L'appareil employé est une sorte d'immense thermomètre à déversement (fig. 731). Le liquide à étudier remplit un réservoir de cuivre RR, jaugé avec soin, de 7^m,9254, et communiquant par le tube *cc'*, avec un récipient de fonte M, que l'on remplit de mercure jusqu'en *c'* par le tube à robinet *er*. A ce récipient, est ajusté un long tube de fer *smm* s'élevant à 10^m,5 de hauteur, et surmonté d'un gros tube de verre *vv'*, dont nous verrons plus loin l'usage (1060). Pour remplir le réservoir RR, on dévisse le manchon *ho*, qui contient un thermomètre très-sensible *t*, et l'on verse le liquide, pendant qu'un agitateur bifurqué *aa* tourne sur un axe traversant le tube *cc'* et passant par une boîte à étoupes *b*. Le mouvement est imprimé régulièrement à cet axe par une poulie P, sur laquelle agit une corde sans fin K. Quand le réservoir est plein et que l'agitation ne fait plus sortir de bulles de gaz, on visse le manchon *ho* avec précaution, et l'on recouvre le réservoir, de deux enveloppes munies des ouvertures nécessaires, l'une BB en bois, l'autre TT en tôle. On verse ensuite du mercure dans le tube *vm* jusqu'en *v*.

L'appareil était installé dans un vaste atelier dont la température, évaluée avec soin, était à peu près constante.

Quand le thermomètre *t* est stationnaire, on tourne le robinet à trois voies *p*, dans la position indiquée de manière à faire communiquer la colonne *mm* avec le bec de déversement *d*. On allume alors quatre becs de gaz à robinets, *f, f, ...*, pendant que l'agitateur marche; le liquide se dilate, et aussitôt du mercure sort par le bec *d*, et quand la température est devenue stationnaire en *t*, on pèse le mercure sorti, et l'on en calcule le volume à la température ambiante. Ce volume, *v*, est égal à celui du liquide qui est descendu par dilatation dans le récipient M. Ce dernier volume, ramené à ce qu'il serait à 0°, c'est-à-dire à $v : (1 + \delta)$, représente la *dilatation apparente* du liquide dans le récipient de cuivre; et en y ajoutant la dilatation de l'enveloppe, on a la *dilatation absolue*, sous la pression de 14 à 15 atmosphères, pression qui empêche l'ébullition de se produire. La température du récipient M était donnée par un thermomètre extérieur *t'*, et la quantité δ était déduite des formules connues (1013), applicables aux températures très-inférieures au point d'ébullition. La température de la colonne *mm* ne variait pas sensiblement. Enfin, les températures du thermomètre *t*, étaient prises de loin, en vingtièmes de degré, au moyen d'une lunette, et l'on tenait compte de la colonne de mercure dépassant le niveau *h* (932).

M. Hirn a étudié ainsi les dilatations de plusieurs liquides : *eau, alcool anhydre, éther, sulfure de carbone, essence de térébenthine, bichlorure de carbone*. Il a représenté leur volume par des expressions de la forme

$$v = 1 + at + bt^2 + ct^3 + dt^4,$$

dont les coefficients étaient calculés pour chaque liquide au moyen de 4 expériences. Voici les volumes, *v*, obtenus pour 4 des liquides étudiés; aux températures indiquées T, le volume à zéro étant pris pour unité :

	T	v		T	v
Alcool anhydre . . .	50°.	1,05429275	Sulfure de carbone .	40°.	1,01946168
	200°.	1,47664887		160°.	1,26572164
Essence de térében- thine	40°.	1,03400788	Bichlorure de carbone	30°.	1,03488964
	160°.	1,17836433		150°.	1,23296357

On voit combien la dilatation totale augmente rapidement avec la température la plus forte. Si l'on calculait la dilatation pour un échauffement de 1° choisi tout près de la température la plus élevée; on verrait que, sans être aussi grande que celle des liquides volatils étudiés par M. Drion, cette dilatation est comparable au coefficient de l'air, qui est 0,003665, comme nous le verrons bientôt (1032).

1016. Relation entre la dilatabilité et la compressibilité. — En comparant les liquides, malheureusement, peu nombreux dont on connaît à la fois la compressibilité et la dilatation, nous avons reconnu que les plus dilatables sont ceux qui se compriment le plus facilement. Ainsi, le mercure est le moins compressible et en même temps le moins dilatable des liquides, et l'éther, un des plus dilatables, est un des plus compressibles. En plaçant par ordre de compressibilité les liquides que l'on peut ainsi comparer, on a la série : *ether, alcool, essence de térébenthine, chloroforme, eau, mercure*; et, par ordre de dilatation, on trouve : *ether, chloroforme, alcool, essence de térébenthine, eau, mercure*. Ces deux séries ne sont pas identiques; mais si l'on observe que les coefficients de la plupart de ces liquides sont les coefficients moyens entre 0° et 100°, que les deux alcools comparés n'étaient pas vraisemblablement au même titre, et que ces liquides ne suivent pas la même loi dans l'accroissement de leur dilatation, on reconnaîtra que la loi se dessine avec plus de netteté qu'on ne pouvait l'espérer. Il faudrait, pour se mettre dans de bonnes conditions, comparer les contractions, à partir du point d'ébullition, aux compressibilités à la même température. Mais les données manquent complètement à ce sujet. Remarquons encore que la dilatation d'un même liquide augmente avec la température, et qu'il en est souvent de même pour la compressibilité (I, 348).

La loi dont il s'agit paraît s'étendre à tous les corps; nous l'avons déjà constatée pour les solides (988), et elle s'applique également aux gaz; car si leur compressibilité va en augmentant quand la pression augmente, surtout pour ceux qui sont faciles à liquéfier (I, 381), nous verrons bientôt que, plus un même gaz est comprimé, plus son coefficient de dilatation est grand. De plus, l'acide carbonique, qui se comprime plus que l'air, se dilate aussi davantage.

III. Dilatation de l'eau. — Maximum de densité.

1017. Maximum de densité de l'eau. — L'eau est le liquide dont on a le plus étudié la dilatation; non-seulement à cause du rôle capital qu'elle joue dans la nature, mais encore à cause d'un phénomène singulier que présente sa

dilatation, et dont la définition exacte a provoqué d'innombrables recherches. Ce phénomène consiste en ce que l'eau à 0° , au lieu de se dilater, se contracte jusqu'à 4° . A partir de ce point, elle suit les lois ordinaires des liquides, et se dilate de plus en plus; elle a donc un minimum de volume à 4° , ou un *maximum de densité*.

Ce phénomène a été observé d'abord par les académiciens de Florence, vers 1670 : ayant fait refroidir de l'eau dans un tube thermométrique, ils virent le niveau remonter quand la température s'approchait de 0° . Le Dr Crowne, qui répéta cette expérience en 1683, dit que l'eau se dilate par le froid, dans le voisinage de son point de congélation. Hooke objecta que ce résultat n'était qu'apparent, et qu'il était dû à une contraction plus rapide de l'enveloppe; opinion qui fut généralement partagée.

Blagden, en 1778, ayant cru remarquer que l'eau un peu salée, qui se congèle à une température plus basse que l'eau pure, présente un maximum de contraction à une même distance de son point de congélation, admit le fait comme réel. Delue, Rumfort, Haüy... se rangèrent à cette opinion.

Pour lever tous les doutes, il fallait opérer indépendamment de la dilatation de l'enveloppe. C'est ce que firent Trallès en Suisse, et Hope en Écosse, par le moyen suivant. Hope remplit d'eau à 0° un vase profond muni de deux thermomètres, l'un en haut, l'autre en bas. La température de l'air étant à 15° , le thermomètre inférieur monta le premier jusqu'à 4° environ, pendant que le thermomètre supérieur était encore à 0° ; d'où il conclut que l'eau, vers 4° , est plus dense qu'à 0° . Il fit l'expérience inverse en employant de l'eau à 10°



Fig. 733.

et plongeant le vase dans de la glace; au bout de quatre heures, le thermomètre inférieur resta stationnaire à 4° , pendant que le thermomètre supérieur continuait à baisser jusqu'à 0° .

Hope opéra encore avec l'appareil (fig. 732) connu dans les cabinets de physique sous le nom d'*appareil à couronne* : un bassin annulaire *c* entoure la partie moyenne d'un vase cylindrique rempli d'eau à 0° ; on verse de l'eau tiède en *c*, et le thermomètre *t'* marque bientôt 4° , pendant que le thermomètre *t* marque encore 0° . — On opère aussi en remplissant le vase d'eau au-dessus de 4° , et l'on met un mélange réfrigérant dans le bassin *c*. Au bout d'un certain temps, *t'* marque 4° , et *t* marque 0° . — Rumfort a employé plus tard la disposition suivante (fig. 733) : un vase rempli d'eau à 0° est entouré de glace fondante; on enfonce un corps chaud, *c*, dans cette eau, et l'on voit le thermomètre *t*, appuyé sur un morceau de liège, marquer bientôt 4° , pendant



Fig. 732.

que le thermomètre *t* se maintient à 0°. L'eau échauffée à 4° tombe donc au fond du vase; elle est donc plus dense que l'eau à 0°.

L'augmentation de volume de l'eau au-dessous de 4°, doit être rapprochée de ce fait que ce liquide augmente de volume en se congelant; on peut donc admettre que les molécules liquides, quand elles approchent du point de congélation, commencent déjà à prendre l'arrangement qui correspond à l'état solide, et sous lequel elles occupent plus d'espace. Cette tendance continue même, à se manifester quand l'eau est maintenue liquide au dessous de zéro, comme l'a constaté Blagden en 1788; tandis que la glace aux mêmes températures se contracte comme tous les solides (997). Pour confirmer cette manière de voir, il faudrait étudier d'autres substances augmentant de volume en se solidifiant; mais celles qui sont dans ce cas fondent à une trop haute température pour qu'on ait pu faire l'expérience. Despretz a du moins reconnu que les *acides margarique et oléique*, la *stéarine*, l'*huile d'olive*, la *cétine*, la *parafine*, la *naphthaline* et le *soufre*, qui diminuent de volume en se solidifiant, ne présentent pas, à l'état liquide, de maximum de densité.

1018. Explication de quelques phénomènes. — Saussure a remarqué, dans les Alpes, que la température des lacs profonds d'eau douce est, en toute saison, égale à 4°. Ce résultat, vérifié depuis dans une foule de pays, s'explique facilement aujourd'hui: Dès que l'eau de la surface s'est abaissée à la température de 4°, elle descend au fond, d'où elle ne pourra remonter, si la profondeur est suffisamment grande pour que, ni la chaleur ni le froid ne puissent l'atteindre dans l'intervalle d'une saison à l'autre. L'eau des mers ne peut donner lieu au même phénomène, son maximum de densité étant au-dessous de son point de congélation (1020).

Puits de glace. — On nomme ainsi des trous cylindriques remarqués sur les glaciers par Rumfort; au fond se trouve toujours un corps étranger, pierre, feuille sèche, etc. Ce corps, déposé d'abord sur la glace, s'échauffe par les rayons solaires, et fait fondre la glace qu'il touche; l'eau de fusion passe bientôt à 4° et descend au fond de la cavité formée. Là, elle se refroidit en fondant un peu de glace, devient plus légère et remonte à la surface, où le soleil l'échauffe, ce qui la rend plus dense; elle redescend donc au fond, et ainsi de suite; de manière que la cavité devient de plus en plus profonde, jusqu'à ce qu'il se rencontre quelque fissure par laquelle l'eau se perde; alors le phénomène s'arrête.

1019. Détermination du maximum de densité. — On a fait beaucoup d'expériences pour déterminer exactement la température à laquelle l'eau présente son maximum de densité. Deluc employait un thermomètre à eau, dont il suivait la marche dans le voisinage de 0°. Trallès et Hope se servaient de la méthode du plongeur, et Dalton, du procédé de Rumfort. Gilpins et Blagden prenaient la densité de l'eau à différentes températures par la méthode du flacon, en ayant soin de ramener les poids de l'eau à ce qu'ils eussent été si le vase eût conservé la même capacité à toutes les températures: *p* étant le poids

d'eau contenue dans le flacon à t° , si le flacon était à zéro, ce poids ne serait que $p : (1 + Kt)$, K étant le coefficient de dilatation cubique du verre.

Lefèvre-Gineau, pour fixer la valeur du gramme, lors de l'établissement du système métrique, pesait une masse de laiton dans l'eau à différentes températures, et comparait les pertes de poids, en ayant soin de les ramener à ce qu'elles eussent été si la masse n'eût pas changé de volume. Cette méthode a été suivie par Bischoff et par Hallstrom. Ce dernier opérait de la manière suivante¹ : il pesait une boule de verre, en tenant compte de la perte de poids due à l'air déplacé (I, 229). Cette boule, suspendue par un cheveu, était ensuite plongée dans l'eau à une température connue t ; la perte de poids donnait le poids de l'eau déplacée. Ce poids p' était ramené à ce qu'il eût été si la boule avait conservé le volume qu'elle possédait à 0° ; c'est-à-dire à $p : 1 + Kt$. Les pertes de poids dans l'eau à différentes températures sont alors entre elles comme les densités, et les volumes de même poids, en raison inverse de ces densités. — La dilatation du verre était mesurée sur des tubes fabriqués avec le même verre que celui des boules. Le vase qui contenait l'eau était plongé dans un bain du même liquide, dont on faisait varier la température avec de l'eau chaude ou de la neige.

Despretz, dans un grand travail publié en 1839², a déterminé par deux méthodes différentes le maximum de densité de l'eau, dont il a suivi la dilatation de -9° à $+100^{\circ}$. Il a d'abord employé des tubes thermométriques, nommés depuis *dilatomètres*, dont le coefficient de dilatation était déterminé directement en partant du coefficient absolu du mercure.

Deux de ces thermomètres à eau étaient plongés dans un vase de cuivre rempli d'eau, et alternaient avec des thermomètres à mercure, dont il vérifiait le zéro à chaque expérience. Ce vase était lui-même plongé dans un mélange réfrigérant, ou dans de l'eau plus ou moins froide. Il construisait une courbe (fig. 733) en prenant pour abscisses les températures, et pour ordonnées des lignes proportionnelles aux nombres indiqués par les divisions des tubes à eau. La courbe diffère peu d'une parabole, dans le voisinage du maximum de densité; elle représente les variations de la dilatation apparente. Pour tenir compte des changements de volume de l'enveloppe, on prend une certaine température $od = t^{\circ}$, et sur la verticale dc , une longueur égale à la dilatation du tube pour t° . La ligne oc donne alors les dilatations régulières du verre entre 0° et t° , et les dilatations absolues du liquide sont égales aux ordonnées comptées à partir de la droite oc . Si l'on mène une tangente à la courbe, parallèlement à cette droite, le point de contact fait connaître la température oa , pour laquelle le volume est minimum. Cette construction semble ne



Fig. 733.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXVIII, p. 56.

² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXX, p. 5 et 49, et LXXIII, p. 296.

donner le point de contact que d'une manière incertaine; mais comme la courbe est une parabole, dans le voisinage du point de contact cherché, on obtient ce point avec précision en menant deux cordes parallèles à oc , et tirant par les milieux de ces cordes une sécante qui coupe la courbe au point de contact que l'on veut obtenir.

Despretz a aussi procédé par un calcul d'interpolation (1012) qui l'a conduit aux mêmes résultats, et il a fixé le maximum de densité à 4° , nombre plus sûr que tous ceux qui avaient été donnés jusqu'alors, tant à cause du soin apporté aux expériences, que de la manière dont il a été tenu compte de causes d'erreur ignorées ou négligées dans les expériences antérieures.

La seconde méthode employée par Despretz consistait à étudier l'équilibre de la température dans une colonne d'eau, dans laquelle étaient plongés quatre thermomètres à des hauteurs différentes. L'eau étant à 10° , on l'exposait dans un espace à 0° , et l'on construisait, pour chaque thermomètre, la courbe de ses températures successives prises pour ordonnées, les abscisses représentant les minutes.

Le thermomètre inférieur baisse d'abord, l'eau refroidie descendant au fond, et il reste stationnaire quand il est enveloppé d'eau au maximum de densité. La couche d'eau au maximum va en augmentant, et finit par arriver jusqu'au niveau. Le refroidissement continuant, le thermomètre inférieur recommence à baisser après être resté stationnaire; de sorte que la courbe qui lui correspond descend d'abord vers l'axe des x , puis devient sensiblement horizontale, pour s'abaisser ensuite jusqu'à cet axe. Les autres thermomètres donnent des courbes analogues, seulement les parties horizontales sont plus éloignées de l'axe des y , l'eau vers 4° ne les atteignant que plus tard, et elles s'abaissent plus tôt, parce que le refroidissement se propage de haut en bas, l'eau la plus froide étant la plus légère quand on est au-dessous du maximum de densité. S'il n'y avait pas d'irrégularités, les courbes devraient se couper sur une même parallèle à l'axe des x , dont la distance à cet axe représenterait la température du maximum de densité; mais il n'en est pas tout à fait ainsi, et l'on prend la moyenne entre les ordonnées des différents points d'intersection. Ces expériences ont été répétées en mettant l'eau du vase à 0° , et la laissant s'échauffer dans une atmosphère à 10° .

Despretz a aussi construit une table donnant les volumes et les densités de l'eau de degré en degré, de -9° à 100° . Il a reconnu que la dilatation par le froid au-dessous de 4° , est un peu plus prononcée que celle qui est produite par la chaleur, au-dessus. D'après M. H. Kopp, c'est à $8^{\circ},24$ que le volume de l'eau est le même qu'à 0° ; et d'après M. Rossetti, à $8^{\circ},46$. Nous avons donné une partie de la table de Despretz de 0° à 31° , en parlant de la correction à faire subir au poids de l'eau, dans la mesure des densités (I, 211); nous en donnons ici une autre partie qui montre la dilatation de l'eau quand on continue de la refroidir au-dessous de zéro.

TEMPÉRA- TURES	VOLUMES	DENSITÉS	TEMPÉRA- TURES	VOLUMES	DENSITÉS
-9°	1,0016311	0,998371	2°	1,0000331	0,999966
-8	1,0013734	0,998628	3	1,0000083	0,999999
-7	1,0011354	0,998865	4	1 " "	1 " "
-6	1,0009184	0,999082	5	1,0000082	0,999999
-5	1,0006987	0,999202	6	1,0000309	0,999969
-4	1,0005619	0,999437	7	1,0000708	0,999929
-3	1,0004222	0,999577	8	1,0001216	0,999878
-2	1,0003077	0,999692	9	1,0001879	0,999801
-1	1,0002138	0,999786	10	1,0002684	0,999731
0	1,0001269	0,999863	50	1,01205	0,988093
1	1,0000730	0,999924	100	1,04315	0,958636

Plusieurs physiiciens ont donné des tables semblables, et ont déterminé le maximum de densité. M. Hallstrom l'a fixé à 4°,1, et a construit des tables donnant le volume et la densité de l'eau en prenant pour unité le volume et la densité, soit à 0°, soit à 4°,1. — M. Frankenheim a calculé les siennes entre -15° et 100°, au moyen de formules empiriques ne comprenant chacune qu'un petit nombre de degrés. D'après celle qui donne le volume dans le voisinage de 0°, le maximum de densité aurait lieu à 3°,86. — M. H. Kopp a trouvé ce maximum à 4°,08, et M. I. Pierre, à 3°,92. Enfin, M. Rossetti, qui a calculé des tables, de -6° à +100°, par la méthode du tube thermométrique a obtenu 4°,07. On voit donc que le nombre 4° donné par Despretz mérite toute confiance.

Lefèvre-Gineau avait trouvé 4°,44, et c'est cette valeur, notablement trop forte, qui a servi dans la détermination du *gramme*. L'unité de poids adoptée ne représente donc pas exactement le poids d'un centimètre cube d'eau au maximum de densité, mais un poids un peu plus faible; et il est à regretter qu'on ait choisi une température aussi difficile à déterminer, au lieu de celle de la glace fondante, si nette et si facile à réaliser.

Il est à remarquer que les tables données par divers physiiciens présentent des différences très-sensibles surtout dans les températures élevées. Suivant M. Rossetti, ces discordances viennent principalement de la présence d'un peu d'air dissous qu'on ne peut expulser totalement, et qui a une influence marquée sur la dilatation de l'eau.

Plusieurs physiiciens ont cherché à représenter par une formule les volumes de l'eau, V_t , à différentes températures. M. Rossetti a proposé la suivante qui donne des résultats suffisamment d'accord avec ceux de l'expérience¹.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. X, p. 461 et t. XVII, p. 370.

$$V_t = 1 + (t - 4)^2 - B(t - 4)^{2,6} + C(t - 4)^3$$

dans laquelle on a $A = 0,000\ 00837991$; $B = 0,000\ 000\ 378702$;
 $C = 0,000\ 000\ 0224329$.

Par la méthode que nous avons décrite ci-dessus (1015), M. Hirn a étudié la dilatation de l'eau, de 100° à 200°. Il a trouvé, par exemple, à 120°, 180° et 200°, les volumes 1,05992; 1,10149; 1,158996, le volume à 4° étant toujours pris pour unité.

1020. Maximum de densité des dissolutions aqueuses. — On s'est demandé naturellement si l'eau de mer présentait aussi un maximum de densité. La question a paru longtemps douteuse. En 1827, A. Ermann avait reconnu qu'un peu de sel dissous abaissait le maximum de densité de l'eau. Muncke, en 1837, avait déduit de ses formules d'interpolation que l'eau de mer artificielle présente un maximum, à $-5^{\circ},25$. Dès 1832, Despretz avait reconnu que l'eau de la mer et les dissolutions aqueuses ont toujours un maximum de densité, mais qu'il se manifeste au-dessous du point de congélation, dès que la proportion de substance dissoute est un peu notable. Voici le tableau des principaux résultats qu'il a obtenus par la méthode du dilatomètre :

SUBSTANCES	POIDS de la substance sur 997,45 d'eau.	TEMPÉRATURE du maximum de densité.	TEMPÉRATURE de la congélation du liquide agité.
Eau de mer.....	»	-3°,67	-1,88
Chlorure de sodium.....	12,346	+1,19	-0,81
Id.....	24,892	-1,69	-1,41
Id.....	37,039	-4,75	-2,12
Id.....	74,078	-16,00	-4,30
Chlorure de calcium.....	6,173	+3,24	-0,22
Id.....	12,346	+2,05	-0,53
Id.....	24,692	+0,06	-1,03
Id.....	37,039	-2,43	-3,92
Id.....	74,078	-10,43	-5,28
Sulfate de potasse.....	6,173	+2,92	-0,14
Id.....	12,346	+1,91	-0,27
Id.....	24,692	-0,11	-0,55
Id.....	37,039	-2,28	-2,09
Id.....	74,078	-8,37	-4,08
Sulfate de soude.....	6,173	+2,52	-0,17
Id.....	12,346	+1,15	-0,36
Id.....	24,692	-1,51	-0,68
Id.....	37,039	-4,33	-1,30
Carbonate de potasse.....	37,039	-3,95	-3,21
Id.....	74,078	-12,41	-2,25

SUBSTANCES	POIDS de la substance sur 997,45 d'eau.	TEMPÉRATURE du maximum de densité.	TEMPERATURE de la congélation du liquide agité.
Carbonate de soude.....	37,079	-7,01	-2,85
Id.....	74,078	-17,30	-2,20
Sulfate de cuivre.....	57,996	-0,62	-1,32
Potasse pure.....	37,039	-5,63	-2,10
Id.....	74,078	-15,95	-4,33
Alcool.....	74,078	+2,30	-2,83
Acide sulfurique.....	12,346	+0,60	-0,44
Id.....	24,692	-1,92	-1,09
Id.....	37,039	-5,02	-1,34

Les températures de congélation sont celles que l'on observe pendant qu'on agite le liquide. On voit que : 1° L'eau de mer et les dissolutions aqueuses ont un maximum de densité ; 2° la température de ce maximum baisse plus rapidement que le point de congélation ; 3° l'abaissement du point de *congélation* au-dessous de zéro est sensiblement proportionnel à la proportion de sel dissous ; 4° l'abaissement du *maximum de densité* au-dessous de quatre degrés, serait aussi proportionnel à cette proportion.

M. Rossetti, par la méthode du dilatomètre, a confirmé les trois premières lois. Mais le rapport entre l'abaissement du maximum et le poids de sel dissous n'est pas constant, et va en augmentant, très-faiblement, mais graduellement, avec ce poids. La quatrième loi n'est donc pas vraie.

§ 3. — DILATATION DES GAZ

I. Mesure de la dilatation des gaz.

1021. La dilatation des gaz est considérable, ce qui fait que, malgré leur grande compressibilité, on peut, par leur dilatation, briser une fiole de verre mince, ou faire crever une vessie remplie de gaz, en les échauffant suffisamment. Hauksbée et Amontons sont les premiers qui aient tenté de mesurer la dilatation de l'air. Amontons plongeait dans l'eau chaude un appareil semblable au tube de Mariotte, et il opérât sur de l'air à différentes pressions. Lahire, par le même moyen un peu modifié, trouva, en même temps que Stancari à Bologne, que l'humidité augmente beaucoup la dilatabilité de l'air. Roy et de Saussure chauffaient un ballon plein d'air, et mesuraient la pression que ce gaz acquérait à différentes températures. Priestsley fut le premier qui opéra sur des gaz différents ; il les

renfermait dans une espèce de thermomètre à air; un index de mercure les séparait de l'air extérieur. Monge, Berthollet et Vandermonde ont expérimenté sur l'air et l'hydrogène. Guyton et Prieur Duvernois renfermaient le gaz dans un ballon à 0°, puis recueillaient sur le mercure, le gaz qui sortait par l'effet de la dilatation. Le volume de ce gaz ramené à 0°, représentait la dilatation du volume restant. Charles annonça que les gaz *insolubles dans l'eau*, qui sont précisément les gaz permanents, se dilatent également, loi que Gay-Lussac affirma ensuite nettement, à la suite des expériences que nous allons décrire.

1022. Loi de Gay-Lussac. — On a cru longtemps, surtout après les expériences de Priestley, Roy, Saussure et Prieur, que les gaz ne se dilataient pas également. Laplace, lors de la discussion qui eut lieu à l'Institut à l'occasion des expériences de Prieur, osa prédire que les résultats devaient être inexacts, parce que les molécules des gaz n'obéissant pas sensiblement à la cohésion, des

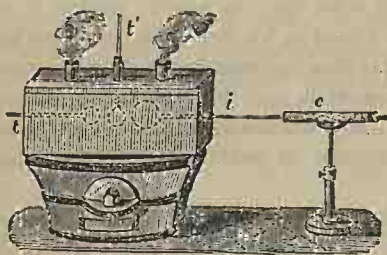


Fig. 735.

additions égales de chaleur devaient les écarter de la même quantité. C'est à sa demande que Gay-Lussac entreprit ses expériences, et il annonça que, entre 0° et 100°, et sous la pression de 0^m,76 environ, tous les gaz permanents présentent le même coefficient de dilatation. Dalton arrivait, de son côté, au même résultat. Si jusqu'alors on avait trouvé le contraire, c'est qu'on ne prenait pas assez de précautions pour bien dessé-

cher les gaz et les vases dans lesquels on opérait.

Gay-Lussac, après divers essais faits par la méthode de Prieur, adopta celle qui suit. Le gaz était contenu dans un tube thermométrique *i* (fig. 735) dont les divisions d'égale capacité étaient dans un rapport connu avec le volume du réservoir (I, 343). Pour introduire le gaz *bien sec*, Gay-Lussac commençait par remplir l'appareil de mercure qu'il purgeait par l'ébullition, comme pour faire un thermomètre, et y enfonçait un long fil de platine. Il ajustait ensuite à l'extrémité du tube un gros tube rempli de fragments de chlorure de calcium, et, renversant l'appareil et lui imprimant des secousses, il voyait l'air ou le gaz glisser le long du fil de platine, qui n'est pas mouillé par le mercure, et s'introduire dans le réservoir après s'être desséché en passant sur le chlorure de calcium. Le fil de platine était retiré pendant qu'il restait encore une petite colonne de mercure, destinée à servir d'index. Le tube était ensuite fixé, au moyen d'un bouchon, dans une caisse placée sur un fourneau et remplie d'eau, dont des thermomètres *t*, *t'* donnaient la température. On avait soin d'enfoncer le tube à gaz dans l'intérieur de la caisse, de manière que l'index étant tout près de la paroi, tout le gaz fût porté à la température du bain.

Soit v le volume occupé par ce gaz quand l'eau est à 0° , et v' le volume indiqué quand elle est portée à la température t . Le volume qu'occupe réellement le gaz est alors $v'(1 + Kt)$, K étant le coefficient du verre. Soit encore h et h' les hauteurs du baromètre lorsqu'on observe les volumes v et v' . Le volume du gaz $v'(1 + Kt)$, ramené à la pression h , serait $v'(1 + Kt)h' : h$. L'augmentation de volume produite par la chaleur est donc $v'(1 + Kt)\frac{h'}{h} - v$; et l'accroissement de l'unité de volume pour 1° , c'est-à-dire le coefficient de dilatation est donné par la formule

$$a = \frac{v'(1 + Kt)\frac{h'}{h} - v}{vt}, \quad \text{qui se réduit à } a = \frac{v' - v}{vt},$$

si l'on néglige la dilatation du verre et si l'on suppose que la pression atmosphérique n'a pas changé pendant l'expérience.

Cette méthode ne peut être employée que jusqu'à 100° , le mercure donnant au-dessus, des vapeurs appréciables, qui ajouteraient leur force élastique à celle du gaz, pour repousser l'index.

Gay-Lussac déduisit de ses expériences que tous les gaz permanents se dilatent également, et que leur coefficient de dilatation entre 0° et 100° est constant et égal à $\frac{1}{267} = \frac{3}{800} = 0,00375$; nombre qui a été un peu corrigé depuis.

L'égalité des coefficients de dilatation des gaz constitue une des plus belles lois de la physique. Pour la vérifier approximativement, on met dans des tubes gradués reposant sur le mercure, différents gaz bien secs occupant des volumes égaux, et l'on voit le niveau du mercure se déplacer également dans ces tubes, quand on les expose tous à la même température. Nous verrons bientôt que cette loi n'est pas aussi absolue qu'on l'avait cru d'abord.

1023. Formules des dilatations des gaz. — Si V est le volume d'un gaz à la température de 0° , et a son coefficient de dilatation, le volume V' à t° sera

$$[1] \quad V' = V(1 + at'), \quad \text{et} \quad V = \frac{V'}{1 + at'} \quad [2]$$

sera le volume à 0° en fonction du volume V' à t° . Le volume V'' à t''° , en fonction du volume V' à t'° , sera alors

$$[3] \quad V'' = V' \frac{1 + at''}{1 + at'}$$

Si nous représentons par $1 : n$ le coefficient a , on voit que, pour chaque degré de température, le volume augmente de $1 : n$ du volume à zéro, de manière que les volumes croissent en progression arithmétique. Les formules

$$V' = V \left(1 + \frac{1}{n} t'\right), \quad V'' = V \left(1 + \frac{1}{n} t''\right) \quad \text{donnent} \quad \frac{V}{n} = \frac{V'}{n + t'} = \frac{V''}{n + t''};$$

ce qui montre que la n^{e} partie du volume à zéro peut être remplacée par la fraction $\frac{1}{n+t'}$ du volume à t° . Nous pourrions donc écrire

$$[4] \quad V'' = V' \left(1 + \frac{t'' - t'}{n + t'} \right).$$

Dalton admettait que la dilatation d'un gaz qui passe de t° à $(t+1)^{\circ}$ était une fraction constante *du volume à t°* ; de manière que l'on aurait $V'' = V' \left(1 + \frac{t'' - t'}{n} \right)$. Alors les volumes formeraient une progression géométrique dont la raison serait $1 + \frac{1^{\circ}}{n}$. Nous avons vu (989) que cette dernière formule et la formule [4] ne diffèrent pas l'une de l'autre quand on néglige les puissances du coefficient. Pour les gaz, dont le coefficient est très-grand, il n'en est de même que jusqu'à 100° ; au delà, les deux lois donnent des résultats qui diffèrent sensiblement, et il convient d'adopter les formules [3] ou [4], qui sont identiques, les coefficients de dilatation des gaz étant toujours mesurés en partant de zéro.

1024. Variations de pression d'un gaz par la chaleur. — Considérons un gaz dont la pression est P, à 0° : on le porte à la température t , sans que son volume change; alors sa force élastique augmente, et il est évident que l'augmentation est celle que l'on obtiendrait si la dilatation avait d'abord pu se faire librement et qu'on eût ensuite ramené le volume à sa valeur primitive. Or, en appelant V le volume à 0° , le volume à t° est $V(1+at)$, a étant le coefficient de dilatation, et ce volume ramené à la valeur V, aura, d'après la loi de Mariotte, une force élastique P' donnée par la proportion

$$V : V(1+at) = P : P', \quad \text{d'où}$$

$$[5] \quad P' = P(1+at), \quad [6] \quad P = P' \frac{1}{1+at}, \quad \text{et} \quad P'' = P' \frac{1+at''}{1+at'} \quad [7]$$

pour la pression P'' à la température t'' , en fonction de la pression P' à la température t' , toujours en supposant le volume invariable.

Si le volume change, soit V' le volume sous la pression P' et à la température t' , et V'' sa valeur quand la pression est P'' et la température t'' ; on aura $P'' = P' \frac{V'}{V''} \frac{1+at''}{1+at'}$. On a donc pour la formule la plus générale

$$[8] \quad \frac{V''}{V'} = \frac{P' (1+at'')}{P'' (1+at')}, \quad \text{ou} \quad \frac{V''}{V'} = \frac{P' (n+t'')}{P'' (n+t')}, \quad [9]$$

en posant $a = 1 : n$, on peut éviter l'ennui des calculs indiqués par les formules, au moyen de l'instrument suivant :

Correcteur gazométrique de M. J. Salleron. — Cet instrument, qui

présente la même disposition générale que la règle *alcoométrique* du même inventeur (I, 226), porte, à gauche, les volumes observés. Sur la réglette qui glisse au milieu sont indiquées, à droite les températures et à gauche les pressions. On amène la division qui correspond à la pression donnée en face du volume observé, et alors la division de droite qui indique la température donnée se trouve en face d'une division tracée à droite de la règle et qui indique le volume corrigé.

1025. Comparabilité des thermomètres différentiels. — Comme application de ces formules, nous allons montrer que les indications des thermomètres différentiels (838) sont comparables entre elles. Considérons d'abord le *thermomètre différentiel* de Leslie, et supposons que les changements de volume des masses d'air contenues de chaque côté de la colonne liquide, soient négligeables. Si les températures des boules sont t' et t'' , il faudra, pour qu'il y ait équilibre, que les pressions de l'air de chaque côté satisfassent à la formule [7], qui donne, en posant $a = \frac{1}{n}$; $t'' - t' = \frac{n+t'}{p'}$ ($P'' - P'$).

Or la formule, [7] donne aussi $\frac{n+t'}{p'} = \frac{n+t''}{p''}$, ce qui montre que $\frac{n+t}{p}$ est une quantité constante; donc, $t'' - t'$ est proportionnel à $P'' - P'$, c'est-à-dire à la différence de niveau dans les deux branches.

Dans le cas du *thermoscope de Runfort*, les forces élastiques restent toujours égales de chaque côté de l'index, pendant que les volumes varient; on a donc

$$V'' : V' = n + t'' : n + t';$$

d'où l'on tire $(V'' - V') : (V'' + V') = (t'' - t') : (2n + t'' + t')$.

Or $(V'' + V')$ est constant, en négligeant la dilatation du verre, $t'' + t'$ peut être négligé devant $2n$, qui est plus grand que 500; donc $t'' - t'$ est sensiblement proportionnel à $V'' - V'$, c'est-à-dire au déplacement de l'index, qui représente la différence des volumes.

1026. Dilatations des gaz à de hautes températures. — Le coefficient de dilatation des gaz est constant jusqu'à 100° du thermomètre à mercure. Il était important de voir s'il en était ainsi au delà de 100°. C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit, en 1815¹: le gaz était introduit bien sec dans un gros tube effilé t (fig. 736), soutenu horizontalement dans une cuve remplie d'huile, disposée comme celle de la figure 735, de manière que l'extrémité effilée traversât la paroi. Un thermomètre, dont la tige sortait en dehors, était couché à la même hauteur que le tube, et on l'enfonçait de manière que tout le mercure fût dans le bain. Le couvercle de la cuve soutenait, en outre, plusieurs thermomètres verticaux, et laissait passer la tige de plusieurs agitateurs.

Quand la cuve avait atteint à peu près la température à laquelle on voulait

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. II, p. 240.

observer, on fermait toutes les ouvertures du fourneau, la température devenait bientôt stationnaire, on observait les thermomètres, et l'on fermait au chalumeau la pointe effilée du tube à gaz. Quand ce tube était refroidi, on le disposait verticalement, la pointe enfoncée dans du mercure sec (fig. 736), et l'on brisait cette pointe sous le mercure. Ce liquide montait, on mesurait sa hauteur au moyen du cathétomètre, et l'on observait le baromètre. On pesait ensuite le tube avec le mercure introduit, puis le tube rempli de mercure, et enfin ce tube vide. Toutes ces opérations se faisaient dans une chambre dont la température t ne variait pas. On pouvait déduire de ces pesées, le poids P du mercure remplissant l'appareil à t° , et le poids p du mercure qui occuperait le même volume que le gaz à cette température; poids qui sont entre eux comme les volumes occupés par le mercure.



Fig. 736.

Soit H la hauteur du baromètre quand on scelle le tube, H' cette hauteur quand on casse la pointe, et h la hauteur à laquelle s'est alors élevé le mercure dans le tube à gaz, et calculons le volume du gaz à 0° et sous la pression H , en partant successivement des volumes à t° et à T° .

Le volume à t° et sous la pression $H - h$, est représenté par p . Sous la pression H , et à 0° , il serait

$$[\alpha] \quad p \frac{H - h}{H} \frac{1}{1 + at},$$

d'après la loi de Mariotte et la formule [2] (1023), a étant le coefficient du gaz au-dessous de 100° . Le gaz à T° occupait toute la capacité du tube, dont P représente le volume à t° ; ce volume, à T° , était donc $P [1 + K(T - t)]$, K étant le coefficient de dilatation du verre. Si x est le coefficient moyen du gaz entre 0° et T° , son volume à 0° et à la pression H sera $P [1 + K(T - t)] : (1 + xT)$. En égalant cette expression à l'expression $[\alpha]$, il vient, pour obtenir x ,

$$[\beta] \quad p \frac{H - h}{H} \frac{1}{1 + at} = P [1 + K(T - t)] : (1 + xT).$$

Dulong et Petit, après avoir opéré sur l'air au-dessous de 100° , et être arrivés au même coefficient que Gay-Lussac, ont poussé les expériences jusqu'à 300° environ, et ont constaté que : 1^o les dilatations de l'air et du gaz hydrogène sont égales entre -36° et 300° du thermomètre à mercure. Ces deux gaz différant beaucoup par toutes leurs propriétés, Dulong et Petit ont cru pouvoir généraliser; mais comme ils sont permanents, on ne peut rien conclure pour les gaz qui ont été liquéfiés. 2^o Le coefficient de dilatation des gaz va en diminuant à partir de 100° , quand augmentent les températures données par le thermomètre à mercure. Il suit de là que ces températures sont plus élevées que

celles que donne le pyromètre à air. En comparant ces températures, Dulong et Petit ont trouvé les résultats suivants :

Thermomètre à mercure....	100°	150°	200°	250°	300°
Thermomètre à air.....	100	148,7	197,05	244,17	291,77
Différences.....	0	1,3	2,95	5,83	8,23

Pour calculer la température τ qu'indiquerait un thermomètre fondé sur la dilatation de l'air supposée constante, quand le thermomètre à mercure marque T° , on pose $1 + a\tau = 1 + xT$, a étant le coefficient constant de l'air, et x le coefficient moyen entre 0° et T° . On remplace ensuite $1 + xT$ par $1 + a\tau$ dans l'équation, et l'on en tire τ . — D'après les expériences précédentes, le coefficient de l'air serait de $\frac{1}{267}$, et le volume du gaz serait double de ce qu'il est à 0° , à 267° du thermomètre à air.

1027. Méthode du pyromètre. — Dulong et Petit sont arrivés aux mêmes résultats par une seconde méthode : le réservoir V renfermant l'air sec, est soudé à un tube étroit l , qui descend verticalement hors du bain d'huile (*fig. 737*).

Quand la température T , donnée par le thermomètre, est stationnaire, on approche un vase c contenant du mercure sec, de manière que le niveau soit le même en dedans et en dehors du tube l , et l'on note la hauteur H du baromètre. On laisse ensuite refroidir l'appareil jusqu'à la température t de l'air extérieur, et l'on mesure la hauteur h , à laquelle s'élève le mercure dans le tube vertical l , en ayant soin de la

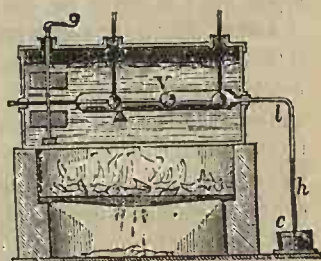


Fig. 737.

corriger de l'effet capillaire. On observe en même temps la hauteur H' du baromètre. Pour déduire de ces données le coefficient moyen de dilatation de l'air entre t° et T° , soit l la longueur du tube, c le rapport de sa capacité à celle du réservoir, dont le volume est V , δ et δ' les densités de l'air à t° et à T° sous la pression H ; le poids de l'air contenu dans l'appareil à T° sera $Vr\delta + V[1 + K(T-t)]\delta' \frac{H}{H'}$, K étant le coefficient de dilatation du verre, et t la température du tube l à partir de la paroi de la caisse. Quand l'appareil est entièrement revenu à t° , l'air possède la pression $H' - h$ et sa densité est $\delta \frac{H' - h}{H}$; son volume est alors $V + Vr \frac{l-h}{l}$; car l'air n'occupe dans le tube que la longueur $l - h$; son poids est donc $V \left(1 + r \frac{l-h}{l} \right) \frac{H' - h}{H} \delta$, et l'on a, en l'égalant à la première expression, et divisant tous les termes par V ,

$$\varrho \delta + [1 + K(T - t)] \varrho' \frac{H}{H'} = \left(1 + r \frac{l-h}{l} \right) \varrho \frac{H' - h}{H};$$

d'où l'on tire la valeur de $\varrho : \varrho'$. Or ces densités, sous la même pression H , sont en raison inverse des volumes d'une même masse d'air aux températures t et T ; on a donc

$$\varrho : \varrho' = (1 + \alpha T) : 1 + \alpha t, \quad \text{ou} \quad \varrho : \varrho' = 1 + \alpha \tau : 1 + \alpha t,$$

d'où l'on tire la valeur du coefficient moyen de dilatation, α , entre 0° et T° ou la valeur de la température τ du thermomètre à air, correspondante à T° du thermomètre à mercure.

Pyromètre à air. — L'appareil (*fig. 737*) constitue un véritable pyromètre à air. Il suffit, pour obtenir la température de l'enceinte dans laquelle il est plongé, de mesurer la hauteur h , et de déduire la valeur de τ du calcul ci-dessus, la masse du gaz restant constante dans l'appareil. C'est un pyromètre de cette espèce que l'on voit en *tm*, dans la figure 727.

1028. NOUVELLES RECHERCHES SUR LA DILATATION DES GAZ. — Le coefficient 0,00375, donné par Gay-Lussac, était adopté de tous, surtout après les expériences de Dulong et Petit, lorsque le physicien suédois Rudberg annonça que ce coefficient était trop fort, et que sa valeur devait être comprise entre 0,00364 et 0,00365. Les expériences furent faites par deux procédés différents, l'un semblable à celui de Dulong et Petit (1026), l'autre fondé sur la mesure des forces élastiques que prend une même masse d'air sous le même volume, à 0° et à 100° !.

Les résultats énoncés par Rudberg ont d'abord été accueillis avec hésitation, tant on avait confiance dans l'habileté de Gay-Lussac et de Dulong. Cependant les expériences de Pouillet, Magnus et M. Regnault ont prouvé que le coefficient 0,00375 est bien réellement trop fort. Indépendamment du défaut de dessiccation parfaite, Magnus et M. Regnault ont reconnu que l'index de mercure éprouve une certaine difficulté à se déplacer, et qu'un peu de gaz peut passer le long de cet index; si bien qu'il arrive souvent qu'il ne revient pas à sa position primitive, quand on ramène l'appareil à 0° . Il était donc nécessaire de reprendre l'étude de la dilatation de l'air, par des méthodes plus précises. C'est ce qu'ont fait, en 1841, Magnus et M. Regnault.

1029. Première méthode de M. Regnault. — M. Regnault, dans une belle série d'expériences, a établi avec une grande précision, au moyen de plusieurs méthodes indépendantes les unes des autres, le coefficient de dilatation de l'air et de divers autres gaz². — La première méthode est semblable à celle que Rudberg a d'abord décrite. L'air est contenu dans un réservoir

¹ Voir l'extrait du travail de Rudberg, *Ann. de ch. et de phys.*, 3^e sér., t. IV, p. 6.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. IV, p. 5.

cylindrique (fig. 738), terminé par un tube capillaire recourbé à angle droit à son extrémité effilée *o*. Ce réservoir est fixé par un bouchon, dans une étuve à ébullition (822). Pour le dessécher et le remplir d'air sec, on y ajuste, au moyen de tubes de caoutchouc

o, o, des tubes recourbés *t, t*, remplis de fragments de pierre ponce imbibés d'acide sulfurique concentré, et communiquant avec une petite pompe pneumatique *P*. Quand l'eau est en ébullition dans l'étuve, on fait le vide dans le réservoir, et l'on y laisse entrer l'air lentement. On répète cette opération une trentaine de fois, et quand

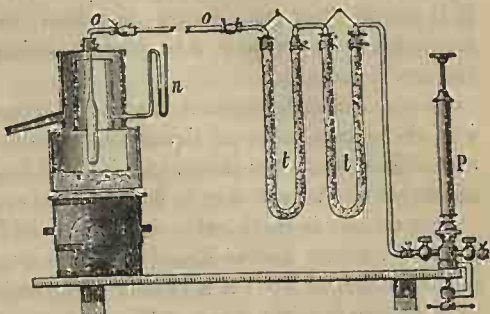


Fig. 738.

le réservoir a été ainsi rempli d'air sec à la pression atmosphérique et à la température *T* de l'eau bouillante, on détache les tubes de caoutchouc *o, o*, et l'on ferme au chalumeau la pointe *o* du réservoir.

Ce réservoir, après qu'il s'est refroidi, est disposé verticalement en *r* sur le support *mpp'* (fig. 739); des tiges à vis le soutiennent sur un plateau circulaire qu'il traverse, et la vis *v* achève de l'assujettir. Le pied *p* soutient une petite cuiller remplie de cire, représentée à part sur une plus grande échelle en *Ac*; elle peut s'élever ou s'abaisser au moyen de la tige *a*, et peut se mouvoir sur le bras *b*, au moyen de la boîte *A*, qui glisse le long de ce bras. Le pied *p'* porte une vis d'affilement *o*, terminée en pointe à ses deux extrémités.

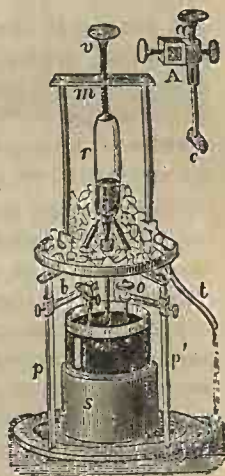


Fig. 739.

Cela posé, on soulève un vase de mercure de manière que la pointe effilée du tube du réservoir *r* plonge de 5 à 6^{cm}, puis on casse la pointe avec une pince, et le mercure monte dans le réservoir. Il peut arriver qu'il se glisse, en ce moment, entre le mercure et le verre, un peu d'air qui est comme aspiré, quand le liquide se précipite dans le tube. Pour éviter cet inconvénient, M. Regnault garnissait la pointe effilée de petits disques de laiton mouillés par le mercure, et versait un peu d'acide sulfurique concentré sur la surface de ce liquide. Après avoir brisé la pointe, on entoure le réservoir *r* de glace fondante, et quand il est parvenu à 0°, on enlève la couche d'acide sulfurique, et l'on amène la pointe inférieure de la vis *o* au niveau du mercure. On

ferme ensuite le tube, en approchant la cuiller c , que l'on fait glisser sur le bras b jusqu'à ce que la pointe du tube s'engage dans la cire. On note en même temps la hauteur H' du baromètre. On enlève ensuite la glace, et quand l'appareil a pris la température ambiante t , on mesure la hauteur du mercure au-dessus de la cuvette. Pour cela, il suffit de relever, au cathétomètre, la distance du niveau dans le réservoir r , à la pointe supérieure de la vis o , et d'ajouter la longueur de cette vis.

On pèse ensuite le réservoir r , avec le mercure qu'il contient; on le remplit, à 0° , de mercure purgé par l'ébullition, et on le pèse de nouveau. On le porte ensuite dans l'étuve à ébullition (*fig. 738*), et l'on recueille le mercure qui sort, afin de calculer le coefficient de dilatation de l'enveloppe de verre (992).

Pour calculer le coefficient x de dilatation de l'air, soit h la hauteur, et P le poids du mercure soulevé dans l'appareil à 0° ; P' le poids du mercure qui le remplit totalement à 0° ; H la hauteur du baromètre au moment où l'on a fermé au chalumeau la pointe effilée, et H' cette hauteur au moment où on l'a bouchée à la cire. Le volume occupé par le gaz sous la pression H et à la température de l'étuve à ébullition ¹, est $(P' - P) (1 + xT) \frac{H' - h}{H}$. Ce volume est aussi celui, $P' (1 + KT)$. de l'appareil dilaté; on a donc

$$(P' - P) (1 + xT) \frac{H' - h}{H} = P' (1 + KT);$$

d'où l'on tire la valeur de x . La moyenne de quatorze expériences a donné 0,0036623, nombre plus fort que celui de Rudberg; ce que M. Regnault attribue à l'air qui peut entrer pendant qu'on brise le tube, et dont Rudberg ne fait pas mention.

1030. Cette méthode a été modifiée de manière que le volume de l'air à 0° et à 100° reste à peu près le même, de sorte que l'effet de la dilatation se trouve représenté presque totalement par un changement de force élastique. L'air est contenu dans un ballon A (*fig. 740*), de 350 à 400 centimètres cubes, soudé à un tube terminé en pointe effilée et courbée, et présentant un renflement cylindrique b bien régulier. Pour jauger cet appareil et déterminer sa dilatation, on le remplit de mercure au moyen d'un gros tube e , qu'on y ajuste avec un petit tube de caoutchouc d . On verse du mercure dans le tube e ; il en entre une certaine quantité dans le ballon, et l'on achève de le remplir en aspirant plusieurs fois en e , soit avec la bouche, soit avec la pompe pneumatique P de la figure 738. On fait ensuite bouillir ce mercure, en plaçant le ballon, A' , sur une grille concave, pendant que la pointe b plonge dans du mercure c , et en employant une foule de précautions, modérant le feu dès que l'ébullition commence, etc. On enveloppe ensuite l'appareil refroidi, d'une couche épaisse

¹ Cette température se déduisait de la pression atmosphérique sous laquelle avait lieu l'ébullition, par un moyen que nous indiquerons en traitant des vapeurs.

de glace fondante, et quand il est parvenu à 0° , ce qui demande plusieurs heures, on le suspend, au moyen d'un petit sac, dans l'étuve à ébullition (fig. 738), on recueille le mercure qui sort, et l'on calcule la dilatation de l'appareil.

On enlève ensuite le mercure, on le remplace par de l'air sec au moyen de la disposition (fig. 738), et l'on opère comme dans la première méthode, en prenant les mêmes données. On place ensuite le ballon sur le support (fig. 741), on brise la pointe effilée, le mercure monte jusqu'à la moitié environ du renflement r , et l'on entoure de glace le ballon, ainsi que le renflement r , au-dessous duquel est fixée une petite capsule c . Quand l'appareil est à 0° , on ferme la pointe avec de la cire, au moyen de la cuiller b , et l'on achève l'expérience comme dans la méthode précédente; seulement, il faut corriger la hauteur h , de l'effet capillaire dans le renflement. La formule

s'établit aussi de la même manière; et l'on a trouvé la moyenne 0,0036633, avec six appareils différents.

1031. Seconde méthode. — Dans cette méthode, employée aussi par Rudberg, le volume du gaz reste tout à fait constant, et la chaleur a pour

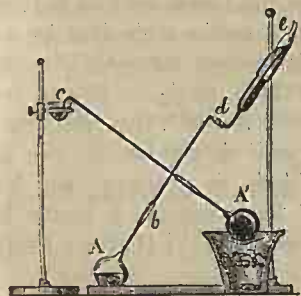


Fig. 740.

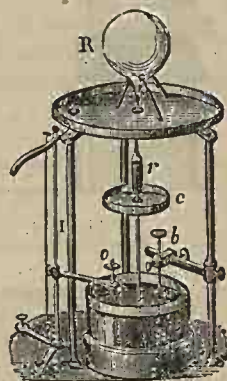


Fig. 741.

effet de changer sa force élastique. M. Regnault a employé deux dispositions différentes dont nous indiquons la meilleure.

Le gaz est introduit, avec les précautions indiquées précédemment, dans un ballon B (fig. 742), de 800 à 1,000 centimètres cubes de capacité, suivi d'un tube capillaire da , par lequel on l'unit, au moyen du caoutchouc a , avec le tube manométrique en siphon $\alpha\beta\gamma$, muni au bas d'un robinet de fer. Le ballon est fixé dans une étuve à ébullition posée sur un trépied de fer P. En a , est une tubulure de cuivre à trois branches, portant un tube p , par lequel on remplit le ballon B, de gaz sec, comme avec l'appareil (fig. 738), pendant que l'eau bout dans l'étuve. On dessèche par le même moyen le manomètre, on y verse du mercure sec, puis on joint les tubes, en a . On fait ensuite écouler du mercure par le robinet du manomètre, jusqu'à ce que le niveau, qui était le même dans les deux branches, arrive à un repère α . On sépare alors l'appareil à dessiccation, on ferme au chalumeau le tube p , et l'on note la hauteur H' du baromètre. On laisse ensuite refroidir le ballon, en retirant le fourneau et faisant écouler l'eau chaude par un robinet latéral (fig. 742); enfin, on entoure le ballon de glace

fondante. En même temps, on fait sortir du mercure du manomètre par son robinet, de manière que le niveau reste en α dans la branche de gauche. Quand la température du ballon est à 0° , on mesure la distance $\alpha\beta = h$ des niveaux dans les deux branches, et l'on observe la hauteur H du baromètre. On avait évalué d'avance le rapport r entre le volume de l'espace dax et celui du ballon B ; la température de cet espace est donnée par le thermomètre t . Le calcul se fait

ensuite comme au n° 1027, en évaluant la masse du gaz, au moyen des densités : seulement le terme $r \frac{l-h}{l}$ est remplacé par r ,

le volume occupé par le gaz étant le même à 0° et à T° ¹.

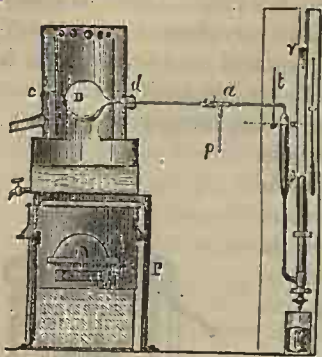


Fig. 742.

1032. Coefficient de dilatation de l'air. — M. Regnault a confirmé que le coefficient de Gay-Lussac est trop fort, et il a trouvé pour coefficient de dilatation de l'air sous la pression atmosphérique, le nombre 0,003665, ou $\frac{4}{273}$. — Magnus est arrivé au même résultat². Il a d'abord employé le procédé de Gay-Lussac, puis la seconde méthode de Rudberg, par les variations de force élastique. Il résulte de

la valeur du coefficient de l'air, que les formules [3] et [7] (1023 et 1024) doivent s'écrire

$$V'' = V' \frac{273 + t''}{273 + t'}, \quad P'' = P' \frac{273 + t''}{273 + t'}.$$

Babinet a remarqué que, si l'on adopte pour coefficient 0,003666, ce nombre revient à $\frac{44}{3000}$ fraction d'un emploi très-commode dans les calculs.

1033. Dilatations sous des pressions variables. — La méthode du n° 1031 peut servir à évaluer la dilatation des gaz sous des pressions différentes de celles de l'atmosphère³. Pour les pressions inférieures, on donne à la branche α du manomètre une longueur de 0,77; et pour les pressions supérieures, on fait le tube γ très-long, et l'on remplace la pompe pneumatique P (fig. 738) par une pompe de compression. Il faut aussi, dans ce dernier cas, pouvoir fermer le tube p (fig. 742), sans faire communiquer le ballon avec l'air extérieur. Pour cela, le tube capillaire p se continue avec un tube un peu plus

¹ Le coefficient de dilatation du ballon n'avait pu être pris directement, l'ébullition d'une aussi grande masse de mercure étant impossible. M. Regnault s'est servi du coefficient d'un ballon plus petit formé du même verre.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. IV, p. 330.

³ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. V, p. 52.

gros *m* (fig. 743), dans lequel on a mis quelques boulettes de mastic, et que l'on fait communiquer en P avec les tubes à dessiccation (fig. 738). On fait d'abord le vide plusieurs fois pour dessécher le ballon, on substitue la pompe foulante à la pompe aspirante, et quand on a comprimé suffisamment l'air, on chauffe le tube *m*. Le mastic fond, s'engage dans le tube capillaire *t* et le ferme exactement, après quoi on sépare en *n* l'appareil à dessiccation. On amène ensuite le niveau au point *a* (fig. 742), et l'on achève comme ci-dessus. M. Regnault a opéré par ce moyen, depuis la pression de 110^{mm} jusqu'à celle de 3655^{mm}, ou 5 atmosphères environ. Les résultats étaient corrigés de l'effet de l'extension du ballon sous l'effort de la pression intérieure. Cette extension avait été mesurée sur le ballon froid, en le remplissant d'eau ainsi qu'une partie de son tube, et en exerçant diverses pressions sur cette eau, au moyen de colonnes de mercure séparées de l'eau par une colonne d'air.



Fig. 743.

M. Regnault a reconnu, par ce moyen, que le coefficient de l'air, augmente avec la pression; comme on le voit par le tableau qui suit :

PRESSION à 0°.	PRESSION à 100°.	DILATATION pour 100°.	PRESSION à 0°.	PRESSION à 100°.	DILATATION pour 100°.
109 ^{mm} ,72	119 ^{mm} ,31	0,36482	760 ^{mm} ,00	"	0,36650
174,36	237,17	0,36513	1678,40	2286,09	0,36760
266,06	395,07	0,36542	2144,48	2924,04	0,36894
375,23	510,97	0,36572	3655,56	4992,09	0,37091

1034. Dilatation des gaz autres que l'air. — Les différentes méthodes que nous avons décrites ont été appliquées par M. Regnault à la mesure des coefficients de dilatation de dix gaz différents. Dans ces nouvelles recherches, ce savant physicien a fait usage principalement de la méthode décrite sous le n° 1030, et de celle du n° 1031. Pour remplir l'appareil, après l'avoir desséché, on introduit le gaz par la tubulure extérieure de la pompe P de l'appareil à dessiccation (fig. 738), on fait le vide et on laisse rentrer du gaz quatre ou cinq fois. On achève ensuite l'expérience comme pour l'air.

M. Regnault a trouvé que les coefficients de dilatation de l'azote, de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone, gaz qui n'ont pu être liquéfiés, sont sensiblement égaux à celui de l'air, sous la pression atmosphérique, ou environ¹. L'acide sulfureux, l'acide carbonique, le protoxyde d'azote, et le cyanogène donnent, dans les mêmes circonstances, un coefficient un peu plus fort, et qui va jusqu'à

¹ Les expériences sur le-gaz oxygène n'ont pas donné de résultats concordants; une petite quantité de ce gaz étant absorbée par le mercure, même dans un temps assez court.

0,0038453 pour l'acide sulfureux. Cette plus grande dilatabilité vient probablement de ce que, à 0°, ces gaz sont assez près de leur point de liquéfaction.

On voit donc que la loi de l'égalité du coefficient des gaz doit être restreinte aux gaz permanents. Des expériences faites sur l'acide sulfureux et l'acide carbonique, ont montré aussi que leur dilatation augmente avec la pression. Il est probable qu'il en est de même des autres gaz qui ne suivent pas la loi de Mariotte.

Pour mettre en évidence la différence des coefficients de certains gaz, M. Regnault a disposé une espèce de thermomètre différentiel composé de deux ballons égaux, placés dans une même étuve à ébullition, semblable à celle de la



Fig. 744.

figure 742. Les tubes capillaires qui surmontent ces ballons aboutissent en B et B' (fig. 744) aux branches latérales d'un double manomètre Bhh'B'. L'un des ballons étant rempli d'air, et l'autre du gaz qu'on veut lui comparer, on les entoure de glace fondante, et le mercure étant ramené à un même repère oo, on scelle les tubes p (fig. 742). Si l'on porte alors les deux ballons à la température de l'ébullition de l'eau, et si l'on amène le mercure au repère o dans le tube à air, ce liquide s'arrête plus bas, en β, dans l'autre tube, s'il contient un gaz qui se dilate plus que l'air.

1035. Dilatation sous pression constante. — Dans les expériences que nous venons de décrire, la dilatation des gaz se calcule indirectement; on la déduit de l'augmentation de force élastique que le gaz éprouve par la chaleur quand on le ramène à un volume constant, en s'appuyant sur la loi de Mariotte. Cette loi n'étant



Fig. 745.

pas exacte pour la plupart des gaz, il était nécessaire de vérifier les résultats précédents, en ne considérant que les variations de volume des gaz, sans changement de pression. C'est ce qu'a fait M. Regnault par le procédé suivant ¹.

Le gaz est renfermé dans l'appareil (fig. 742), et le manomètre est remplacé par les tubes de la figure 745. Les dimensions du tube $\frac{1}{2}rr'$ sont telles que, la différence de niveau étant toujours sensiblement la même dans les deux branches, le mercure arrive au niveau α, quand le ballon est à 0°, et en β, quand il est à la température de l'ébullition. On obtient une différence de niveau constante dans les deux branches pendant l'échauffement du gaz, en faisant écouler du mercure par le robinet r. Un second robinet à trois voies r, représenté à part en R' sert à faire sortir du mercure du tube ar', pendant qu'il est séparé du tube IIr, pour jauger l'espace ax et la capacité aβ. Les tubes sont plongés dans de l'eau conti-

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. V, p. 68.

nuellement remuée par l'agitateur oo' et contenue dans une caisse, dont deux faces sont formées par des glaces. Voici comment on opère : quand le ballon est entouré de glace fondante, on amène le mercure au niveau α dans le tube ar' , le robinet r' étant tourné de manière à faire communiquer les deux branches; on ferme alors à la lampe le tube p (fig. 742) ou bien on fond le mastic du tube m (fig. 743), si la pression dépasse celle de l'atmosphère. Le ballon étant ensuite porté à la température de l'eau bouillante, on fait écouler du mercure, de manière que le niveau vienne en β , et alors la pression du gaz est sensiblement la même qu'à 0° . On mesure avec soin la petite différence qui peut rester.

Pour calculer la dilatation d'après cette expérience, soit v le volume αz , v' le volume $\alpha\beta$, et V la capacité du ballon. Soit encore H et H' les hauteurs du baromètre, et h et h' les différences de hauteur du mercure dans les deux branches, quand le niveau est en α , puis en β dans la branche ar' . Enfin représentons par δ , δ' , δ'' les densités du gaz à 0° , T° et t° . Si nous calculons la masse du gaz renfermé dans l'appareil, en partant successivement des volumes qu'il occupe quand le ballon est à 0° et quand il est à T° , et si nous égalons ces deux valeurs, nous aurons

$$[V(1 + kT)\delta' + v'\delta''](H' + h') = (V\delta + v\delta'')(H + h).$$

Or on a $\delta' = \delta : (1 + \alpha T)$, et $\delta'' = \delta : (1 + \alpha t)$. L'égalité devient donc

$$\left(V \frac{1 + kT}{1 + \alpha T} + v' \frac{1}{1 + \alpha t} \right) (H' + h') = \left(V + v \frac{1}{1 + \alpha t} \right) (H + h);$$

d'où l'on tire la valeur de $1 + \alpha T$. Comme en procédant ainsi, α entre dans le second membre, on emploie la méthode des approximations successives en regardant d'abord v comme nul, plutôt que de tirer α , ce qui serait compliqué.

Voici les résultats trouvés par M. Regnault par cette dernière méthode, et par la méthode dans laquelle la pression est variable :

GAZ	DILATATIONS POUR 100° sous la pression de 760^{mm}		DILATATIONS sous de fortes pressions.	
	Sous pression constante.	sous volume constant.	Dilatation pour 100° sous pression constante.	Pression à 0° .
Air	0,3670	0,3665	0,36944	2525 ^{mm}
Azote	»	0,3668	»	»
Hydrogène	0,3661	0,3667	0,36616	2546
Oxyde de carbone	0,3669	0,3667	»	»
Acide carbonique	0,3710	0,3688	0,38455	2522
Protoxyde d'azote	0,3719	0,3676	»	»
Acide sulfureux	0,3903	0,3845	0,39800	983
Cyanogène	0,3877	0,3829	»	»

1036. Conclusions. — On peut conclure des recherches que nous venons d'exposer, et des résultats consignés dans le tableau ci-dessus, que :

1° Les coefficients de dilatation des gaz qui ont pu être liquéfiés diffèrent notablement les uns des autres; les gaz qui n'ont pu être liquéfiés ont des coefficients sensiblement égaux sous la pression atmosphérique.

2° Le coefficient de dilatation *sous pression constante* est plus grand que celui que l'on déduit, par le calcul, des changements de force élastique que subit un même volume de gaz porté de 0° à 100°; la différence est la plus marquée chez les gaz faciles à liquéfier, qui cèdent beaucoup plus à la compression que ne l'indique la loi de Mariotte. Ce résultat s'explique bien, puisque, dans la méthode que l'on emploie, ils sont plus comprimés à 100° qu'à 0°, d'où il résulte qu'une partie de l'effet de la dilatation est déguisée par la trop grande compressibilité. Le gaz hydrogène ne présente pas cette différence; c'est qu'il s'écarte de la loi de Mariotte en sens inverse des autres gaz (I, 381).

3° Le coefficient de dilatation des gaz, *sauf l'hydrogène*, augmente avec la pression, et d'autant plus qu'ils s'écartent davantage de la loi de Mariotte; de sorte que *les différences* entre les coefficients des divers gaz sont d'autant plus grandes, que la pression est plus forte; d'où il résulte que :

4° Les coefficients de dilatation des gaz diffèrent d'autant moins, que leurs pressions sont plus faibles. La loi qui dit que *tous les gaz ont le même coefficient de dilatation*, peut donc être considérée comme une *loi limite*, qui s'approche d'autant plus d'être exacte que les gaz sont moins comprimés, et par conséquent plus éloignés de leur point de liquéfaction. Pour les gaz permanents, qui s'écartent à peine de la loi de Mariotte, on peut regarder l'égalité des dilatations comme exacte sous la pression atmosphérique. Remarquons, du reste, que les différences entre les *coefficients* de tous les gaz étudiés n'affectent jamais que la quatrième décimale, et de trois unités au plus; on peut donc dire que les coefficients de tous les gaz sont égaux à 0,0036, à moins de 3 dix-millièmes; et l'on pourra, à moins qu'on n'ait besoin d'une très-grande précision, se servir des formules des dilatations, en mettant à la place du coefficient le nombre qui correspond au gaz considéré, soit sous pression constante, soit sous volume constant.

1037. Depuis les expériences de M. Regnault, M. Amagat a étudié la dilatation, à différentes températures et sous pression constante, de l'*acide carbonique* et de l'*acide sulfureux*¹, au moyen d'un appareil double analogue à celui qui lui a servi dans ses recherches sur la loi de Mariotte (I, 383, fig. 299). Après avoir rempli un des réservoirs d'air sec, et l'autre du gaz qu'on veut lui comparer, et les avoir portés à une température connue, on ferme des robinets d'acier adaptés aux tubes surmontant les réservoirs, et on les renverse après le refroidissement, dans une cuve à mercure. On ouvre les robinets, et le mercure monte dans les réservoirs, que l'on enfonce de manière que le niveau soit le

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIX, pp. 247, 283.

même en dedans et en dehors. Sur le mercure de la cuve, est de l'eau qu'on agite, qui donne aux réservoirs une température connue. On consulte le baromètre, et l'on achève l'opération par des pesées, comme dans la méthode ci-dessus (1029).

Ces expériences, poussées jusqu'à 250°, ont confirmé la diminution avec l'augmentation de température, du coefficient de dilatation de l'acide sulfureux et de l'acide carbonique. Par exemple, à 50°, les coefficients ont été 0,003846, et 0,003704; et à 250°, 0,003685 et 0,003682.

Des expériences faites par M. Amagat, au moyen du même appareil, sur l'air et l'acide sulfureux, *humides, mais introduits dans des réservoirs secs*, ont montré que l'humidité augmente la dilatation du gaz beaucoup moins qu'on ne le croyait. La plus grande partie de l'effet produit ordinairement par l'humidité, est donc due à celle qui adhère aux parois des vases. Pour l'acide sulfureux humide introduit dans un vase sec, le coefficient a été 0,003895, entre 10° et 110°; tandis que le gaz sec a donné 0,003863, entre 10° et 100°.

II. Comparaison des thermomètres. — Pyromètre à air.

1038. Nous avons vu que des thermomètres construits avec différents corps solides, liquides ou gazeux n'indiquent pas toujours le même nombre de degrés, quand on les plonge dans le même milieu (847, 994). Jusqu'à 100°, l'accord existe sensiblement; mais au delà, les écarts se manifestent et vont en croissant. Quelle est la substance qui donne les meilleures indications, c'est-à-dire s'approchant le plus d'être proportionnelles aux quantités de chaleur introduites dans l'instrument? Telle est la question qui va nous occuper.

Dans les solides et les liquides, l'équilibre des molécules dépend des actions combinées de la cohésion, et de la force répulsive qu'augmente la chaleur pour produire la dilatation. La cohésion variant avec la distance et la nature des molécules, on conçoit que les quantités dont celles-ci s'écarteront pour une même addition de chaleur, seront différentes pour les divers corps, et pour une même substance quand la température d'où l'on partira, et par suite la distance des molécules, sera différente. Dans les gaz permanents, qui suivent la loi de Mariotte, la cohésion ne se fait sentir que très-faiblement, comme l'atteste aussi l'égalité entre leurs coefficients de dilatation, égalité qui montre que la nature et la masse des molécules n'a plus que très-peu d'influence. On doit donc penser que ces gaz sont les corps les plus favorables à une bonne évaluation des températures, opinion qui a été généralement adoptée après que Dulong et Petit eurent constaté la persistance de l'égalité des coefficients de l'air et de l'hydrogène jusqu'à 300° (1026). Ce qui a encore affermi dans cette manière de voir, c'est que les expériences de Dulong et Petit sur le refroidissement, ne conduisent à des lois simples qu'autant que les températures sont exprimées au moyen de la dilatation de l'air supposée constante. Les expériences de M. Regnault ont bien montré que les gaz sont d'autant plus dilatables qu'ils sont

plus comprimés; ce qui prouve, comme l'inexactitude de la loi de Mariotte, l'influence de la cohésion; mais cette influence est très-petite pour les gaz permanents. L'hydrogène fait exception; quelle que soit sa pression, il se dilate toujours également, ce qui rend très-probable que sa dilatation pour 1° reste constante à toutes les températures, et qu'il formerait un thermomètre comparable à lui-même, aux températures les plus élevées. L'air est un gaz bien plus commode à employer que l'hydrogène; si donc il arrive que deux thermomètres semblables, l'un rempli d'air, l'autre d'hydrogène, et gradués séparément entre 0° et 100°, marchent d'accord pour les plus hautes températures, on en pourra conclure que le *pyromètre à air* offre les mêmes avantages que le *pyromètre à hydrogène*, du moins dans les limites où la comparaison aura été faite.

1039. Comparaison des thermomètres remplis de différents gaz.

— M. Regnault a procédé de la manière suivante : les deux gaz sont renfermés dans deux ballons BB' (fig. 746), plongés dans un même bain d'huile muni d'un agitateur c'ce. Chacun des ballons communique avec un manomètre nb, n'b', au moyen d'un tube capillaire ab, a'b'. On dessèche et l'on remplit les ballons, en suivant la méthode déjà indiquée (1031) par les petits tubes p, p' que l'on ferme ensuite. Deux thermomètres à poids sont placés à côté des ballons. Ces derniers étant entourés de glace fondante, on met du mercure dans les manomètres, de manière que les niveaux arrivent aux repères α , α' , et l'on note la hauteur du baromètre; ainsi que la différence

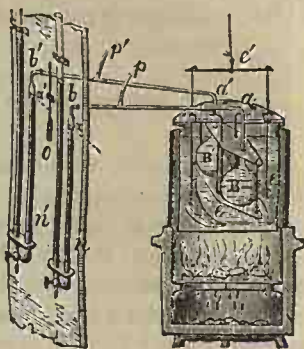


Fig. 746.

de niveau dans les deux branches des manomètres. Ayant porté ensuite les ballons à une température élevée, on verse du mercure de manière à ramener les niveaux aux repères α , α' , on consulte le baromètre, et l'on observe simultanément les quatre niveaux des tubes des manomètres, au moyen de quatre cathétomètres installés en avant. Soit V le volume du ballon B à 0°, v et v' les volumes bz et bu, y compris l'appendice p; t la température indiquée par le thermomètre o, et t' celle qui est donnée par un thermomètre placé entre p et p'; H, H' les pressions que supporte le gaz à 0° et à la température τ du thermomètre à gaz; δ la densité du gaz à 0° et sous la pression de 760mm, et enfin α le coefficient de dilatation du gaz, supposé constant à toute température. La valeur de τ sera donnée par l'équation suivante, dont les deux membres représentent la masse du gaz, calculée successivement en partant de la pression à 0°, et de celle qu'on observe quand la température est τ :

$$\left(V + \frac{v}{1 + \alpha t} + \frac{v'}{1 + \alpha t'} \right) \delta \frac{H}{760} = \left(V \frac{1 + K\tau}{1 + \alpha\tau} + \frac{v}{1 + \alpha t} + \frac{v'}{1 + \alpha t'} \right) \delta \frac{H'}{760}.$$

On aura, pour l'autre ballon, une équation semblable, et l'on comparera les valeurs de τ tirées des deux équations.

M. Regnault a trouvé ainsi, que les thermomètres à air et à gaz hydrogène sont d'accord de 0° à 325° maximum de température des expériences. Dans le protoxyde d'azote liquide, le premier marquant $-87^{\circ},67$, le thermomètre à hydrogène donne $-87^{\circ},47$. L'acide carbonique donne sensiblement le même résultat, mais un thermomètre rempli d'acide sulfureux est en retard sur le thermomètre à air, à partir de 100°. Le coefficient de dilatation de l'acide sulfureux va donc en diminuant quand la température indiquée par le thermomètre à air va en augmentant.

Des expériences comparatives faites sur l'air différemment condensé ont prouvé que deux thermomètres remplis d'air à des pressions initiales différentes, sont toujours d'accord. La comparaison a été faite jusqu'à 350° environ, la pression variant de 438^{mm} à 1486^{mm} dans un des ballons, pendant qu'elle était à peu près de 760^{mm} dans l'autre.

10.10. Pyromètre à air. — Chacun des ballons (fig. 746) accompagné de son manomètre, constitue un *pyromètre à air* d'un usage plus commode que celui de Dulong et Petit. La figure 747 représente la disposition que lui donne M. Regnault. En B, est le réservoir à air plongé dans le milieu dont on veut évaluer la température. On observe la pression H' du gaz, on confond les volumes v et v' en un seul ayant la température ambiante t , et l'équation ci-dessus devient

$$\left(v + \frac{v}{1 + \alpha t}\right) H = \left(v \frac{1 + K\tau}{1 + \alpha\tau} + \frac{v}{1 + \alpha t}\right) H' [a]$$

en divisant de chaque côté par $\partial : 760$; d'où l'on tirera la valeur de τ , par la méthode des corrections successives.

C'est un appareil semblable que M. Regnault a employé dans ses expériences sur la dilatation absolue du mercure (1009); le réservoir était formé d'un long tube de verre. Dans le cas des températures très-élevées, on peut craindre que l'appareil n'augmente de capacité sous les fortes pressions qu'il supporte; c'est pourquoi on le remplit à 0° d'air raréfié, ce qui n'en change pas la marche, d'après ce que nous venons de voir. Quand la chaleur est assez forte pour ramollir le verre, on fait le réservoir en porcelaine, le platine devant être rejeté (847).

Il y a deux manières d'évaluer les températures au moyen de la dilatation de l'air. L'une consiste, comme nous l'avons expliqué, à observer les changements de pression sous le même volume, l'autre à observer les variations de volume de l'air sous pression constante (1035). Cette dernière méthode a été employée par Pouillet dès 1827, dans la construction de son pyromètre à air. M. Regnault préfère la première méthode, parce que, avec l'autre, il ne reste qu'une faible masse d'air dans le réservoir, lors des hautes températures; de sorte qu'un

nouvel accroissement de chaleur n'en faisant plus sortir qu'une très-petite quantité, la sensibilité de l'appareil va en diminuant.

1041. Comparaison des thermomètres à air et à mercure. — Les tables données par Dulong et Petit, pour passer des indications du thermomètre à mercure à celles du thermomètre à air, ne sont pas exactes, puisqu'elles ont été calculées avec une valeur trop forte du coefficient de l'air. M. Regnault a construit de nouvelles tables au moyen de l'appareil (*fig. 747*). Il a opéré entre autres dans les vapeurs d'essence de térébenthine et de mercure en ébullition. Ces liquides étaient mis dans une chaudière C fermée en dessus, contenant des thermomètres à poids et le réservoir d'air B. On se débarrassait des vapeurs en les conduisant par un tuyau, dans un réfrigérant où elles se condensaient. C'est dans le cours de ces expériences que M. Regnault a reconnu l'influence de la nature du verre sur les indications du thermomètre à mercure (829). Nous avons donné plus haut (847) le tableau comparatif des indications du thermomètre à air et des thermomètres à mercure fabriqués avec les deux espèces de verre ordinairement employés en France.

1042. Pyromètre à air de M. Berthelot¹.

— Les pyromètres à air que nous avons décrits ne peuvent être introduits que dans des espaces relativement grands, ils occupent beaucoup de place et exigent des calculs assez compliqués. L'instrument que nous allons décrire ne présente pas ces divers inconvénients. Le réservoir, R (*fig. 748*), en verre quand on ne veut pas dépasser 500°, se continue avec un tube très-capillaire et bien calibré *hta*, soudé à une boule B ouverte en *o*, contenant du mercure, et assez grosse pour que le niveau n'y varie pas sensiblement quand le mercure monte ou baisse dans le tube capillaire. Ce système s'appuie, par la partie horizontale *ht*, sur une coulisse *e* soudée à un pied très-lourd *cp*. Contre la partie verticale du tube

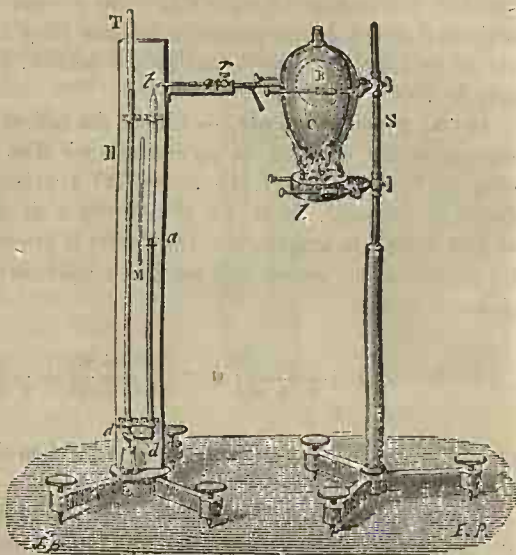


Fig. 747.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XIII, p. 444; et XV, p. 413.

est appliquée une règle portant deux divisions : l'une *mn* en millimètres, l'autre *l* donnant les degrés de température. Cette règle, guidée dans une rainure fixe *r*, peut glisser le long du tube *ta*, quand on desserre les vis de deux pattes *p*, *p*.

On commence par dessécher l'intérieur de l'appareil, en pompant l'air par l'extrémité inférieure effilée et non encore fermée du réservoir R, pendant qu'on chauffe avec une flamme d'alcool successivement la boule B et le tube *ath* R; après quoi on scelle à la lampe l'extrémité effilée, et l'on verse du mercure en B. On aspire ensuite en *o* de manière à faire sortir un peu de l'air sec qui remplit l'appareil, et en quantité telle que le mercure s'élève dans le tube capillaire, quand on plonge le réservoir R dans la glace fondante, d'un nombre de millimètres égal à peu près au nombre de degrés de la température ambiante.

Pour établir la graduation, on marque sur l'échelle *l*, 4 températures fixes, qui sont 0°, 100°, 360° et 440°; les deux dernières, en plongeant la partie *hR* dans du mercure et dans du soufre en ébullition, et en ayant soin de marquer les quatre points fixes sous une même pression barométrique. On construit ensuite la courbe de ces 4 températures, que l'on porte sur l'axe des abscisses en prenant pour ordonnées les nombres de millimètres de l'échelle *mn* qui leur correspondent; on prolonge cette courbe jusqu'à 500° d'un côté, et jusqu'à — 100°, de l'autre, et ses ordonnées font connaître en millimètres les divers degrés, que l'on marque ensuite sur l'échelle *l*. La position des points fixes dépend évidemment de la pression extérieure au moment où on les marque; mais leurs distances relatives restant les mêmes, il suffira, avant de faire usage de l'instrument, de plonger le réservoir R dans la glace fondante, et de faire glisser la règle, de manière à amener le point 0° marqué sur l'échelle, vis-à-vis du niveau du mercure dans le tube *ta*. Il faudra en agir ainsi toutes les fois que la pression atmosphérique changera; mais une fois cela fait, la température sera donnée par une simple lecture, en ayant soin de faire céder l'adhérence capillaire par de légers chocs.

L'instrument donne les températures les plus élevées avec une erreur de moins de 2 ou 3°. En faisant le réservoir en argent, prolongé par étirage en un tube que l'on réunit à un tube capillaire de verre de même diamètre intérieur, on peut aller jusqu'à 1000°. Dans ce cas, les points fixes sont 100°, 360°, 440°, et 860° obtenu par l'ébullition du cadmium. Il faut préserver le réservoir d'argent par une enveloppe convenable, du contact des métaux et des vapeurs qui pourraient l'attaquer.

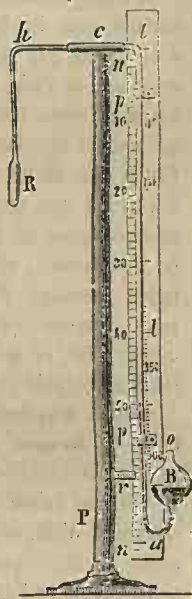


Fig. 718. — 1/12.

III. Mesure de la densité des gaz.

1043. Définition. — La densité des gaz varie dans des proportions considérables quand leur température et leur pression changent. De plus, cette densité étant très-faible par rapport à l'eau, on a coutume de la rapporter à celle de l'air prise pour unité. Il est ensuite facile d'obtenir le poids spécifique des mêmes gaz par rapport à l'eau, en multipliant leur densité par rapport à l'air, par le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau (I, 215).

Les gaz permanents obéissant à la loi de Mariotte et se dilatant également, surtout pour les faibles variations de l'atmosphère, on peut définir la densité d'un de ces gaz par rapport à l'air : *le rapport entre le poids de volumes égaux de ce gaz et d'air, sous la même pression et à la même température, quelles que soient du reste cette pression et cette température.* Il en est de même des gaz qui ont pu être liquéfiés, si l'on a soin de les comparer à l'air, à une température assez éloignée de leur point de liquéfaction, et sous une faible pression. Du reste, nous verrons qu'on peut opérer à 0° , ce qui est toujours préférable (1048).

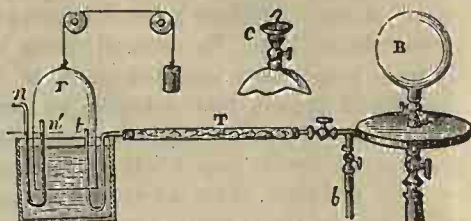


Fig. 749.

1044. Expériences de Biot et Arago. — Pour mesurer la densité d'un gaz,

on pèse un ballon de verre à robinet, successivement vide, rempli de ce gaz, et rempli d'air, ce qui présente de nombreuses difficultés dans la pratique, à cause du faible poids des gaz, et de la nécessité de les ramener à la même température et à la même pression. Voici comment ont procédé Biot et Arago : on fait le vide dans le ballon B (fig. 749) et l'on fait rentrer, par le robinet latéral de la machine pneumatique, de l'air desséché par son passage à travers le tube T rempli de fragments de chlorure de calcium; on répète plusieurs fois cette opération de manière à bien dessécher le ballon. On fait le vide une dernière fois, on observe la hauteur h du mercure dans l'éprouvette de la machine pneumatique, on ferme le ballon et on le pèse. Pour cela, on le suspend directement au fléau de la balance, après y avoir vissé une coupe c munie d'un crochet. On le remet ensuite sur la machine pneumatique, et l'on y laisse entrer de l'air desséché, sous la pression, H , du baromètre; puis on pèse le ballon. Soit p le poids obtenu, et π celui du ballon vide; $p - \pi$ sera le poids de l'air introduit, à la température t de l'expérience, et sous la pression H diminuée de celle, h , qui restait dans le ballon vide.

On remplit ensuite le ballon, du gaz dont on veut la densité, gaz recueilli d'avance dans un gazomètre r . On fait le vide dans le ballon et l'on y laisse entrer le gaz par le tube t et le tube T, dans lequel il se dessèche. On répète plusieurs fois ces deux opérations de manière à enlever le peu d'air qui restait dans le ballon, on fait une dernière fois le vide, en observant la hauteur h' du mercure dans l'éprouvette, et l'on mesure le poids π' du ballon. On le remplit enfin de gaz sec, sous la pression atmosphérique H' ; le tube à eau nn' indiquant si la pression dans le gazomètre est bien égale à celle de l'atmosphère. On prend ensuite le poids p' du ballon plein de gaz. Le poids du gaz seul $p' - \pi'$ ramené à la pression 760^{mm} et à la température 0°, sera, en appelant V le volume du ballon à 0°, et t' la température quand on a pesé le gaz,

$$(p' - \pi') \frac{760}{H' - h'} \cdot \frac{273 + t'}{273} \cdot \frac{1}{(1 + Kt')},$$

K étant le coefficient de dilatation du verre, et $\frac{1}{273}$ celui du gaz. On calcule de même ce que serait le poids de l'air à 0° et sous la pression 760^{mm}; et, en divisant ces deux résultats l'un par l'autre, on a pour la densité du gaz par rapport à l'air,

$$D = \frac{p' - \pi'}{p - \pi} \cdot \frac{H - h}{H' - h'} \cdot \frac{273 + t'}{273 + t} \cdot \frac{1 + Kt}{1 + Kt'}$$

On voit qu'il n'est pas nécessaire de connaître la capacité du ballon.

1045. Cas où le gaz attaque les métaux. — Il y a des gaz qui attaquent le métal des robinets, par exemple le chlore. Dans ce cas, on pourrait employer un robinet de platine, mais on peut se passer de robinet, de la manière suivante : On prend un flacon à bouchon de verre, dont on détermine la capacité (I, 230), ce qui suppose connue la densité, que nous allons apprendre à déterminer, de l'air par rapport à l'eau. On fait ensuite arriver le gaz sec par un tube qui va jusqu'au fond du flacon, droit ou renversé, suivant que le gaz est plus dense ou moins dense que l'air. Le gaz refoule l'air qui remplit le flacon, et, en en laissant perdre une certaine quantité, on est certain qu'il ne reste plus ni air ni humidité dans le flacon. On retire alors doucement le tube, pendant que le gaz continue à entrer, et l'on ferme le flacon avec son bouchon de verre. Soit p' le poids du flacon rempli de gaz, p son poids quand il a été rempli d'air sec par le même moyen; $p' - p$ sera la différence entre le poids du gaz et le poids d'un égal volume d'air, le poids du verre disparaissant, et en ajoutant à $p' - p$ le poids de l'air qui remplit le flacon, on aura le poids du gaz. Or, si V est la capacité du flacon à 0°, t sa température et H la hauteur du baromètre au moment de l'expérience; α la densité de l'air à 0° et sous la pression de 760^{mm} par rapport à l'eau à 4°, le poids a de l'air contenu dans le flacon sera

$$a = V \cdot \alpha \frac{H}{760} \frac{273}{273 + t}; \quad \text{et la densité du gaz sera } \frac{p' - p + a}{a}$$

1046. Poids spécifique de l'air. — Pour avoir la densité d'un gaz par rapport à l'eau à 4°, il faut multiplier sa densité par rapport à l'air, par la densité par rapport à l'eau, de l'air pris à 0° et sous la pression de 760^{mm}. Pour obtenir ce dernier terme, on détermine le poids

$$A = (p - \pi) \frac{760}{H - h} \cdot \frac{273 + t}{273} \cdot \frac{1}{1 + kt}$$

de l'air sec qui remplit un ballon à robinet, à 0° et sous la pression 760^{mm}. On pèse ensuite ce ballon rempli d'eau distillée. Soit P le poids obtenu, t' la température, π le poids du ballon vide, et δ la dilatation de l'eau, de 4° à t' °; on aura $E = (P - \pi) \frac{1 + \delta}{1 + kt'}$, pour le poids de l'eau à 4° qui remplirait le ballon présentant la capacité qu'il possède à 0°; et A : E sera le poids spécifique cherché. Biot et Arago avaient trouvé par ce moyen le nombre 0,0013, qui est un peu trop fort.

M. Regnault a repris ces expériences, en prenant une multitude de précautions nouvelles. Après avoir déterminé le poids p du ballon ouvert, il y fit bouillir un peu d'eau pour chasser tout l'air, et ferma le robinet. Il mit ensuite le ballon en communication avec un vase plein d'eau bouillante et bien purgée d'air, au moyen d'un tube plongeant jusqu'au fond de l'eau bouillante; il ouvrit peu à peu le robinet, et l'eau bouillante remplit le ballon sans se mêler à l'air. Le tube fut ensuite remplacé par un tube à boule, contenant de l'eau bouillie, pour maintenir le ballon plein pendant son refroidissement dans la glace fondante. Quand la température du ballon eut atteint 0°, son robinet fut fermé, on le plongea dans une grande masse d'eau à la température ambiante, puis on le pesa. La différence entre le poids obtenu p et celui du ballon plein d'air, représentait le poids P de l'eau remplissant le ballon à 0°, diminué de celui de l'air qui le remplissait à la même température. En ajoutant donc à P ce poids d'air à 0° mesuré avec soin, on eut le poids de l'eau, et le ballon renfermait autant de centimètres cubes qu'il y avait de grammes dans ce poids d'eau ramenée à 4°.

M. Regnault a trouvé ainsi 1,293187, pour le poids spécifique par rapport à l'eau, de l'air à 0° et sous la pression de 760^{mm}, et, par conséquent, 1^{er},293187, pour le poids d'un litre d'air dans les mêmes conditions.

Le rapport entre les poids de volumes égaux de mercure et d'air, est donc 10513,5; le poids spécifique du mercure étant 13,596.

1047. Expériences de MM. Dumas et Boussingault. — Dans un remarquable Mémoire sur la composition de l'air¹, MM. Dumas et Boussingault ont mesuré la densité de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote, en perfectionnant beaucoup les méthodes employées habituellement. Le gaz, au lieu d'être recueilli d'avance dans un gazomètre, où il se mêle avec les gaz dissous dans l'eau, était introduit dans le ballon, à mesure qu'il se produisait, et après avoir traversé des

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. III, p. 268.

tubes en U destinés, les uns à le purifier, les autres à le dessécher. On faisait le vide et l'on remplissait plusieurs fois le ballon de gaz; et, enfin, on laissait le ballon plein, sous la pression exacte du baromètre.

Le ballon était renfermé dans une cave artificielle formée d'un grand vase cylindrique de zinc à double enveloppe, avec couvercle creux *cc* (fig. 750), les espaces intermédiaires étant remplis d'eau, dont la température était connue au moyen de plusieurs thermomètres *t, t'*. La température du gaz dans le ballon était donnée par un thermomètre *T* qui y était suspendu, et dont le niveau s'observait dans un tube surmontant le col du ballon; ce qui est bien plus exact que de prendre la température de l'air environnant.

Pour peser le ballon, on le suspendait dans une armoire doublée de plomb (fig. 751), desséchée par une couche de chaux vive *c*. Les portes de l'armoire étant fermées, le ballon était soustrait à tous les rayonnements extérieurs, notamment à l'influence calorifique de l'opérateur. Avant d'effectuer une pesée, on attendait que le ballon eût pris la température de l'armoire, donnée par un thermomètre intérieur, puis on l'essayait avec soin¹.

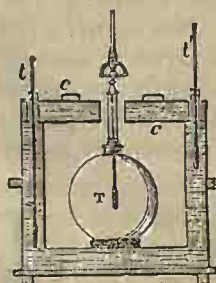


Fig. 750.

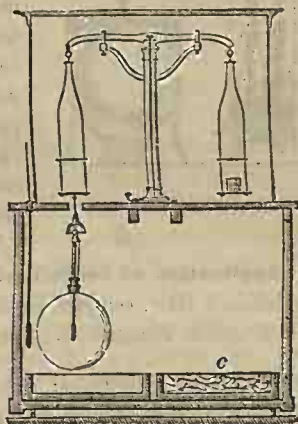


Fig. 751.

1048. Expériences de M. Regnault.
— Dans la méthode perfectionnée dont nous venons de parler, il y a encore quelques incertitudes provenant de la couche d'humidité en proportion variable qui adhère extérieurement au verre, et de la perte de poids du ballon dans l'air, laquelle varie avec la pression et la température de l'atmosphère. M. Regnault évite ces incertitudes en faisant équilibre au ballon plein de gaz, avec un autre ballon de même volume fabriqué avec le même verre; les deux ballons éprouvent les mêmes pertes, et M. Regnault a vu l'équilibre se maintenir pendant quinze jours, malgré les changements de température, de pression et d'humidité de l'atmosphère.

Pour éviter les corrections relatives aux dilatations, le ballon qui contient le gaz est entouré de glace fondante (fig. 752); on y fait le vide, on le remplit de

¹ En essayant le ballon avec un linge sec, on le charge d'électricité. Il faut attendre que cette électricité se soit dissipée, car elle apporterait des erreurs dans les pesées, en réagissant sur les corps environnants.

gaz sous la pression atmosphérique, puis on le lave, on l'essuie et on le suspend à la balance dans une armoire semblable à celle de la figure 751, et l'on attend, pour le peser, qu'il en ait pris la température.

Pour mesurer la pression dans le ballon, après y avoir fait le vide, M. Regnault se servait du *manomètre barométrique* *bVt* (fig. 752). Dans la cuvette plonge le tube *tt'*, qui communique par sa partie supérieure avec le ballon, au moyen d'un tube de plomb *ta*, qui porte une tubulure à trois branches *a*, dont l'appendice *m* communique avec la machine pneumatique. On mesure au cathétomètre la différence de niveau $\alpha\beta = h$, puis la hauteur *H* du baromètre *bb*, en se servant de la vis d'affleurement *V*.

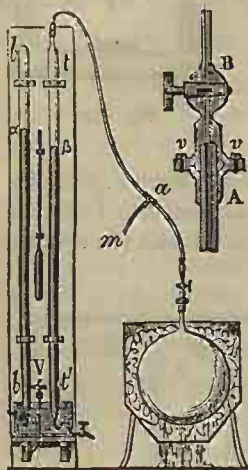


Fig. 752.

1049. Densité des gaz à 100°. — M. Regnault a aussi comparé les densités de plusieurs gaz à 100°. Pour que la monture du robinet du ballon puisse supporter cette température, elle se compose de deux pièces *A*, *B* (fig. 752), réunies par des vis *v*, *v*, et entre lesquelles on a mis un bourrelet de chanvre imprégné d'un mastic gras formé de céruse et de minium broyés avec de l'huile de lin, que la chaleur fait durcir. Le ballon est suspendu dans un grand vase de tôle, muni d'un couvercle, au fond duquel on fait bouillir de l'eau dont la vapeur l'enveloppe de tous côtés. — On pouvait prévoir que les gaz qui se dilatent plus que l'air auraient une densité, par rapport à ce gaz, moindre à 100° qu'à 0°; c'est, en effet, ce qui a lieu; par exemple, l'acide carbonique a pour densité 1,52910 à 0°, et 1,52418 à 100°.

Application au coefficient de dilatation. — Le poids du gaz qui remplit le ballon à 100°, comparé à celui qui le remplit à 0°, peut servir à calculer le coefficient de dilatation de ce gaz : Soit *P* le poids du gaz à 0° qui remplit le ballon sous la pression $H - h$; ce poids sous la pression *H*, serait $P \frac{H}{H - h}$. Le poids du gaz qui reste dans le ballon, quand on le porte à la température de l'ébullition sous la pression *H'* du baromètre, est $P \frac{H'}{H - h} \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha T}$, en désignant par *K* le coefficient de dilatation du verre, et par α celui du gaz. Si donc *p* est la diminution de poids donnée par l'expérience, on a

$$p = P \frac{H}{H - h} - P \frac{H'}{H - h} \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha T};$$

d'où l'on peut tirer la valeur de α . Ce nouveau moyen de mesurer le coefficient de dilatation, permet d'opérer sur les gaz qui attaquent le mercure.

Vérification de la loi de Mariotte. — En observant le poids d'un gaz à 0° ou à 100°, et sous diverses pressions, on peut encore vérifier si les nombres obtenus satisfont à la loi de Mariotte à ces deux températures. M. Regnault a reconnu ainsi que l'acide carbonique, qui s'écarte notablement de la loi à 0°, la suit sensiblement à 100°, sous des pressions inférieures à 760^{mm}; ce qui confirme les résultats obtenus par une autre méthode (I, 381). A 0°, il a donné les densités 1,52910, 1,52366, 1,52146, sous les pressions 760, 374 et 224^{mm}. — Voici les densités trouvées par M. Regnault :

GAZ	DENSITÉ	POIDS D'UN LITRE DE GAZ à 0° et à 760 ^{mm} .
Air.....	1	1,293187
Azote.....	0,97137	1,256167
Oxygène.....	1,10563	1,429802
Hydrogène.....	0,06926	0,089578
Acide carbonique.....	1,52901	1,977414

1050. Applications des densités des gaz. — La connaissance des densités relatives des gaz est très-importante pour la chimie. Gay-Lussac a découvert que lorsque deux gaz se combinent, les volumes qui s'unissent sont toujours dans des rapports simples, c'est-à-dire dont les deux termes sont des nombres entiers très-petits. Ainsi, 1 volume d'oxygène s'unit à 2 d'hydrogène pour former de l'eau; 1 volume de chlore à 1 d'hydrogène pour former l'acide chlorhydrique. De plus, le composé formé, pris à l'état de gaz ou de vapeur, possède, à la même température et sous la même pression, un volume qui est en rapport simple avec chacun des volumes qui se sont combinés. Ainsi, 1 volume d'oxygène et 2 d'hydrogène donnent 2 volumes de vapeur d'eau; 1 volume de chlore et 1 d'hydrogène, 2 volumes d'acide chlorhydrique.

Si nous appelons v et v' les volumes qui se combinent, V le volume du gaz formé, et d , d' , D les densités des trois gaz considérés, les poids ne changeant pas pendant la combinaison, on a $vd + v'd' = VD$, relation qui sert à calculer l'une des trois quantités d , d' , D , quand on connaît les deux autres ainsi que les rapports simples qui existent entre les volumes v , v' , V . Elle pourra servir aussi à trouver le rapport $V : v$, si l'on connaît les densités des trois gaz et le rapport $v' : v$; on trouvera toujours des nombres simples pour les deux termes de ce rapport. Ce dernier calcul est important, dans le cas où le composé n'est pas un gaz à la température ordinaire; alors on calcule le volume V , pour une température telle que le composé soit à l'état de vapeur, en prenant la densité de cette vapeur par un moyen indiqué plus tard, et considérant les volumes v , v' et les densités d et d' à cette température; ce qui suppose que la chaleur ne change pas les rapports entre les densités des gaz.

Une autre application importante des densités des gaz est celle qu'on en fait au calcul des *poids atomiques* des corps simples. On nomme ainsi le rapport entre le poids de l'atome d'un corps simple et le poids de l'atome d'un autre corps, par exemple l'oxygène, pris pour terme de comparaison et représenté par 100. Pour calculer les poids atomiques, on part de cette hypothèse, appuyée sur un grand nombre de considérations et sur quelques données physiques que nous ferons connaître en traitant des chaleurs spécifiques : *sous la même pression et à la même température, tous les gaz simples contiennent le même nombre d'atomes*. Il résulte de là, que les poids des atomes des gaz simples sont entre eux comme les densités de ces gaz. On obtiendra donc le poids de l'atome d'un gaz, comparé au poids 100 de l'atome d'oxygène, par une simple proportion. Par exemple, la densité de l'oxygène par rapport à l'air est 1,1056; celle du gaz hydrogène est 0,0692; on aura $1,1056 : 0,0692 = 100 : x$, relation qui donne $x = 6,25$, pour le poids atomique de l'hydrogène. Quand les corps simples ne sont pas gazeux, on compare la densité de leur vapeur à la densité de l'oxygène à la même température.

Les volumes des gaz qui se combinent étant connus, on en déduit les nombres d'atomes qui s'associent pour former l'atome composé; car ces nombres sont entre eux comme ces volumes. Ainsi, un atome d'eau sera formé de 1 atome d'oxygène et de 2 d'hydrogène, et le poids de l'atome composé, somme des poids des atomes composants, sera $100 + 2 \cdot 6,25 = 112,50$.

Voici le tableau des densités d'un certain nombre de gaz, comparées à celles que donnent les formules chimiques. Ces nombres, obtenus par la méthode du n° 1044, sont loin d'être aussi exacts que ceux du tableau précédent.

GAZ	DENSITÉ observée.	DENSITÉ calculée.	POIDS d'un litre à 0° et à 760 ^{mm} .	OBSERVATEURS
Ammoniaque	0,5967	0,5910	0 ^r ,7752	Biot et Arago.
Acide iodhydrique	4,4288	4,3399	5,7719	Gay-Lussac.
— fluosilicique	3,5735	»	4,6423	J. Davy.
— fluoborique	2,3709	»	3,0800	Id.
— sulfureux	2,2340	»	2,8818	Thénard.
— sulhydrique	1,1912	»	1,5475	Thén. et Gay-Lussac.
— chlorhydrique	1,2474	»	1,6205	Biot et Arago.
Chlore	2,4700	2,4260	3,2088	Thén. et Gay-Lussac.
Cyanogène	1,8064	1,8044	2,3467	Gay-Lussac.
Protoxyde d'azote	1,5204	1,5270	1,9752	Colin.
Bioxyde d'azote	1,0388	1,0364	1,3495	Bérard.
Gaz oléfiant	0,9780	0,9816	1,2752	T. de Saussure.
Protocarbone d'hydrogène..	0,5550	0,5596	0,7270	Thomson.
Arséniure d'hydrogène	1,6950	2,6950	3,5020	Dumas.
Oxyde de carbone	0,9569	0,9678	1,2451	Cruikshanks.

IV. Applications de la dilatation de l'air.

1051. Thermo-baromètre. — Un thermomètre à air, ouvert à sa partie supérieure et maintenu à une température constante, pourrait servir à mesurer les variations de la pression atmosphérique. En effet, v étant le volume occupé par le gaz sous la pression de 760^{mm} , r le rayon du tube dans lequel se meut l'index, et h la quantité dont cet index s'éloigne de la position qui correspond à la pression de 760^{mm} ; pour une différence de pression x , on aura, d'après la loi de Mariotte, $v \pm \pi r^2 h : v = 760 : 760 \mp x$; d'où l'on tirera

$$760 \mp x = \frac{760 \cdot v}{v \pm \pi r^2 h}.$$

Le signe supérieur correspond au cas où la pression dépasse 760^{mm} . — On peut aussi tirer de cette équation la valeur à donner au volume v pour que h soit égal à n millimètres, quand x est égal à 1^{mm} , c'est-à-dire pour que l'instrument soit n fois plus sensible que le baromètre ordinaire.

Mais il faut tenir compte des variations de température, qui font aussi marcher l'index. Pour cela, on gradue d'abord le tube à air, en le maintenant à la température de 0° , et le portant successivement à 760^{mm} et à $760 + h$. On marque les points où s'arrête l'index, et l'on divise l'intervalle en autant de parties égales qu'il y a de millimètres dans h ¹. La division est tracée sur une plaque mobile le long du tube, et l'on marque sur ce tube un point de repère, au n° 760. On pourra établir de la même manière une graduation pour toute autre température constante, seulement le n° 760 ne correspondra pas au même point du tube, et les divisions seront d'autant plus grandes que le volume de l'air à 760^{mm} sera plus grand, c'est-à-dire, que la température sera plus élevée. Il y aura donc une échelle particulière pour chaque température, et si cette température restait constante, il n'y aurait rien autre chose à faire qu'à lire le numéro de son échelle, qui se trouve en face de l'index. Mais si la température varie d'une observation à l'autre, il faudra évidemment, pour rendre ces observations comparables à celles qui sont faites à 0° , diminuer les résultats observés à t° , de la quantité dont s'est déplacé l'index par l'effet de la dilatation seule; ce qui revient à descendre l'échelle qui correspond à t° , de manière que son n° 760 se trouve placé au même endroit que le n° 760 de l'échelle qui correspond à 0° , c'est-à-dire au repère marqué sur le tube. Alors le numéro de l'échelle établie pour la température t , qui se trouve en face de l'index, donne la pression cherchée. Un thermomètre ordinaire indique la température t .

¹ Cette graduation n'est qu'approchée; car la formule qui précède montre que h n'est pas proportionnel à x : aussi convient-il de chercher séparément la longueur des divisions au-dessus et au-dessous de 760; les dernières seront un peu plus petites que les autres.

Sympiezomètre. — La première idée du thermo-baromètre est due à Amontons et à Boyle. En 1844, M. Bodeur a fait connaître un thermo-baromètre d'un usage commode, qui a été ensuite perfectionné par MM. Adie, d'Edimbourg, Bunsen, Silbermann, Gaudin. La figure 753 représente l'appareil de Bunsen, qui lui a donné le nom de *sympiezomètre*. T est un thermomètre à alcool, dans le réservoir duquel se trouve renfermé le réservoir *a* du thermomètre à air *anp*, de manière que l'air logé en *a* possède toujours la même température que le thermomètre à alcool. Le tube du thermomètre à air et une partie de son réservoir contiennent de l'huile d'amandes douces colorée, liquide léger et peu volatil. La pression atmosphérique se fait sentir en *p*.

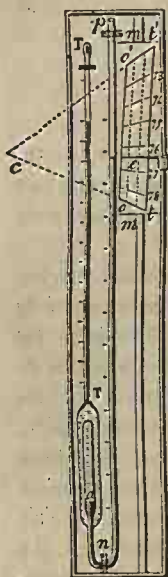


Fig. 753.

Pour établir la graduation, on construit deux échelles *oo'*, *tt'* correspondant à deux températures 0° et t° , en portant l'appareil à deux pressions, 760^{mm} et $760^{\text{mm}} \pm h$. Ces deux échelles sont tracées parallèlement l'une à l'autre sur une plaque mobile *mm*. On mène ensuite les lignes *ot*, *o't'*, et en joignant les points de division de l'échelle *tt'* au point de rencontre *c*, on obtient sur des parallèles à *tt'* équidistantes, et en nombre égal au nombre de degrés qu'il y a entre 0° et t° , les échelles correspondantes aux températures comprises entre ces deux-là. On peut, de même, établir des échelles parallèles correspondantes à des températures au-dessous de 0° et au-dessus de t° . En tête de chaque échelle est inscrite la température à laquelle elle correspond. — Supposons que l'on veuille trouver la pression quand la température est de 10° . On fait glisser la plaque *mm* de manière à placer le n^o 760 de l'échelle qui correspond à 10° , en face du repère que l'on a marqué sur le tube; on amène la pointe de l'aiguille horizontale *c* au sommet de la colonne d'huile; et la division de l'échelle correspondant à 10° qui coïncide avec l'aiguille, donne la pression cherchée.

Le sympiezomètre peut ainsi remplacer le baromètre; ses petites dimensions le rendent très-portatif et d'un usage précieux en mer, où le baromètre ordinaire est souvent difficile à observer; de plus, il est très-sensible.

1052. Mouvements produits par la dilatation des gaz. — La chaleur, en dilatant les gaz, leur communique un accroissement de force élastique qui a été utilisé pour produire des effets mécaniques. Les machines construites pour réaliser cette application se nomment *machines à air dilaté*. Leur jeu ayant une grande analogie avec celui des machines à vapeur, nous ne les décrirons qu'après avoir donné la théorie de ces derniers appareils.

C'est à la diminution de densité que la chaleur fait éprouver à l'air, qu'est due la force ascensionnelle des mongolfières. — L'air se renouvelle autour du bois qui brûle, par un effet analogue : les gaz de la combustion, échauffés et

très-dilatés, s'élèvent en vertu de leur légèreté spécifique, et sont remplacés par l'air environnant, dont une partie active la combustion, se dilate, ou est remplacée par des gaz très-dilatés, qui montent à leur tour sous forme de fumée, qui n'est autre chose qu'un mélange de gaz dilatés, de vapeurs diverses et de poussière de charbon.

Dans l'antiquité, le foyer où l'on entretenait le feu était situé au milieu de la chambre, et la fumée sortait par une ouverture pratiquée au toit. Il en est encore ainsi dans certains pays du nouveau continent et même de l'Europe. Plus tard, le foyer fut placé contre le mur, et la fumée, reçue dans une vaste hotte, s'élevait à travers un large conduit vertical. Vers le quinzième siècle, on s'occupa de perfectionner ce système, on ajouta le chambranle, destiné à rétrécir l'ouverture. Alors l'écoulement de la fumée à travers le conduit ne vient pas seulement de sa tendance à monter librement, car elle peut marcher horizontalement et même de haut en bas; mais il est dû à un effet particulier, qu'on appelle le *tirage*, qui a été compris et perfectionné principalement par Rumfort.

Tirage des cheminées. — Si nous supposons le conduit de la cheminée rempli de gaz chauds, cette colonne de gaz tendra à s'élever, d'après le principe d'Archimède, avec une force égale à la différence, D , entre son poids et le poids d'un volume égal de l'air froid extérieur, qui devra communiquer librement avec l'espace dans lequel est placée la cheminée. Il se produira alors dans l'intérieur du conduit une véritable aspiration (fig. 754), semblable à celle qui aurait lieu si la colonne de gaz chaud était remplacée par un piston, sollicité de bas en haut par une force égale à D . Les cheminées de verre des lampes nous montrent nettement l'effet du tirage : quand la cheminée est enlevée, la flamme fume, et elle devient brillante quand elle est munie de son verre, qui détermine un tirage,

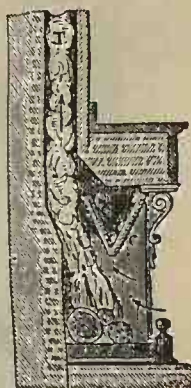


Fig. 754.

d'où résulte un appel d'air et par suite une combustion plus complète. — La force ascensionnelle augmente avec le volume de la colonne de gaz. Pour avoir un fort tirage, il faut donc que cette colonne ait une grande hauteur et une grande section, que le gaz se refroidisse le moins possible, et enfin qu'il entre à une haute température. Tout l'air qui afflue devra donc passer à travers le feu, pour en activer la combustion et s'y échauffer. C'est ce qui est loin d'avoir lieu dans nos cheminées d'appartement; une grande masse d'air froid s'introduisant et diminuant la température des gaz qui ont eu le contact du feu. On atténue cet inconvénient, au moyen d'un diaphragme *cc*, qui diminue l'ouverture du chambranle. Les poêles, dans lesquels l'air n'arrive que par une petite ouverture, donnent un tirage plus énergique, toutes circonstances égales d'ailleurs. On en fait dans lesquels le tuyau, qui s'ouvre tout en haut du foyer, descend, passe sous le plancher pour se relever ensuite dans l'épaisseur du mur. Le système,

une fois rempli d'air chaud, fonctionne comme un *siphon renversé* (I, 428). C'est par un effet semblable que si l'on a deux cheminées prenant l'air dans un même espace ne communiquant qu'imparfaitement avec l'air extérieur, celle dont le tuyau est le plus long fait descendre la colonne gazeuse que contient l'autre.

Si le tuyau d'une cheminée est oblique, la force ascensionnelle de la colonne d'air chaud resterait la même à égalité de hauteur verticale, s'il n'y avait pas de frottement du gaz ascendant sur les parois. Pour rendre cette résistance aussi petite que possible, le conduit doit être vertical, et, dans le cas contraire, présenter le moins d'angles possible. L'intérieur doit être très-uni et débarrassé de suie. Un conduit à section circulaire est préférable à un conduit rectangulaire; le contour du premier étant *minimum*, à l'égalité de section. Les foyers dans lesquels doit être appelée une grande quantité d'air, pour brûler beaucoup de combustible à la fois, comme ceux des chaudières à vapeur, sont munis de cheminées larges et élevées, pour produire un fort tirage. Cependant, il y a toujours une certaine hauteur qu'il ne faut pas dépasser, au-dessus de laquelle l'influence du frottement croîtrait plus vite que le tirage.

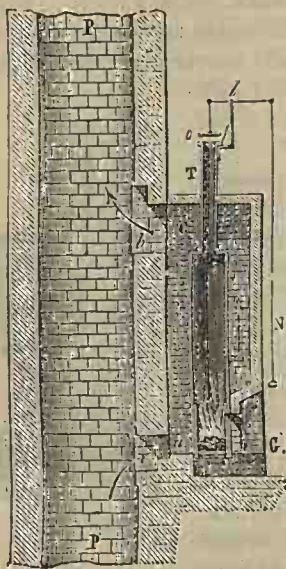


Fig. 755.

1053. Aérage des mines. — Dans les mines où il se dégage divers gaz nuisibles, entre autres des gaz inflammables, il est nécessaire d'établir des courants d'air qui les entraînent au dehors. Quand il existe deux puits de mine réunis par une galerie inférieure et s'ouvrant en deux points du sol inégalement élevés, ils forment un immense siphon renversé dans lequel l'air de la mine, plus chaud que l'air extérieur, produit un courant ascendant, dans celui qui débouche au

point le plus haut, et un courant descendant dans l'autre. Quand cet *aérage naturel* n'est pas suffisant, on refoule de l'air dans les galeries au moyen de machines soufflantes (I, 445), ou l'on en extrait les gaz par divers moyens, par exemple, en produisant un tirage d'air chaud.

Pour cela, on fait communiquer l'orifice du puits avec une haute cheminée, au bas de laquelle on entretient du feu que l'air du puits vient alimenter en déterminant un tirage énergique. Mais, quand il y a des gaz inflammables, il est à craindre qu'il ne se produise une explosion qui se communiquerait jusque dans les galeries. On évite ce danger par la disposition (*fig. 755*); la cheminée communique en *a* et *b* avec une chambre dans laquelle l'air est échauffé par un poêle qui reçoit en *G* l'air nécessaire à la combustion. L'air chaud de la chambre

monte et sort en *b*, pendant qu'il se renouvelle en *a*, de manière à établir le tirage dans la partie supérieure *bP* de la cheminée, sans que l'air de la mine ait été mis en contact avec le feu.

1054. Calorifères à air chaud. — Les calorifères à air chaud nous présentent une nouvelle application de la force ascensionnelle de l'air dilaté. On les construit dans deux systèmes : dans les uns, la flamme du foyer enveloppe un tuyau plusieurs fois recourbé, dans lequel circule l'air à échauffer, qui se rend ensuite, par différents canaux ascendants, à des *bouches de chaleur*. Dans les autres, le tuyau est traversé par la flamme du foyer, et l'air à échauffer l'enveloppe extérieurement. Dans le premier cas, une partie de la chaleur, communiquée aux parois du fourneau, est perdue; le dernier système est donc préférable. La figure 756 représente une des nombreuses dispositions adoptées. *F* est le foyer; la flamme et la fumée sont appelées dans la cheminée *c*, dont le tirage les force à circuler à travers le système de tuyaux *t, t*. L'air échauffé au contact des parois de ces tuyaux, monte dans l'espace *m* et arrive à différentes bouches de chaleur *b, b*, par lesquelles il se répand dans les espaces à échauffer. Il est remplacé par de l'air qui vient de l'extérieur. Les extrémités *o, o*, peuvent s'ouvrir pour le ramonage des tuyaux.

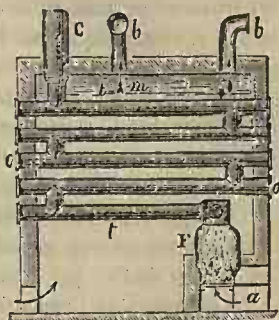


Fig. 756.

On adapte souvent aux poêles et même aux cheminées ordinaires des caisses de tôle, où l'air s'introduit par le bas, s'échauffe au contact des parois, et se répand dans la chambre par des bouches de chaleur ménagées à la partie supérieure.

1055. Régulateurs du feu. — Nous avons indiqué (1007) comment on a utilisé la dilatation des métaux pour régler la combustion dans des foyers. Les métaux se dilatant peu, M. Sorel a eu l'heureuse idée de les remplacer par l'air, dont la dilatation est beaucoup plus grande. La figure 757 représente un

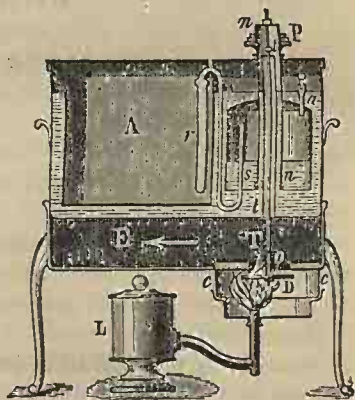


Fig. 757.

appareil dans lequel ce principe est appliqué. *A* est une caisse dans laquelle on veut maintenir une température constante au moyen de la chaleur de l'eau dans laquelle elle est plongée. Cette eau est échauffée par la flamme d'une lampe *L*, dont le bec traverse un plateau muni d'un rebord qui entoure le cylindre *cc*; de

manière que l'air n'arrive à la flamme que par l'espace qui reste entre le rebord et le cylindre. Les gaz dégagés par la flamme passent par l'ouverture *o*, circulent dans l'espace *E*, et cèdent de leur chaleur à l'eau avant de s'échapper au dehors. Un disque ou registre, *D*, est chargé de régler la combustion en obstruant plus ou moins l'ouverture *o*. Ce disque est suspendu par une tige, *T*, à une cloche annulaire *san* renversée sur l'eau. La tige *T* est fixée au haut d'un manchon *nn*, et traverse un tube *tt* soudé au fond de la cuve à eau. Un large réservoir d'air, *r*, communique, par le tube *s*, avec la cloche, de manière à y faire sentir les moindres changements de température de la chambre *A*. Quand la température s'élève trop en *A*, l'air dilaté soulève la cloche, le disque *D* obstrue le passage *o*; la flamme brûle moins activement, et l'eau reçoit moins de chaleur. Si la température s'abaisse, la cloche et le disque *D* descendent, et la flamme est activée par un courant d'air plus abondant.

On règle l'appareil, de manière à obtenir la température que l'on veut, soit en chargeant plus ou moins la cloche avec des poids, *P*, soit en y ajoutant ou en retirant de l'air par le tube *a*, soit en modifiant la mèche de la lampe. Quand la température de l'appareil est devenue constante, elle ne varie plus que de 0°,1 environ.

CHAPITRE V

CAPACITÉS CALORIFIQUES

« La quantité de chaleur libre reste toujours la même dans le simple mélange des corps. Cela est évident, si la chaleur est un fluide....., et si elle n'est que la force étre qui résulte du mouvement intestin de la matière. »

LAVOISIER et DE LAPLACE (*Mémoire sur la chaleur.*)

§ 1. — CAPACITÉ DES SOLIDES ET DES LIQUIDES

I. Méthodes et résultats généraux.

1056. Définitions. — Nous ignorons les quantités de chaleur que contiennent les corps; mais on a reconnu que la quantité qui correspond à une élévation de température donnée, n'est pas la même pour les diverses substances; ce qu'on exprime en disant qu'elles n'ont pas la même *capacité pour la chaleur*.

Voici comment on le prouve : Si d'abord on mêle deux masses égales d'eau, l'une à t° , l'autre à t'° , la masse la plus froide s'échauffe aux dépens de la plus chaude, jusqu'à ce que la température du mélange soit uniforme, et soit égale à la moyenne $\frac{1}{2}(t + t')$. Si, par exemple, l'une des masses est à 100° et l'autre à 0° , la température sera de 50° . Si maintenant, au lieu de la seconde masse d'eau, on prend une masse égale de mercure à 0° , l'expérience montre que la température finale du mélange est de 97° environ ; la température de l'eau a donc beaucoup moins baissé que celle du mercure n'a monté. La chaleur perdue par l'eau, pour que sa température baisse de 3° , a donc été capable d'élever de 97° une masse égale de mercure. Il faut donc moins de chaleur au mercure qu'à l'eau pour s'échauffer de 1° ; les deux corps ont donc des *capacités calorifiques différentes*.

M. Tyndall montre, par l'expérience suivante, l'inégalité de capacité des métaux. On pose sur un gâteau de cire de 12^{mm} environ d'épaisseur, *ab* (fig. 758), des balles de fer, cuivre, bismuth, plomb, ayant même poids, après les avoir portées à une même température, de 170° à 180° . Les balles de fer et de cuivre abandonnent, en se refroidissant, assez de chaleur pour fondre la cire dans toute son épaisseur et passer à travers le gâteau, tandis que les balles de bismuth et de plomb ne font que s'y enfoncer plus ou moins sans pouvoir le traverser. Ces dernières contiennent donc, à poids égal et pour chaque degré, moins de chaleur que les premières.

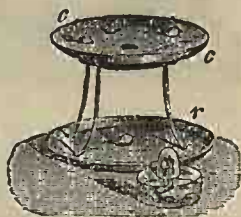


Fig. 758.

On nomme *capacité calorifique*, *chaleur spécifique*, ou *quantité de chaleur* d'un corps, la quantité de chaleur que doit perdre ou gagner l'unité de masse de ce corps, pour que sa température varie de 1° .

Calorie. — On a choisi pour *unité de chaleur*, la quantité de chaleur que doit recevoir ou perdre l'unité de masse de l'eau pour s'échauffer ou se refroidir de 1° , c'est-à-dire la chaleur spécifique de l'eau. Cette unité a reçu le nom de *calorie*. Il ne faut pas la confondre avec l'*unité de température* ou le degré. Ce dernier est l'effet, et l'autre la cause ; et pour accroître d'une unité la température de masses égales de divers corps, il faut des nombres différents de *calories*.

La découverte des *chaleurs spécifiques* est due à Joseph Black, qui la fit connaître dans ses leçons de chimie à Glasgow, de 1760 à 1765. Aussitôt les physiciens travaillèrent à l'envi à créer des méthodes pour comparer les capacités des divers corps pour la chaleur. Black, Irwine, Willeke, Crawford, imaginèrent la *méthode des mélanges* ; Laplace et Lavoisier adoptèrent celle de la *fusion de la glace*, indiquée quelques années auparavant par Willeke ; et Meyer et Leslic celle du refroidissement. Plus récemment, enfin, on a imaginé la méthode du *calorimètre à mercure*, celle du *calorimètre à glace* par les changements de volume qu'elle éprouve en fondant, et celle de l'*électro-calorimètre*.

1057. I. Méthode des mélanges. — On prend un vase cylindrique en laiton mince et poli C (fig. 759), contenant un certain poids p d'eau, dont on connaît la température t ; ce vase, nommé *calorimètre*, n'est soutenu que par des fils de soie tendus, de manière qu'il ne peut perdre ni gagner de chaleur par son support. Le corps dont on veut mesurer la capacité est chauffé dans une étuve, ou dans de l'eau à une température T , et soutenu par un fil très-fin. On le transporte rapidement dans l'eau, on agite, et bientôt la température du mélange atteint une valeur maximum, θ . Pour déduire de ces données

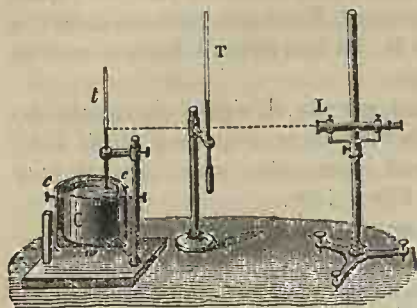


Fig. 759.

la chaleur spécifique, x , du corps, on écrit une équation exprimant que la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le vase est égale à celle que perd le corps.

Soit P le poids de ce corps, π celui du vase, et y sa chaleur spécifique. La quantité de chaleur gagnée par l'eau pour s'échauffer de $(\theta - t^\circ)$, est $p(\theta - t)$, puisqu'il faut une calorie pour échauffer de 1° l'unité de poids d'eau. Le vase passe aussi de t° à θ° ; car, étant en métal très mince, il pos-

sède à chaque instant la même température que l'eau, et absorbe $\pi y(\theta - t)$. Le corps, en se refroidissant de $(T - \theta)^\circ$, perd $Px(T - \theta)$ calories; on aura donc

$$[1] \quad Px(T - \theta) = p(\theta - t) + \pi y(\theta - t) = (\theta - t)(p + \pi y).$$

Cette équation contient, indépendamment de l'inconnue x , la valeur y de la chaleur spécifique du vase. Cette quantité se détermine dans une expérience préalable, en prenant pour corps P un morceau de la substance dont est formé le vase; alors x et y sont une seule et même quantité.

Nous avons admis dans ce calcul que la quantité de chaleur qui correspond, dans un corps, à chaque degré de température, est toujours la même, ou que la quantité de chaleur nécessaire pour produire un certain changement de température est proportionnelle à l'étendue de ce changement. L'expérience montre qu'il en est ainsi jusqu'à 100° , pour la plupart des corps solides; car les résultats obtenus restent les mêmes, quelles que soient les températures t et T .

Équivalent en eau. — Si l'on désigne par e la chaleur spécifique d'un corps et par P son poids, la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1° sera Pe . Or un poids d'eau devrait être égal à Pe pour s'élever de 1° en absorbant la même quantité de chaleur; c'est pourquoi le produit Pe se nomme *l'équivalent en eau* du corps. Ce poids d'eau met en jeu la même quantité de chaleur que le poids P du corps, pour une même variation de

température. Dans la formule [1], πy représente donc l'équivalent du calorimètre en eau, quantité relativement très-petite quand il est fait de métal très-mince, surtout de platine, dont la capacité n'est que le tiers de celle du laiton.

Cas des liquides. — La méthode des mélanges s'applique aux liquides. Quand le liquide exerce une action chimique sur l'eau, on le renferme dans un vase de métal ou de verre, dont on connaît la chaleur spécifique c et le poids π' , et qui possède toujours la même température que le liquide. Alors il faut ajouter au premier membre de l'équation [1] la quantité de chaleur cédée par ce vase, c'est-à-dire le terme $\pi'c'(T - 0)$. Il faudra de même renfermer les corps solides dans des vases, si l'eau exerce sur eux une action chimique, qui est toujours accompagnée de changements de température.

1058. Corrections. — Il y a plusieurs corrections à faire aux résultats donnés par la méthode des mélanges, toute la chaleur abandonnée par le corps n'étant pas reçue par l'eau. Nous avons déjà vu comment on tient compte de celle qu'absorbe le vase. Il faut, en outre, ajouter au second membre de l'équation [1] les quantités de chaleur absorbées par l'agitateur et par le thermomètre. Pour l'agitateur, il suffit de connaître son poids et sa capacité déterminée par une première expérience approximative. Quant au thermomètre, il faudrait connaître le poids du verre et celui du mercure; mais on peut, plus simplement, mesurer préalablement sa capacité moyenne, en le plongeant seul, après l'avoir porté à T^0 , dans l'eau du calorimètre. Alors, en appelant z la quantité de chaleur abandonnée par la masse du thermomètre pour s'abaisser de 1^0 , on aura $z(T - 0) = (p + \pi y)(\theta - t)$; d'où l'on tirera la valeur de z qui représente l'équivalent en eau du thermomètre.

Perte extérieure de chaleur. — Une partie de la chaleur reçue par le calorimètre se perd par le rayonnement et le contact de l'air. On rend cette perte très-faible, en choisissant les données de manière que la température du mélange s'élève peu au dessus de la température de l'air; en employant un vase bien poli, et l'appuyant sur des cordons de soie tendus dans un cylindre cc (fig. 759) de laiton bien poli, fermé en dessous pour empêcher les courants d'air.

On atténue encore cette perte, par la *méthode de compensation* de Rumfort. On commence l'expérience en donnant à l'eau une température t inférieure à la température de l'air, et choisissant le poids P du corps, de façon que θ dépasse cette température, du même nombre de degrés; alors, pendant la première partie de l'expérience, le vase reçoit une certaine quantité de chaleur de l'extérieur, et il en perd pendant la seconde partie; il y a donc une certaine compensation. Cependant les quantités reçues et perdues ne sont pas égales, le calorimètre s'échauffant d'abord rapidement, de manière à atteindre promptement la température du milieu ambiant, pour s'échauffer ensuite de plus en plus lentement; la seconde partie de l'expérience dure donc beaucoup plus que la première, et une partie de la perte de chaleur n'est pas compensée. Il vaut mieux calculer cette perte en s'appuyant sur la loi de Newton (894). Pour cela, dès que le corps est plongé dans l'eau, on suit de loin, au moyen d'une lunette L ,

la marche du thermomètre t , jusqu'à ce qu'il atteigne la température finale θ , et l'on note les températures $\tau, \tau', \tau'', \dots$ indiquées après des temps égaux à une fraction m de minute. Si cette fraction n'est pas trop grande, on pourra admettre, sans erreur sensible, que la température pendant chaque intervalle m , est égale à la moyenne $\frac{1}{2}(\tau + \tau')$, $\frac{1}{2}(\tau' + \tau'')$,... et les abaissements de température pendant chaque intervalle seront, d'après la loi de Newton,

$$C[\frac{1}{2}(\tau + \tau') - \theta], \quad C[\frac{1}{2}(\tau' + \tau'') - \theta], \dots$$

C étant une constante. Il suffit ensuite d'ajouter à la température finale observée θ , la somme S de ces abaissements de température, de sorte qu'il faut substituer à θ , dans la formule [1], la quantité $\theta + S$.

Il nous reste à dire comment on détermine la constante C . Quand le thermomètre, après avoir atteint la température maximum θ , commence à descendre, on observe les températures τ_1, τ'_1 qu'il indique au commencement et à la fin d'une minute, et l'on a d'après la loi de Newton

$$\tau_1 - \tau'_1 = C[\frac{1}{2}(\tau_1 + \tau'_1) - \theta];$$

d'où l'on tire la valeur de C .

Le corps éprouve enfin une perte de chaleur, en passant de l'étuve où on l'échauffe dans le calorimètre. Quoique le temps du transport soit très-court, l'erreur n'est pas négligeable, le corps étant ordinairement très-chaud. Nous verrons plus loin (1072) comment M. Re-



Fig. 760.

gnault évite cette perte. — M. Berthelot, à l'occasion de recherches importantes sur les dissolutions, a donné d'utiles et minutieux détails sur la méthode des mélanges, la meilleure disposition des appareils, la manière d'opérer, etc. ¹.

1059. II. Méthode par la fusion de la glace. — Cette méthode, célèbre par les travaux de Laplace et Lavoisier, est fondée sur ce résultat de l'expérience, qu'il faut 79,25 calories pour faire passer 1 gramme de glace à 0° , à l'état d'eau aussi à 0° . On choisit, comme le faisait Black, un bloc de glace bien pure et exempt de fissures; on y creuse une cavité (fig. 760), qu'une plaque de glace peut fermer exactement. La glace étant à la température de 0° , et la cavité bien essuyée, on y place le corps dont on veut mesurer la chaleur spécifique, après avoir évalué son poids P et sa température T . Le corps se refroidit en fondant une portion de la glace, et sa température descend jusqu'à 0° . On rassemble l'eau de fusion et on la pèse; soit p son poids. Il a fallu $79,25 \cdot p$ calories pour fondre ce poids p de glace; or cette quantité de chaleur est égale à celle que le

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIX, p. 407.

corps a cédée pour descendre de T° à 0° , c'est-à-dire à PxT . On a donc $PxT = 79,25 p$; d'où l'on tire la valeur de x .

Calorimètre de Laplace et Lavoisier. — La difficulté de se procurer des blocs de glace assez gros sans pores ni fissures, a fait imaginer le *calorimètre de glace* (fig. 761). Cet appareil est formé de trois enveloppes; la plus petite, criblée de trous, reçoit le corps, que l'on entoure de glace pilée, substance dont on remplit aussi l'intervalle qui existe entre les différentes enveloppes. Des couvercles garnis de glace ferment l'appareil en dessus. La chaleur que perd le corps fait fondre une partie de la glace qui l'entoure, et l'eau de fusion est recueillie par le robinet r . Un petit grillage f empêche la glace d'obstruer le robinet. La glace placée dans l'intervalle AAB et sur le couvercle supérieur, empêche la chaleur extérieure de se faire sentir dans l'enceinte B; cette chaleur ne pouvant que fondre la glace qui touche l'enveloppe extérieure AA, dont l'eau de fusion sort en r' . Au bout de 30 heures environ, la température du corps est descendue à 0° ; on pèse l'eau recueillie par le robinet r , et l'on calcule, comme ci-dessus, la chaleur spécifique du corps.

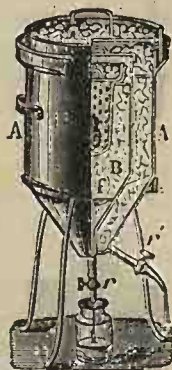


Fig. 761.

Pour appliquer cette méthode aux liquides, on les renferme dans un vase dont on connaît la chaleur spécifique; on ajoute la chaleur perdue par ce vase à celle que cède le liquide, et l'on égale la somme à la quantité de chaleur absorbée par la glace qui a été fondue.

La méthode du calorimètre de glace laisse quelque incertitude, à cause de l'eau qui reste engagée entre les fragments de glace, et qui n'est pas la même au commencement de l'expérience et à la fin, puisque, la glace ayant fondu en partie, les fragments n'ont plus ni la même forme ni les mêmes positions relatives. On atténue cette cause d'erreur, en opérant sur de grandes masses de corps.

Il arrive aussi que l'air circule entre les fragments de glace, et en fond un peu; c'est pourquoi il faut opérer à une température de 4° ou 5° au plus.

1060. III. Méthode du refroidissement. — Les méthodes qui précèdent sont applicables aux corps qu'on a en assez grande masse. La méthode du refroidissement s'applique à ceux dont on n'a que de petites quantités. Dulong et Petit l'ont employée de la manière suivante. Les corps dont on veut comparer les chaleurs spécifiques sont renfermés successivement dans un vase très-mince de métal contenant un thermomètre. Ces corps sont en poudre, afin de rendre leur conductibilité aussi égale que possible. On observe les temps qu'ils emploient sous la même température, pour se refroidir d'un même nombre de degrés, dans une enceinte vide à température constante. Les quantités de chaleur abandonnées pendant ces temps seront proportionnelles à leur durée, toutes les circonstances étant égales de part et d'autre. De plus, ces quantités sont représentées par les produits $pc\tau$, $p'c'\tau$, en appelant τ l'abaissement de

température commun, p, p' les poids des corps, et c, c' leurs chaleurs spécifiques. On aura donc $pc\tau : p'c'\tau = t : t'$, en désignant par t et t' les temps du refroidissement observé.

M. Regnault a fait une étude approfondie de cette méthode¹. La figure 762 représente l'appareil qu'il a adopté après un grand nombre d'essais. v est un vase cylindrique d'argent doré, dans lequel se trouve renfermé le réservoir d'un thermomètre très-sensible. La matière sur laquelle on veut opérer, réduite en poudre impalpable, soit par des moyens mécaniques, soit par des procédés chimiques, est introduite par le fond du vase, qui peut s'enlever, et on la tasse autour du thermomètre. Ce vase est introduit dans un cylindre de laiton garni en dedans de noir de fumée, et la plaque c , fixée au thermomètre, termine l'enceinte par en haut. Le thermomètre, dont la tige est enveloppée d'un tube de verre t , s'ajuste à la tubulure de l'enceinte au moyen d'un collier brisé à vis (941). L'humidité ayant une grande influence sur les résultats, on dessèche l'appareil en y faisant entrer plusieurs fois de l'air sec, après avoir fait le vide par le tube r pendant que l'appareil est plongé dans de l'eau à 40° , et l'on y fait une dernière fois le vide. Quand le thermomètre marque 35° , on plonge l'appareil dans la glace fondante; on attend que le thermomètre marque 20° , et l'on note, sur un chronomètre à pointage, les instants où le thermomètre passe par 15° , 10° , 5° . Si p et p' sont les poids de deux substances remplissant successivement le vase v ; c, c' leurs chaleurs spécifiques; k l'équivalent en eau du vase et de la portion du thermomètre qui s'y trouve renfermée; t et t' les temps employés à produire un même abaissement de température, on aura $pc + k : p'c' + k = t : t'$. Au lieu de calculer k d'après les poids et les chaleurs spécifiques, il est plus simple de le calculer en opérant sur deux substances dont la capacité a été déterminée par la méthode des mélanges, et en tirant la valeur de k de l'équation précédente.

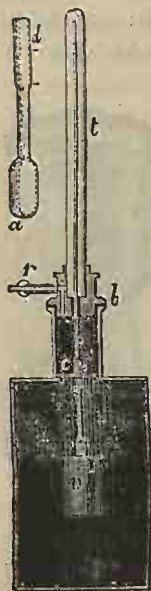


Fig. 762. $\frac{1}{4}$.

Malgré les précautions les plus minutieuses et des efforts persévérants, M. Regnault n'a pu obtenir, de cette méthode, que des résultats incertains pour les corps solides. La différence de conductibilité de ces corps, qui fait que la chaleur ne se rend pas avec la même facilité, de l'intérieur à la surface rayonnante, a une influence évidente. Cependant, ce qui montre qu'il y a quelque autre cause, c'est que le même corps au même état peut donner des résultats notablement différents. MM. de la Rive et Marcet ont reconnu que le tassement de la substance, qu'il est impossible d'obtenir toujours identique, a aussi une grande influence. Par exemple, la chaleur spécifique du charbon en

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. IX, p. 327.

poudre, comparée à celle du cuivre, est d'autant plus petite que la substance est plus fortement tassée.

Cas des liquides. — Les incertitudes dont nous venons de parler n'existent plus pour les liquides, surtout quand leurs propriétés physiques ne diffèrent pas beaucoup. M. Regnault renfermait le liquide dans un petit flacon mince à long col *ad* (fig. 762), dans lequel plongeait le thermomètre. Le poids du liquide était représenté par sa densité à la température de l'expérience.

M. Hirn a appliqué la méthode du refroidissement à quelques liquides, au moyen du grand appareil qui lui a servi à étudier leurs dilatations (1015), et en opérant de la manière suivante : Pendant l'échauffement du réservoir RR (fig. 731, p. 214), on recueille, successivement et à part, les poids $p, p', p'' \dots p_n$ de mercure, qui s'échappent du bec d , lorsque les températures du liquide, en RR sont $t, t', t'' \dots, t_n$. Si ensuite on laisse refroidir le réservoir RR, et si l'on voyait rentrer et descendre par le tube mm , ces poids $p, p', p'' \dots p_n$ de mercure, on serait sûr que la masse liquide toujours agitée, passerait de nouveau par les températures t_n, t_{n-1}, \dots, t' , t . Cela posé, voici la marche des expériences : Quand le réservoir, dont la surface a été couverte de peinture noire lustrée, est arrivé à la température finale t_n , on verse du mercure dans le tube v, v' , on tourne le robinet ρ de manière à fermer le bec d et à établir la communication entre les tubes vv' et mm , et l'on fait affleurer la pointe d'une tige de fer à vis avec le niveau du mercure en v . Dès que la pointe touche le mercure, un courant électrique, passant par deux fils métalliques attachés l'un à la tige, l'autre en v' , est établi et fait jouer une sonnerie semblable à celles qu'on emploie dans la télégraphie électrique. Si le niveau s'écartait de la pointe, la sonnerie s'arrêterait aussitôt. Cela fait, on élève la température en RR de quelques degrés pour avoir le temps d'éteindre les becs de gaz, d'enlever les caisses enveloppantes BB, TT, de placer sur les becs un double écran blanc, et d'essuyer le réservoir RR, dont la surface a été modifiée par la fumée du gaz. Le réservoir se refroidit, le niveau baisse en v et, dès que la sonnerie s'arrête, on fait partir un chronomètre à pointage; la température du liquide en RR est alors t_n° . Aussitôt, on verse dans le tube vv' la dernière partie, p_n de mercure sortie en d pendant l'échauffement, la sonnerie marche de nouveau, et au moment où elle s'arrête, on pointe sur le chronomètre, et la température du liquide est alors t_{n-1} , et ainsi de suite; on a donc ainsi les instants où le liquide toujours agité en RR, possède les températures t_n, t_{n-1}, \dots, t .

Les temps correspondants à des températures intermédiaires pouvaient se calculer au moyen d'une formule empirique assez complexe, la vitesse du refroidissement étant compliquée par la présence de l'air, et par la sortie d'une partie du liquide dilaté sortant par le tube ce' . Les chaleurs spécifiques obtenues par ce moyen, à différentes températures, étaient assez exactes pour qu'une expérience répétée à deux mois d'intervalle, donnât à peine $\frac{1}{8}$ de minute de

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. X, p. 63.

différence, sur 250^m, pour la durée d'un refroidissement de 120°; la température du lieu d'installation de l'appareil ne variant pas de plus de 1° pendant la durée d'une expérience.

1061. Calorimètre à mercure. — Cet ingénieux appareil, imaginé par MM. Fabre et Silbermann, donne promptement et simplement les chaleurs spécifiques des liquides, et se prête à une foule d'autres recherches calorimétriques¹. Il consiste en un énorme thermomètre à mercure dont le réservoir même sert de calorimètre. La figure 763 représente cet appareil tel qu'il a été construit d'abord. Le réservoir est un ballon de verre rempli de mercure, portant un bec latéral auquel s'adapte un tube horizontal *rr*, portant une division arbitraire en parties d'égale capacité. A l'opposé du bec est une ouverture à laquelle on ajuste, au moyen de mastic, un *moufle* *m*, formé d'une espèce d'éprouvette de platine, qu'une tige de verre maintient contre la poussée du

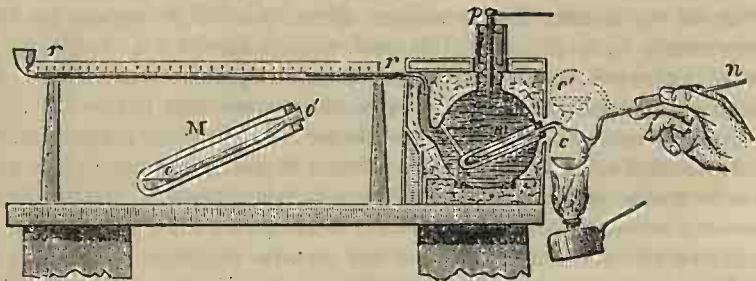


Fig. 763.

mercure. Un piston d'acier *p*, dont le haut de la tige est fileté, et dont la partie inférieure traverse une boîte à étoupe, sert à refouler plus ou moins le mercure dans le tube *rr*, pour amener l'extrémité de la colonne au zéro de la division, avant de commencer une expérience. Le ballon repose sur le contour circulaire d'une cavité creusée dans un morceau de liège, et il est entouré de ouate ou de duvet de cygne, contenus dans une caisse de bois percée des ouvertures nécessaires.

Pour remplir le réservoir de mercure, on enlève le tube *rr*, on met ce réservoir sous un récipient tubulé dans lequel on fait le vide, et l'on y fait tomber du mercure sec, par un entonnoir très-effilé passant à travers la tubulure. — L'appareil étant installé, si l'on introduit un liquide chaud dans le moufle *m*, il cède un certain nombre de calories aux parois du moufle et à une partie du mercure qui l'enveloppe, et, de quelque manière que la chaleur s'y distribue, la dilatation de ce mercure se manifeste par l'allongement de la colonne en *rr*. Chaque division parcourue par l'extrémité de cette colonne, indique un certain nombre de

¹ Ann. de ch. et de phys., 3^e sér., t. XXXVI, p. 33; 4^e s., XXVI, 385, et 5^e s., I, 438.

calories cédées à l'appareil par le liquide chaud, pourvu que la chaleur n'ait pas eu le temps de se communiquer aux parois du ballon avant que la colonne de mercure n'ait atteint son maximum de longueur. Ordinairement le liquide est introduit dans un tube de verre mince *oo*, comme on le voit à part en M; tube entouré de mercure et faisant ainsi partie du moufle.

Le calorimètre se gradue en cherchant directement le déplacement de l'extrémité de la colonne dans le tube *rr*, produit par l'introduction d'un certain nombre de calories dans le moufle, ce qui rend les observations indépendantes de toute correction relative à la masse et aux capacités calorifiques des diverses parties de l'appareil. Pour cela, on introduit en *a* un poids connu d'eau à 100°, au moyen de la pipette recourbée *en*, dont on introduit le bec quand l'eau est bouillante, et que l'on retourne comme en *c'*, après avoir fermé l'extrémité *n*, de manière que le liquide soit chassé par la vapeur. Le poids de l'eau introduite s'obtient en pesant le tube *oo'*, avant et après l'expérience. Un thermomètre donne l'abaissement de température de l'eau; d'où l'on conclut le nombre *K* de calories qu'elle a abandonnées, et qui ont occasionné le déplacement de la colonne en *rr*. Si ce déplacement est de *n* divisions une division correspondra à $K : n$ calories. Plus tard, M. Favre a conseillé de déterminer la valeur d'une division en calories, en introduisant l'eau au moyen d'une pipette graduée, plongée d'abord dans une masse d'eau dont la température est indiquée par un thermomètre marquant les trentièmes de degré, comme celui qui est plongé dans le moufle.

Pour obtenir la capacité d'un liquide, il n'y a qu'à en introduire un certain poids à une température connue, dans le tube *oo'*, de manière à occuper à peu près le même volume qu'occupait l'eau quand on a établi la valeur de la calorie. On observe de combien de divisions, *N*, l'extrémité de la colonne de mercure s'est déplacée en *rr'*, quand elle a cessé de se mouvoir, on prend aussitôt la température du liquide, et l'on écrit que la quantité de chaleur qu'il a abandonnée est égale au nombre de calories déduit du nombre *N*. — Quand la température de l'espace dans lequel est placé l'instrument, diffère de la sienne, on tient compte de la chaleur qu'il gagne ou perd par cette cause, en observant, avant d'introduire le liquide, de combien de divisions par minute le mercure marche sous cette influence seule, et l'on ajoute au nombre *N*, ou l'on en retranche, ce nombre de divisions multiplié par la durée, en minutes, de l'expérience. — Si la calorie a été mal déterminée, tous les résultats obtenus sont inexacts, mais leurs rapports restent les mêmes, de sorte qu'il suffit d'en corriger un, en faisant une nouvelle expérience, pour pouvoir corriger tous les autres.

M. Favre, guidé par une longue pratique de son appareil, lui a apporté divers perfectionnements importants. La figure 764 représente un modèle souvent employé aujourd'hui. Le réservoir est de fonte et peut tourner autour de deux tourillons. Quand on veut le remplir de mercure sec, on le renverse, après avoir démonté le tube *mn*, on fait le vide par le robinet *r*, qui est alors en haut, et l'on fait arriver le mercure par un entonnoir dont le bec très-effilé passe par le

robinet *r'*. Il y a deux mouffles de fonte contenant des éprouvettes minces de verre entourées de mercure, et contenant un thermomètre. Les mouvements du niveau *n*, s'observent au moyen d'une petite lunette *L*, permettant d'apprécier $\frac{1}{50}$ de millimètre, et montée sur un socle rectangulaire très lourd, qui s'applique sur l'angle de la table, sur lequel il peut glisser facilement. Il y a avantage à employer un gros réservoir, afin que la température change peu. M. Favre en emploie qui contiennent 7 litres de mercure et portent 7 mouffles verticaux. Il en a même fait construire un de 20 litres muni de 10 mouffles.

Le calorimètre à mercure a été l'objet des critiques de plusieurs physiciens, ce qui se conçoit à cause de l'incertitude théorique qui règne sur la manière dont s'y distribue la chaleur. Mais les épreuves nombreuses et variées auxquelles cet instrument a été soumis par M. Favre et par divers autres physiciens, ont prouvé que lorsqu'il est bien réglé, et installé dans une enceinte dont

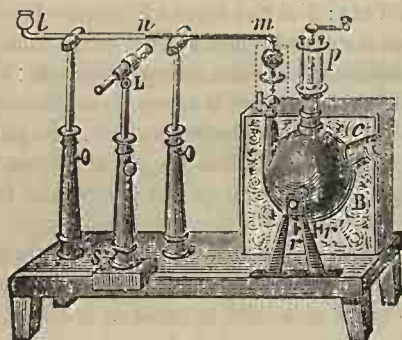


Fig. 764. — $\frac{1}{10}$.

la température est à peu près constante, il donne des résultats précis et prompts, en faisant connaître immédiatement le nombre de calories qu'il reçoit. Il se prête, en outre, à une multitude d'expériences de calorimétrie, dont nous parlerons plus tard, et il est le seul avec lequel on puisse évaluer les quantités de chaleur dégagées dans certains cas.

1062. Calorimètres électro-thermiques. — M. Jamin a construit un calorimètre dans lequel il utilise la chaleur dégagée

dans un fil métallique par le passage d'un courant électrique, comme l'avait déjà imaginé M. Joule qui a découvert les lois de la chaleur ainsi produite. Ce calorimètre, en laiton très-mince, présente la forme d'un gros tube vertical contenant un thermomètre qui donne les centièmes de degré; il est entouré, sur le tiers de sa hauteur à partir du fond, par un fil de maillechort de $\frac{2}{5}$ mm de diamètre et de 8^m de longueur, recouvert de soie et enroulé en hélice. Ce fil, fixé par un ruban de soie, est enveloppé d'une couche de duvet de cygne maintenue par une lame cylindrique de laiton poli ¹.

Pour obtenir, au moyen de ce petit appareil, la capacité d'un liquide, on en verse dans le tube un poids connu, et l'on y fait osciller un agitateur en toile métallique formant corbeille. Quand la température est constante, on fait passer dans l'hélice un courant d'électricité par l'intermédiaire de fils de cuivre assez gros pour ne pas s'échauffer. La chaleur dégagée dans l'hélice fournit au

¹ Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris, t. LXX, pp. 657 et 1237.

calorimètre une quantité de chaleur qui est proportionnelle, comme nous le verrons (T. III), à la résistance de ce fil, au carré de l'intensité du courant, et à la durée du passage. Quand la température s'est élevée dans le liquide, de 3 ou 4°, on supprime le courant, et l'expérience est terminée. On opère de la même manière et pendant le même temps, en prenant l'eau pour liquide. En appelant p et p' les poids de l'eau et du liquide θ et θ' les élévations de température observées dans ces deux liquides, et π l'équivalent en eau du calorimètre intérieur et des pièces solides qu'il contient, les quantités de chaleur fournies par le courant aux deux liquides pendant le même temps étant les mêmes, on aura

$$(p + \pi) \theta = (p'c + \pi) \theta',$$

d'où l'on tirera la valeur de c . Pour obtenir la capacité d'un corps solide, on le place dans la corbeille en mouvement, au milieu d'eau dont le poids est ajouté à π dans le second nombre.

Il faut tenir compte de la chaleur perdue à l'extérieur pendant les quelques minutes que dure l'expérience. On peut, pour cela, procéder en observant le refroidissement du thermomètre après la suppression du courant (1057). Mais M. Jamin a trouvé moyen de se débarrasser de cette correction en plongeant l'appareil dans un bain constamment à la température du liquide qui occupe l'intérieur du calorimètre.

Il enroule en hélice autour de l'enveloppe extérieure de l'appareil, un fil de maillechort 20 fois plus long que celui qui entoure immédiatement le calorimètre, plonge l'appareil dans une masse du liquide en expérience 20 fois plus grande que celle de l'intérieur, et fait passer le même courant dans les deux hélices, de manière que le liquide extérieur s'échauffe et soit toujours sensiblement à la même température que le liquide intérieur.

M. L. Pfaundler, de son côté et à peu près à la même époque, a appliqué, pour mesurer les capacités des liquides, la méthode d'échauffement par un courant électrique. Il procède par comparaison, au moyen de deux calorimètres identiques disposés comme ceux qu'on emploie pour appliquer la méthode des mélanges, et contenant, l'un le liquide à étudier, l'autre de l'eau. Dans chacun d'eux est un thermomètre, un agitateur, et une hélice horizontale en fil de platine. Les deux hélices sont identiques, et on les fait traverser, au moyen de gros fils de cuivre, par un même courant électrique allant de l'une à l'autre, on supprime bientôt le courant, on observe les thermomètres, on calcule les quantités de chaleur reçues par les deux calorimètres, et l'on écrit qu'elles sont égales entre elles, en ayant soin de faire les corrections relatives aux pertes extérieures de chaleur.

M. Pfaundler indique un moyen ingénieux d'éviter ces corrections. Après avoir obtenu une valeur approchée de la capacité du liquide, on répète l'expérience

¹ *Comptes rendus de l'Acad. de Vienne* (janvier 1869), et *Ann. de ch. et ph.*, 4^e s., t. XXII.

en employant un poids tel que son équivalent en eau soit égal au poids de l'eau contenue dans l'autre calorimètre. Les températures, et par suite les pertes, sont alors sensiblement égales à chaque instant dans les deux appareils. — Cette manière de procéder présente, en outre, un avantage important. La quantité de chaleur produite par le courant est proportionnelle à la résistance du fil, qui augmente avec sa température; les quantités de chaleur reçues par les deux calorimètres ne sont donc sensiblement égales que si les températures des liquides sont les mêmes à chaque instant.

1062. Calorimètre à glace par changements de volume. — Les méthodes exposées ci-dessus ne se prêtent pas à l'étude des corps qu'on n'a qu'en très-petite quantité, comme certains corps simples. Pour combler cette lacune, M. R. Bunsen a imaginé un instrument qu'on pourrait appeler *calorimètre-bijou*, et qui peut se construire à la lampe au moyen de tubes de verre.

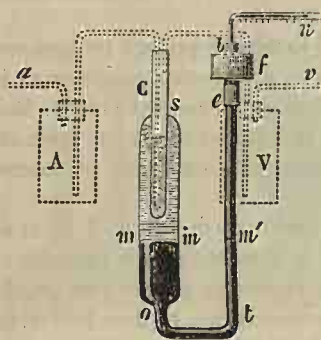


Fig. 765.

La chaleur cédée par le corps est déduite de la fusion de la glace, non par le poids d'eau produit, mais par la diminution de volume, de $\frac{1}{11}$ environ, qui a lieu pendant la fusion. L'appareil consiste en un tube C (fig. 765) qui pénètre dans un tube plus gros, *so*, auquel il est soudé en *s*, et dont une portion *msm* est remplie d'eau, congelée en partie. Au-dessous de *mm* est du mercure qui s'élève dans le tube latéral *t*, dans la douille de fer *f*, puis dans le tube capillaire divisé *bn*, quand on l'y refoule en enfonçant plus ou moins le bouchon *b*. L'instrument étant fixé dans un étai par la douille *f*, si l'on introduit de la chaleur

dans le tube C, un peu de glace est fondue en *msm* et remplacée par de l'eau, qui occupe un moindre volume; le mercure monte donc en *mm*, et l'extrémité *n* de la colonne *nb* se déplace vers *b*, d'un nombre de divisions proportionnel au poids de glace fondue.

Pour connaître quel nombre de calories cédées en C correspond au déplacement d'une division en *n*, on porte l'appareil dans de la neige fondante, et l'on introduit en C un poids *p* d'eau à une température connue θ . Quand cette eau est descendue à 0° , on observe le nombre *N* de divisions dont la colonne *nb* s'est raccourcie. Alors, chaque division, correspond à $p\theta : N$ calories. Dans l'appareil de M. Bunsen, un abaissement de température de $0^\circ,07$ dans l'eau introduite en C, correspondait à un déplacement de 20 divisions en *n*.

Voyons maintenant comment on remplit l'appareil d'eau bien privée d'air, condition essentielle pour obtenir de bons résultats, et comment on y forme la

¹ Ann. de Pogg., t. CXLI, pp. 1 et 31, et Ann. de ch. et de ph., 4^e sér., t. XXIII, p. 50.

glace. Après avoir renversé l'appareil, on y fait bouillir de l'eau qui en remplit la moitié, pendant que le tube *m't* débarrassé de sa douille *f*, plonge dans de l'eau bouillante. Quand tout l'air est bien expulsé, on cesse de chauffer l'appareil, il se remplit d'eau bouillante, et quand il est refroidi, on verse du mercure bouilli jusqu'en *mm m'*, on enlève ensuite l'eau en *m't*, au moyen d'une pipette et de papier Joseph, et l'on achève de dessécher le tube *t* en y faisant passer un courant d'air sec au moyen d'une pompe aspirante, on mastique la douille *f*, et l'on achève de remplir le tube *t* de mercure.

On fait ensuite communiquer le calorimètre C avec deux vases fermés représentés en lignes ponctuées (*fig.* 765) et munis de divers tubes. Le premier, V, est vide, le second, A, contient de l'alcool. Ils sont tous deux plongés dans des mélanges réfrigérants à -20° . Si l'on aspire en V, l'alcool très-froid, est poussé dans le calorimètre C, par la pression atmosphérique agissant en *a*. Quand ensuite on aspire en *a*, il rentre dans le vase A et est remplacé par l'air refroidi qui vient de V. En répétant plusieurs fois cette double opération, on voit la glace se former autour du tube C. On met ensuite l'appareil dans la neige fondante, on enfonce le bouchon *b* de manière que l'extrémité *n* de la colonne de mercure arrive au zéro de la division, et l'on procède aux expériences.

Pour contrôler l'exactitude de cette nouvelle méthode, M. Bunsen a opéré sur divers corps dont la capacité avait été déterminée avec une grande précision par la méthode des mélanges, et il a trouvé l'accord le plus satisfaisant entre ces capacités et celles que lui a données son appareil.

1063. Résultats généraux. — Il résulte de nombreuses expériences, faites principalement par la méthode des mélanges, que les liquides ont généralement une plus grande capacité pour la chaleur que les solides. L'eau présente, à peu près, la plus grande chaleur spécifique; les capacités des autres corps seront donc exprimées par des fractions. C'est à cause de cette grande capacité que l'eau s'échauffe et se refroidit si lentement. De là aussi son grand pouvoir refroidissant. C'est en absorbant beaucoup de chaleur qu'elle peut ensuite la transporter et la répandre en grande quantité, dans les calorifères à eau chaude (976).

En général, un même corps présente une plus grande capacité à l'état liquide qu'à l'état solide, résultat important, découvert par Irvine; par exemple, la capacité de la glace est la moitié de celle de l'eau. Cependant, il y a des corps, comme le mercure, le phosphore, pour lesquels la différence des capacités sous les deux états est à peine sensible.

Relation avec la densité. — Les corps les moins denses ont généralement la plus grande capacité. Ce sont aussi les moins conducteurs. Ainsi, les métaux, qui sont des corps très-denses, ont une faible capacité, et surtout les plus denses. Par exemple l'or, le platine, le mercure ont pour chaleur spécifique 0,032 environ; d'où il résulte que la quantité de chaleur nécessaire pour porter l'eau de 0° à 100° , élèverait la température d'un même poids de ces métaux, à 3125° , c'est-à-dire au-dessus du rouge-blanc. L'argent a pour capacité 0,056; le cuivre, le zinc, 0,095; le fer, le nickel, 0,11; le potassium, moins dense que

l'eau, a donné 0,17. — Le mercure qui est très-dense possède, malgré son état liquide, une faible capacité 0,033, ce qui est favorable à son emploi dans la mesure des températures.

L'oxydation diminue la densité des métaux et augmente leur chaleur spécifique. C'est, en général, à l'état gazeux qu'une même substance présente la plus grande capacité et la plus faible densité. Pour citer le cas extrême, le gaz hydrogène (1087), le moins dense de tous les corps, a la plus grande capacité, 3,4; c'est la seule, avec l'alcool contenant plus de 0,66 d'eau, qui soit supérieure à celle de l'eau. Enfin, un accroissement de température diminue la densité des corps et augmente leur capacité, comme nous allons le voir.

1061. Variations de capacité d'une même substance. — La capacité d'un corps solide dépend du mode d'agrégation de ses molécules, et des actions physiques ou mécaniques auxquelles il a été soumis: On peut dire, en général, que tout ce qui augmente la densité et la force d'agrégation des molécules diminue la capacité calorifique. Wedwood a remarqué que l'argile cuite possède une capacité d'autant plus faible qu'elle a éprouvé un retrait plus prononcé par la calcination.

M. Regnault a obtenu les résultats suivants, par la méthode des mélanges, en suivant la marche que nous expliquerons plus loin (1071). La capacité du colcothar diminue à mesure que la calcination produit une agrégation plus grande, et cette capacité finit par devenir égale à celle du fer oligiste naturel. L'oxyde de nickel calciné à la forge, donne une capacité sensiblement plus faible que lors qu'il a été simplement calciné au rouge. — Du cuivre rouge bien ductile, dont la capacité est 0,09501, a donné 0,09360, après avoir été écroui à coups de marteau; le recuit lui a rendu sa capacité primitive. Les capacités du plomb et de l'étain n'ont pas changé, après qu'on les eut frappées au balancier; mais leur densité n'avait pas non plus varié. L'acier, le métal des cymbales, les larmes bataviques, recuits ou trempés, n'ont donné que des différences douteuses.

Le carbonate de chaux, le soufre et surtout le carbone présentent des capacités très différentes suivant leur état physique, comme on le voit dans le tableau suivant, tiré des expériences de M. Regnault.

CARBONATE DE CHAUX	SOUFRE	CARBONE
Aragonite 0,2085	Fondu récemment.. 0,1844	Noir animal 0,2608
Spath d'Islande... 0,2085	Fondu depuis 2 mois 0,1803	Charbon de bois... 0,2415
Craie 0,2148	Fondu depuis 2 ans. 0,1764	Coke, anthracite.. 0,2008
Marbre blanc sac-	Cristallin naturel.. 0,1776	Graphites divers. . 0,2018
charoide 0,2158		Diamant..... 0,1468

Nous avons vu (I, 548) que l'état cristallin du soufre coulé change avec le temps; c'est pour cela que sa capacité se rapproche peu à peu de celle du soufre naturel.

Delarive et Marect, par la méthode du refroidissement¹, ont trouvé pour le diamant 0,1192. Du charbon provenant d'une même branche de peuplier leur a donné le nombre 0,2964. Après avoir été trempé (en le portant au rouge blanc dans un creuset de platine hermétiquement fermé qui fut ensuite plongé dans l'eau), il donna le nombre 0,2009. Il est à remarquer que la densité avait varié par la trempe, à peu près en raison inverse de la capacité. En général; plus un charbon est divisé, plus sa chaleur spécifique est considérable.

1065. Variation de la capacité avec la température. — Il résulte de l'ensemble de toutes les expériences que, *jusqu'à 100°*, la *chaleur spécifique des solides est constante*. Dalton a avancé, depuis, que la capacité calorifique d'un corps doit augmenter avec sa température, une partie de la chaleur devant être employée à produire la dilatation. — Pour vérifier cette conjecture, Dulong et Petit ont fait des expériences jusqu'à 300°, et ils ont reconnu que *la capacité des corps solides augmente avec leur température à partir de 100°*. Ils ont employé la méthode des mélanges; le corps, façonné en anneau plat afin qu'il présentât beaucoup de surface, était échauffé dans un bain d'huile ou de mercure bouillant. On tenait compte de la couche d'huile adhérente, en mesurant d'avance son poids à la température de l'expérience. Voici les résultats trouvés :

SUBSTANCES	CAPACITÉS MOYENNES		T
	entre 0° et 100°.	entre 0° et 300°.	
Fer.	0,1098	0,1218	332°,2
Mercure.	0,0330	0,0350	318,2
Zinc.	0,0927	0,1015	328,5
Antimoine.	0,0507	0,0549	324,8
Argent.	0,0557	0,0611	329,3
Cuivre.	0,0949	0,1013	320,0
Platine.	0,0335	0,0355	317,9
Verre.	0,1770	0,1990	322,1

Cas des corps faciles à fondre. — L'augmentation de la capacité avec la température est d'autant plus prononcée que les corps sont plus près de leur point de fusion. Pour les corps peu fusibles du tableau, elle ne se manifeste qu'au-delà de 100°, et l'accroissement est surtout très-faible pour le *platine*, qui est le métal le plus difficile à fondre. Pour le *plomb*, qui est beaucoup plus rapproché de son point de fusion, M. Regnault a trouvé 0,03065, entre 10° et — 77°, 75, température obtenue en le plongeant dans l'acide carbonique solide;

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXXV, p. 143; et 3^e s., t. II, p. 421.

et 0,0313, entre 10° et 100°. Le *phosphore*, qui fond à 45°, a donné les capacités moyennes 0,1740, de — 77°,55 à 10°; 0,1788, de — 21° à 70°; et 0,1887, de — 10° à 30°.

1066. Pyromètre calorimétrique. — La colonne marquée T dans le tableau précédent, indique les températures correspondantes à 300° du thermomètre à air, telles qu'elles seraient déduites de la capacité, *supposée constante*, des diverses substances. Ces températures T, se calculent au moyen de l'équation

$$Pc(T - 0) = (P + \pi y)(0 - t); \quad \text{d'où} \quad T = \frac{P + \pi y}{Pc}(0 - t) + 0,$$

qui exprime que la chaleur perdue par le corps est égale à celle que gagne le calorimètre, et dans laquelle on remplace *c* par la chaleur spécifique du corps supposée la même à toutes les températures.

On tire de là un moyen pyrométrique très-simple : on plonge une masse de platine, dans le milieu dont on veut connaître la température, et on la porte ensuite dans l'eau d'un calorimètre, dont l'échauffement fait connaître la température du platine. — Si l'on ne connaissait pas la capacité de ce métal, on ferait deux observations avec deux masses de platine égales ou inégales, et deux appareils différents; ce qui donnerait deux équations entre lesquelles on éliminerait la chaleur spécifique.

Les températures obtenues par ce moyen ne sont pas comparables à celles du pyromètre à air, la chaleur spécifique augmentant avec la

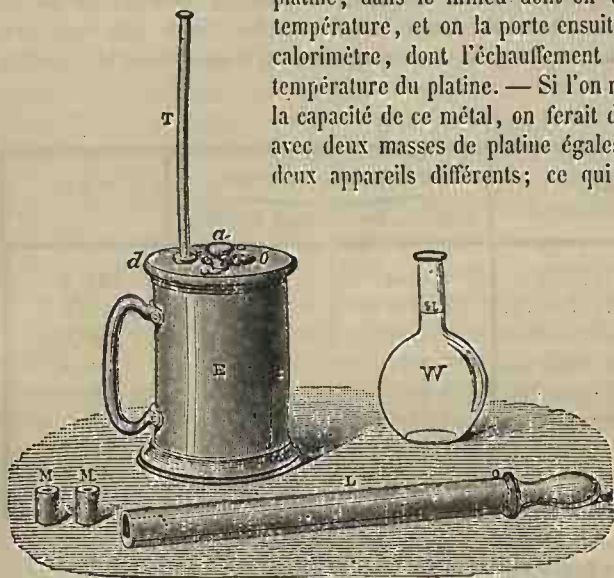


Fig. 766.

température; mais avec le platine, les résultats doivent laisser peu à désirer, comme il résulte du tableau précédent. On obtiendrait encore de meilleurs résultats, si l'on connaissait les chaleurs spécifiques moyennes du platine entre 0° et diverses températures très-élevées. Après avoir calculé la température du platine, au moyen de la capacité qui correspond à cette température inconnue évaluée par estime, on se servirait de la capacité qui correspond à la tempéra-

ture ainsi obtenue, pour en calculer une nouvelle valeur plus exacte. Pour cet objet, Pouillet a mesuré les chaleurs spécifiques moyennes du platine entre 0° et les températures ci-dessous, et il a trouvé les nombres suivants :

100°	300°	500°	700°	1000°	1200°
0,0325	0,03434	0,03518	0,03602	0,03728	0,03818

Ces résultats ont été obtenus par la méthode des mélanges. La boule de platine échauffée était jetée dans un panier en fil de cuivre plongé dans l'eau, et dont on tenait compte dans le calcul.

Dans l'industrie, où la promptitude des opérations est plus recherchée qu'une très grande précision, on suppose la capacité constante. M. J. Salleron a alors rendu la méthode pratique au moyen de l'appareil (fig. 766 et 767). Le calorimètre G, enveloppé de feutre, est soutenu dans un cylindre de laiton E, par un anneau de bois d, et est fermé par un couvercle aussi de bois, muni d'une large ouverture o, par laquelle on introduit la masse métallique, M. Cette masse, en forme de cylindre, est engagée dans l'extrémité d'un long tube de fer à manche de bois L, dans lequel elle est retenue en bas par un rebord, qu'il suffit de tourner en haut pour que le cylindre glisse et s'échappe. On le porte, au bout de ce tube, dans le milieu dont on veut connaître la température, et on le laisse tomber dans le calorimètre, sur l'agitateur a, sans qu'il ait perdu sensiblement de sa chaleur pendant le transport. On observe la température maximum donnée par le thermomètre T, et l'on applique la formule ci-dessus.

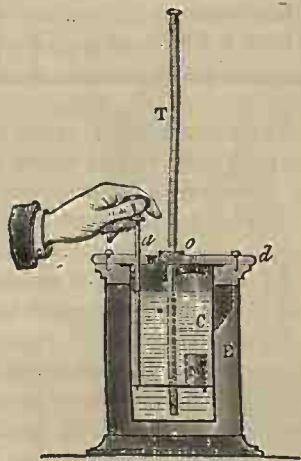


Fig. 767.

Si le cylindre M est en *cuivre*, dont la capacité est $C = 0,095$, si son poids est de 106^{gr}, et enfin si le calorimètre contient un poids d'eau p , tel que $p + \pi y = 500^{\text{gr}}$, l'équation devient

$$T = 50 (0 - t) + 0 ; \quad \text{et} \quad T = 100 (0 - t) + 0 ,$$

si l'on emploie un cylindre de platine pesant 157^{gr}, dont la capacité est 0,032. Le poids p d'eau se détermine au moyen de son volume, dans le vase V (fin 766) jaugé pour chaque appareil, et changeant d'un appareil à l'autre.

1067. Variation de la capacité des liquides. — C'est surtout chez les liquides que les variations de la capacité avec la température sont sensibles, même au-dessous de 100°. Cela se voit dans le tableau suivant, qui contient une partie des résultats obtenus par M. Regnault, par des méthodes que nous décrirons plus loin (1071).

LIQUIDES	CAPACITÉS MOYENNES		
	de 20° à 15°.	de 15° à 10°.	de 10° à 5°.
Mercure.....	0,0290	0,0283	0,0282
Alcool à 36°.....	0,6725	0,6651	0,6588
Acide acétique cristallisable.....	0,4618	0,4599	0,4587
Térébène.....	0,4267	0,4156	0,4154
Essence de citron.....	0,4501	0,4424	0,4489
Chlorure de titane.....	0,1828	0,1802	0,1810
Chlorure de soufre.....	0,2038	0,2024	0,2048
Sulfure de carbone.....	0,2206	0,2183	0,2179
Ether sulfurique.....	0,5157	0,5158	0,5207
Esprit de bois.....	0,6009	0,5868	0,5901

Le *brôme* a donné la capacité moyenne 0,10513, de -6° à 10° , et 0,11294, de 13° à 58° ; et l'*essence de térébenthine* 0,426, de 15° à 20° , et 0,4672 de 15° à 100° ; l'accroissement est donc considérable. Il provient, au moins en partie, de l'absorption d'une plus grande quantité de chaleur, occasionnée par l'accroissement de la dilatation quand la température augmente (1012).

La capacité moyenne d'un liquide étant une fonction de sa température, on peut représenter les quantités totales de chaleur qu'il absorbe entre 0° et t° par la formule empirique $C = at + bt^2 + ct^3$. On détermine les constantes au moyen de trois observations faites entre 0° et trois valeurs de t . En divisant C par t , on obtient la *capacité moyenne* entre 0° et t° .

On peut représenter les variations de capacité des liquides, par une construction graphique. La courbe, dont les ordonnées correspondent aux capacités, est convexe vers l'axe des x , sur lequel on compte les températures prises à partir de 0° ; et l'accroissement de chaleur spécifique pour 1° , est représenté, pour une température donnée, par la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'axe des x , la tangente à la courbe au point considéré; ce qui suppose que la courbe se confond avec une ligne droite dans l'espace qui correspond à une différence de température de 1° .

1068. Chaleur spécifique de l'eau. — M. Regnault a étudié spécialement les changements de capacité de l'eau, à l'occasion de ses expériences sur les vapeurs¹. L'appareil dont il a fait usage se compose d'un calorimètre en tôle galvanisée, *Sr* (fig. 768), muni d'un agitateur *nm*, et surmonté d'un tube de verre gradué *e*. L'eau dont on veut évaluer la capacité est échauffée dans une chaudière de cuivre *C*, de 70 litres, dont les parois, de 5^{mm} d'épaisseur, sont consolidées par une forte armature de fer, de manière à pouvoir supporter de

¹ *Mémoires de l'Institut* (Académie des sciences), t. XXI, p. 729.

fortes pressions. La chaudière est fermée par un couvercle solidement boulonné, muni de deux tubes de fer fermés à leur partie inférieure, remplis d'huile, et dans lesquels plongent deux thermomètres τ , τ . A la paroi latérale est adapté un robinet R, précédé d'un tube T, qui s'enfonce presque jusqu'au fond de la chaudière, et dont l'extrémité est ouverte sur le côté. A l'opposé, le robinet R porte un autre tube Rm, qui pénètre jusqu'au milieu du calorimètre, et dont l'extrémité, fermée, porte sur son contour un grand nombre de trous. Le calorimètre est préservé du rayonnement de la chaudière par un écran de tôle, *ab*, dans lequel on fait passer un courant d'eau qui s'échappe par le tube recourbé S, qui, sur la figure, passe derrière le calorimètre. La capacité de ce calorimètre, jusqu'au zéro de la division du tube *e*, a été déduite du poids d'eau qu'il contient à une température connue. On a évalué de même le volume d'une division du tube *e*.

Pour faire une expérience, on comprime de l'air dans la chaudière, de manière à retarder l'ébullition jusqu'à la température à laquelle on veut porter l'eau. Quand l'ébullition a lieu, on remplit le calorimètre jusqu'au zéro du tube *e* (fig. 768); on extrait, par le robinet *r*, une certaine quantité d'eau que l'on pèse, et l'on observe le thermomètre *t*. On ouvre ensuite le robinet R; l'eau bouillante est chassée dans le calorimètre, et l'on observe le niveau dans le tube *h*. Quand on voit qu'il est près d'atteindre le tube *e*, on ralentit l'arrivée de l'eau, et l'on ferme tout à fait le robinet R quand le niveau arrive vers le milieu du tube *e*. On observe en même temps le thermomètre *t*. Le poids de l'eau introduite se déduit du volume qu'elle occupe et du poids de celle que contenait d'abord le calorimètre, et l'on fait toutes les corrections relatives à la chaleur perdue au dehors, et à celle qui passe par conductibilité à travers le tube Rm.

Voici les principaux résultats trouvés par M. Regnault, pour les capacités moyennes de l'eau entre 0° et les températures du thermomètre à air :

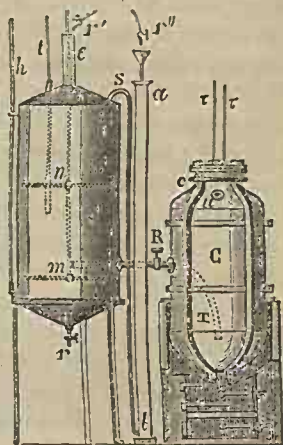


Fig. 768.

VALEURS DE <i>c</i> .		VALEURS DE <i>c</i> .	
De 0° à 40°.....	1,0013	De 0° à 160°.....	1,0109
De 0° à 80°.....	1,0035	De 0° à 200°.....	1,0160
De 0° à 120°.....	1,0067	De 0° à 230°.....	1,0204

Ces résultats sont représentés par la formule

$$C = t + 0,00002 t^2 + 0,0000003 t^3,$$

quand on divise C par *t*. On voit que l'augmentation de capacité de l'eau est peu

prononcée jusqu'à 200°; elle est à peine sensible au-dessous de 100°, ce qui est très-favorable à la mesure des capacités par la méthode des mélanges.

Eau vers 4°. — On s'est demandé si la chaleur spécifique de l'eau ne présentait pas quelque anomalie vers le maximum de densité. Il résulterait de certaines expériences faites par la méthode des mélanges, que la capacité de l'eau aurait un maximum vers 7°, ce qui conduirait à rejeter toutes les mesures calorimétriques exécutées entre 0° et 10°. Mais des expériences postérieures, indépendantes les unes des autres¹, faites par MM. Hirn, Regnault, Jamin et Amaury, ont montré que *la capacité de l'eau ne présente rien d'anormal dans le voisinage de 4°*. M. Hirn procédait en cherchant de combien s'échauffait une masse d'eau dans laquelle il introduisait une même quantité de chaleur, quand elle était prise à différentes températures à partir de 0°. — MM. Jamin et Amaury se servaient de l'électro-calorimètre disposé de manière à annuler les pertes extérieures de chaleur (1062). Ils ont vu les températures de l'eau intérieure toujours agitée, observées de 6 minutes en 6 minutes, croître régulièrement de 0° à 75°. — M. Regnault prenait la *capacité* d'une masse de plomb par la méthode des mélanges, l'eau du calorimètre étant successivement à 2°, 3°, 4°, ... 10°, et il a toujours trouvé le même résultat. Il a, en outre, employé la méthode du refroidissement au moyen du *thermo-calorimètre*, thermomètre à alcool dans le réservoir duquel s'enfonce un tube, comme dans le sympiezomètre (1051). Ce tube étant rempli d'eau, on chauffait l'appareil à 30°, on le portait dans une enceinte à 0°, et l'on suivait la marche de son refroidissement à l'aide d'un chronomètre. On construisait ensuite la courbe des excès de température en fonction du temps, et cette courbe était régulière. Peut-être y eut-il une légère inflexion vers 4°; mais si faible qu'on peut la regarder comme très-douteuse. On voit donc que si la capacité de l'eau présente une anomalie vers 4°, elle est très-indécise à cause de son extrême faiblesse; ce qui ne doit pas étonner quand on considère que la diminution de volume de l'eau, de 0° à 4°, dépasse à peine 0,0001, et que la capacité moyenne entre 0° et 80° ne dépasse l'unité que de 0,0035, quand l'augmentation de volume est, d'après Despretz, de 0,02885.

1069. Capacité des sels hydratés. — La quantité de chaleur nécessaire pour élever de 4° la température d'un *mélange* de plusieurs corps, est égale à la somme des quantités qu'absorbe chaque corps; de manière que, si l'on appelle $m, m', m'' \dots$ les masses de plusieurs corps, et $c, c', c'' \dots$ leurs chaleurs spécifiques, celle du mélange sera $\frac{mc + m'c' + m''c'' \dots}{m + m' + m'' \dots}$, c'est-à-dire la moyenne. Person a reconnu que les sels hydratés sont dans ce cas; leur capacité est représentée par $\frac{mc + m'c'}{m + m'}$, en désignant par m, m' les proportions de sel et d'eau combinés, et en prenant pour c la chaleur spécifique du sel anhydre, et pour c' la *chaleur spécifique de la glace*. Il résulte de là ce fait remarquable, que

¹ Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris, t. LXX, pp. 592, 664 et 664.

l'eau combinée dans les sels est à l'état solide, ou du moins possède la même capacité qu'à l'état solide. — Il résulte aussi des recherches de Person, que *vice versa*, la capacité d'un sel dissous dans l'eau est celle qu'il possède à l'état liquide; car ce n'est que dans cette supposition que la loi se vérifie avec quelque approximation¹.

II. Lois des chaleurs spécifiques des atomes.

1070. LOI DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DES ATOMES SIMPLES. — Dulong et Petit, ayant mesuré, par la méthode du refroidissement, la chaleur spécifique de treize corps simples, ont découvert, en 1819, la loi suivante, une des plus belles de la physique : *les atomes de tous les corps simples possèdent la même capacité pour la chaleur*². Pour établir cette loi, il a suffi de prouver que *le produit de la chaleur spécifique d'un corps par son poids atomique est constant*. En effet, la chaleur spécifique rapportée à l'unité de poids étant C , celle du poids atomique p sera $C \times p$, et la loi peut s'énoncer en disant que *les chaleurs spécifiques des corps simples sont en raison inverse de leurs poids atomiques*. Cela posé, les poids atomiques relatifs étant déterminés par les lois de la chimie, le produit $C \times p$ a été trouvé à peu près constant, et égal à 37 environ. Les différences ne doivent pas être attribuées seulement aux incertitudes des méthodes d'expérience, mais encore à l'influence de l'état du corps sur sa chaleur spécifique (1065).

Il existe plusieurs corps simples dont les poids atomiques n'ont pu être déterminés d'une manière certaine par la chimie. L'hésitation porte alors sur des nombres qui sont des multiples très-simples les uns des autres. La loi de Dulong et Petit indique alors le nombre qui doit être adopté.

1071. Expériences de M. Regnault. — Depuis la découverte de cette loi des capacités des atomes, les progrès de la chimie ont conduit à changer le poids atomique de quelques corps qui dès lors ne satisfirent plus à la loi. M. Regnault a alors entrepris de nouvelles expériences, qui ont confirmé la loi, en montrant que quelques-unes des capacités adoptées par Dulong et Petit étaient erronées, ce qui provenait des incertitudes de la méthode du refroidissement (1059). M. Regnault a adopté la méthode des mélanges, après l'avoir considérablement perfectionnée.

Étude. — La substance à étudier est mise, en fragments, dans une petite corbeille en fil de laiton O (fig. 769), au milieu de laquelle est ménagé un espace cylindrique qui reçoit le réservoir d'un thermomètre. Cette corbeille est suspendue, par des fils de soie, dans une étuve dont on voit la coupe en *vr*. Elle est composée de trois enveloppes de fer-blanc. L'espace *o* est rempli d'air; l'espace *vv* est parcouru par un courant de vapeur d'eau, qui vient de la chaudière C, et passe

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIII, p. 437.

² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. X, p. 395.

ensuite, par le tube n, n' , dans un condensateur à serpentin, R. L'enveloppe extérieure retient une couche d'air qui empêche le refroidissement.

La figure 770 représente une autre étuve, imaginée plus récemment par M. Regnault (1). La vapeur, venant de la chaudière C chauffée au gaz, se rend, par le tube m , dans l'espace l , et redescend tout autour. La partie condensée retourne à la chaudière par le tube c , et le reste se rend, par le tube n , dans le système ov où elle se condense par le froid produit par un courant d'eau, qui arrive en r et sort en α . Cette disposition permet d'employer d'autres vapeurs que celle de l'eau, et de produire l'ébullition sous différentes pressions, en faisant communiquer l'orifice o avec un réservoir d'air comprimé.

Calorimètre. — Le calorimètre c (fig. 769), de laiton très-mince, est posé sur des fils de soie tendus sur un petit chariot, qu'on fait glisser sur un rail, pour,

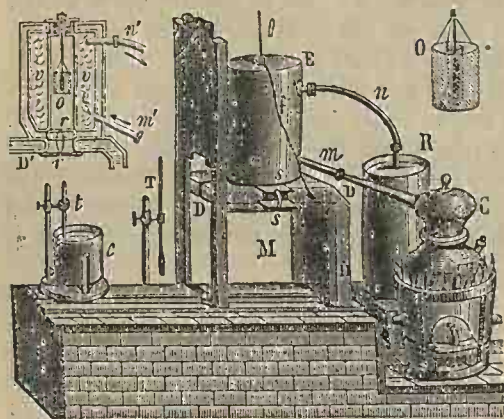


Fig. 769.

l'amener en M au-dessous de l'étuve. Une enveloppe coulée en fer-blanc DDD, remplie d'eau souvent renouvelée, préserve l'espace M du rayonnement de l'étuve et de la chaudière C. En rr, ss est une ouverture, fermée au moyen d'un double registre, par laquelle on peut faire descendre la corbeille dans le calorimètre c amené en M. Un thermomètre, t , dont le réservoir occupe toute la profondeur du calorimètre, en donne la température.

Le thermomètre fixe T donne celle de l'air pour les corrections.

Dans chaque expérience, on attend que le thermomètre 0 de la corbeille soit devenu stationnaire, ce qui exige environ deux heures; on attend encore une heure au moins, on observe de loin, avec une lunette, les thermomètres t et T, et l'on amène le calorimètre en M, en levant l'écran e . On tire le registre rr, ss , et l'on fait descendre la corbeille dans le calorimètre c , qu'on ramène ensuite devant la lunette. Un aide agite la corbeille dans l'eau, pendant qu'on observe la marche du thermomètre t , qui atteint son maximum au bout de 1 à 2 minutes.

On corrige le résultat observé, de la perte due au milieu extérieur, en suivant une méthode analogue à celle que nous avons exposée plus haut (1058). Le calorimètre, d'abord à 1 ou 2° au-dessous de la température ambiante, se trouvait, à la fin de l'expérience, à 1 ou 2° au-dessus.

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LXXIII, p. 49, et 3^e série, t. LXIII, p. 5.

Soit p le poids de l'eau du calorimètre, y compris l'équivalent du vase en eau ; P le poids du corps ; T, t , les températures initiales du corps et de l'eau, et θ la température maximum du mélange ; π et c le poids et la chaleur spécifique de la corbeille, et enfin θ' la correction motivée par l'action du milieu ambiant, on aura pour déterminer x ,

$$(Px + \pi c) (T - \theta) = p (\theta + \theta' - t).$$

Dans les expériences de M. Regnault, θ' n'était que de $0^{\circ},03$ à $0^{\circ},04$.

Quand la matière est pulvérulente, comme certains métaux et la plupart des oxydes métalliques, on cherche à l'agréger par la compression et le choc ; ou bien on l'humecte et on la pétrit en forme de boulettes que l'on calcine. Quand ces moyens ne réussissent pas, la substance est tassée dans des tubes de laiton très-mince, de 60^{mm} de longueur sur 15 de diamètre et dont on tient compte dans le calcul. Il faut alors 10 à 15 minutes pour que le calorimètre arrive au maximum, à cause de la mauvaise conductibilité de la substance ; ce qui rend les résultats moins sûrs. De plus, il y a une autre cause d'erreur : le maximum persiste pendant plusieurs minutes, ce qui prouve que le calorimètre, perdant alors autant de chaleur qu'il en reçoit du corps, ce dernier n'a pas exactement la température de l'eau. M. Regnault a trouvé moyen de calculer approximativement l'excès de température du corps sur l'eau. Mais il est préférable de plonger le corps pulvérulent dans ce liquide, quoiqu'il y ait de la chaleur dégagée par l'effet de l'imbibition, comme nous le verrons plus tard ; l'erreur qui en provient étant toujours très-petite. — Quand le corps est soluble dans l'eau, on remplace ce liquide par l'essence de

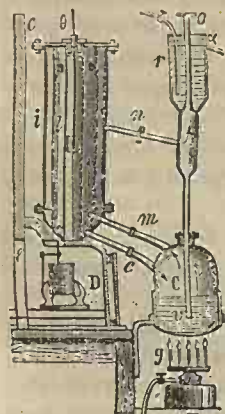


Fig. 770.

térébenthine, dont la capacité est déterminée d'avance. Ce liquide est même préférable pour les corps dont on n'a que de petites quantités, sa capacité, 0,43, étant beaucoup plus faible que celle de l'eau.

Pour soumettre à un contrôle décisif la méthode expérimentale qui précède, M. Regnault l'a appliquée à la mesure de la chaleur spécifique de l'eau ; il a trouvé, dans deux expériences faites sur ce liquide à 97° , les valeurs 1,00709, 1,00890 ; et comme nous savons que la chaleur spécifique de l'eau augmente avec la température, même avant 100° (1068), on voit que la méthode ne comporte que des erreurs négligeables.

1072. Autres méthodes. — M. Regnault est revenu à plusieurs reprises sur la mesure des capacités des corps simples, toutes les fois qu'il pouvait se procurer des échantillons purs. Dans certains cas, par exemple quand il lui fallait opérer à une basse température, il a fait usage de l'appareil (fig. 771), que nous décrivons en indiquant comment il a été employé pour mesurer la

capacité du sodium au-dessous de 0° . Le métal, coulé sous l'huile de naphte, en forme de cylindre creux, et enveloppé d'une feuille d'étain, était refroidi dans un cylindre de laiton AB, fixé dans une cuve CD, remplie d'un mélange de glace pilée et de chlorure de calcium, remué au moyen de l'agitateur *aa*. Le

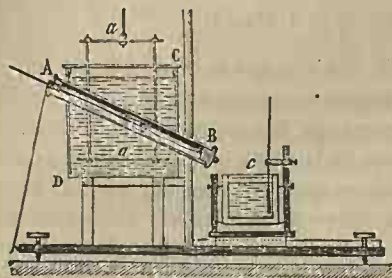


Fig. 771.

tube était fermé par des obturateurs A, B. Quand la température du sodium, donnée par le thermomètre, était constante, ce qui avait lieu vers -30° , on laissait descendre le métal, retenu par un fil de soie, dans un calorimètre *c* rempli d'huile de naphte. Ce liquide était refroidi, et l'on déduisait de la température finale et des autres données de l'expérience, la capacité du sodium par rapport à l'huile de naphte. La capacité de ce liquide

par rapport à l'eau était ensuite déterminée en y plongeant une masse de plomb dont la capacité était connue. Il est facile de voir que l'appareil peut aussi servir pour des températures élevées¹.

1073. Liquides. — Pour mesurer la capacités des liquides au moyen des appareils précédents, on les renferme dans de petits tubes de verre mince scellés à la lampe.

Dans ses expériences les plus récentes, M. Regnault a opéré par une méthode analogue à celle qui lui avait servi pour l'eau dans les hautes températures (1068).

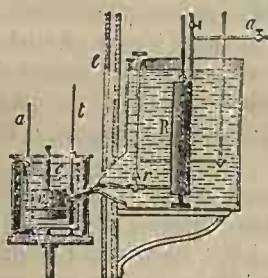


Fig. 772.

Le liquide est renfermé dans un réservoir cylindrique R (fig. 772) plongé dans un bain continuellement agité, qui lui communique une température fixe. On ouvre le robinet *r*, et le liquide comprimé par de l'air qu'on a introduit par le tube *a*, est chassé dans un vase V plongé au milieu de l'eau du calorimètre *ce*, et sans changer sensiblement de température, à cause du renflement *m* qui enveloppe le tube *r*. On observe le thermomètre *t'* et l'on achève l'opération comme à l'ordinaire.

1074. Résultats. — Le tableau suivant contient les principaux résultats obtenus par M. Regnault avec les corps simples. Nous avons remplacé les nombres qu'il avait d'abord publiés pour quelques corps, par ceux qu'il a obtenus plus récemment en opérant sur des échantillons plus purs.

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XLVI, p. 269.

SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques C	POIDS atomiques adoptés p	PRODUIT C × p
<i>Déterminations préliminaires.</i>			
Laiton	0,09391	»	»
Verre.....	0,19768	»	»
Eau.....	1,0080	»	»
Essence de thérebenthine.....	0,42593	»	»
<i>Corps simples solides.</i>			
Fer.....	0,11379	339,21	38,597
Zinc.....	0,09555	403,23	38,526
Cuivre.....	0,09515	395,70	37,849
Cadmium.....	0,05669	696,77	39,502
Argent.....	0,05701	675,80	38,527
Arsenic.....	0,08140	470,04	38,261
Plomb.....	0,03140	1294,50	40,647
Bismuth.....	0,03084	1312,00	40,460
Antimoine.....	0,05077	806,45	41,029
Étain des Indes.....	0,05623	735,29	41,345
Nickel.....	0,11080	350,00	37,620
Cobalt.....	0,10620	350,00	37,170
* Manganèse (carburé).....	0,12170	325,00	39,550
* Uranium.....	0,06190	677,84	41,960
* Tungstène.....	0,03342	1150,00	38,430
* Molybdène.....	0,07218	598,52	43,163
Osmium.....	0,03063	1244,2	38,110
* Aluminium.....	0,2181	170,98	35,150
Magnésium.....	0,2499	150,00	37,485
Rhodium.....	0,05803	652,1	37,840
* Iridium.....	0,3259	1233,20	40,190
Platine laminé.....	0,03243	1233,50	39,993
Palladium.....	0,05927	665,90	39,468
Or.....	0,03244	1243,01	40,328
Soufre.....	0,20259	201,17	40,754
Sélénium.....	0,07616	494,58	37,667
Tellure.....	0,04737	801,76	38,200
Pota-sium.....	0,16956	245,00	41,642
Sodium.....	0,2934	143,60	42,100
Iode.....	0,05412	789,75	42,703
Charbon.....	0,24111	152,88	36,860
Phosphore.....	0,1887	196,14	37,024
<i>Corps simples liquides.</i>			
Mercure.....	0,03332	1265,82	42,149
Mercure solide.....	0,03241	»	»
Brôme liquide.....	0,11094	»	»
Brôme solide (— 28°).....	0,08432	489,1	41,2

La chaleur spécifique du potassium a été prise en le refroidissant dans l'acide carbonique solide, et cherchant l'abaissement de température qu'il faisait éprouver

à l'huile de naphte renfermée dans un petit calorimètre¹. Pour le mercure solide, après l'avoir renfermé dans une ampoule de verre, terminée par une longue tige de verre effilée, par laquelle on pouvait la transporter et l'agiter dans le calorimètre, on le congelait dans l'acide carbonique solide, à $-77^{\circ},75$. La chaleur abandonnée au mercure par le calorimètre se compose : 1° de celle qui est nécessaire pour échauffer le mercure solide de $-77^{\circ},75$ à -40° , qui est son point de fusion, 2° de la chaleur que le mercure absorbe pour passer de l'état solide à l'état liquide; 3° de la chaleur absorbée par le mercure liquide pour passer de -40° à la température finale, 0, du calorimètre; 4° de la chaleur que prend l'ampoule de verre pour passer de $-77^{\circ},75$ à 0. La chaleur nécessaire pour la fusion étant connue, ainsi que la chaleur spécifique du mercure liquide, on calculait facilement la chaleur absorbée par le mercure solide pour passer de $-77^{\circ},75$ à -40° .

Le brome a été étudié, par un moyen analogue, à l'état liquide et à l'état solide; c'est à l'état solide qu'il satisfait à la loi.

La loi des atomes ressort du tableau qui précède; car les poids atomiques cités varient de 150 à 1312, tandis que les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques ne varient que de 35 à 43. Ces variations sont sans doute bien plus grandes que celles qui résultent des erreurs d'observation, mais il faut considérer qu'on n'est pas assuré de la pureté de certains métaux rares, que la chaleur spécifique est mesurée à des distances différentes du point de fusion des divers corps, et qu'elle augmente pour un même corps à mesure qu'on s'approche de ce point (1066). De plus, sa valeur dépend de l'état physique de la substance, comme nous l'avons vu (1065), et aussi de l'état de mollesse que prennent certains corps quand on les échauffe, et qui est accompagné d'une absorption de chaleur qui se dégage ensuite pendant l'expérience. Par exemple, le *phosphore rouge* ou phosphore amorphe n'a pour capacité que 0,16911; c'est qu'il ne se ramollit pas comme le phosphore ordinaire. Le *sélénium vitreux*, qui se ramollit bien plus que le sélénium métallique, a donné 0,1031, au lieu de 0,07446. A une très-basse température, les deux variétés ont donné à peu près le même résultat, 0,07468 et 0,07446.

Parmi les corps simples étudiés par M. Regnault, l'*urane* ne satisfaisait pas à la loi. Cette anomalie provoqua les recherches de M. Peligot, qui reconnut que ce corps n'est pas un métal, mais un oxyde, dont il parvint à séparer le véritable métal qu'il nomma *uranium*. L'*argent* ne satisfait à la loi qu'en prenant la moitié du poids atomique adopté par les chimistes, et le *carbone*, qu'en doublant son poids atomique; et M. Regnault prouve par des motifs sérieux tirés des lois de la chimie et de la cristallographie, que les poids atomiques qui satisfont à la loi sont bien ceux qu'il faut préférer. Il fait voir aussi que les poids atomiques du *potassium* et du *sodium*, admis par les chimistes, sont deux fois trop forts; et il en serait de même de celui du *lithium*.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVI, p. 261.

Les capacités trouvées par M. Regnault pour le *silicium*, le *bore* et le *diamant*, ne satisfont pas à la loi de Dulong et Petit. Plusieurs physiciens se sont occupés de cette anomalie, surtout pour le carbone. M. F. Weber a aussi étudié cette question, et a reconnu que la chaleur spécifique de ces trois corps augmente rapidement avec la température¹. Au-dessous de 200°, il se servait du petit calorimètre à glace de M. Bunsen (1063), et au-dessus, d'un calorimètre à eau, en évaluant la température primitive du corps par le *pyromètre calorimétrique* (1067), au moyen d'une masse de platine portée à la même température que le corps. Il a reconnu ainsi que le *silicium* satisfait à la loi de Dulong, au-dessus de 200°; et le *bore* et le *carbone*, au-dessus de 600°, point à partir duquel les capacités de toutes les variétés de carbone sont constantes et égales entre elles.

1075. LOI DES CHALEURS ATOMIQUES DES CORPS COMPOSÉS. — On a cherché à établir, relativement aux atomes des corps composés, une loi analogue à celle qui existe pour les corps simples. Les premiers essais dans cette voie paraissent avoir été faits par Avogadro, dans un travail considérable sur les chaleurs spécifiques des composés solides et liquides². Newmann, vers la même époque, a mesuré la chaleur spécifique d'un grand nombre de substances minérales, et a reconnu, sur quelques carbonates et quelques sulfates dont la base contient un atome d'oxygène, que, dans chacun de ces genres de sels, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques. C'est la loi de Dulong et Petit appliquée à des composés de même formule chimique.

M. Regnault³, en appliquant la méthode des mélanges à un très-grand nombre de substances composées, est arrivé aux lois suivantes :

1° *La chaleur spécifique des alliages, à une distance un peu grande de leur point de fusion, est la moyenne des chaleurs spécifiques des métaux qui les composent.* Il résulte de là que le produit de la chaleur spécifique par le *poids atomique moyen* (poids de l'atome de l'alliage divisé par le nombre d'atomes simples qui le composent) est constant, et égal à 41 environ; ce qui montre que *chaque atome simple conserve sa même capacité en entrant dans la constitution de l'alliage.* Les alliages qui sont près de leur point de fusion lors de l'expérience, donnent un produit beaucoup trop grand; ce qui tient à ce que, se ramollissant ou se désagrégant par la chaleur, leur capacité est augmentée d'une partie de la chaleur nécessaire à la fusion. Dans le tableau qui suit, ces alliages sont à la fin, et séparés des autres :

2° *Dans tous les corps composés, de même composition atomique et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.*

¹ *Journal de physique*, de M. d'Alméida, t. I, p. 400 et t. V, p. 229

² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LV et LVII.

³ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. I, p. 129.

COMPOSITION DE L'ALLIAGE	CHALEUR spécifique observée c.	CHALEUR spécifique calculée.	POIDS atomique moyen p.	PRODUIT $p \times c$.
1 atome plomb, 1 atome étain.....	0,04073	0,04039	1014,9	41,34
1 id. 2 atomes étain.....	0,04506	0,04461	921,7	41,53
1 id. 1 atome antimoine. ..	0,03880	0,03883	1050,5	40,76
1 atome bismuth, 1 atome étain.....	0,04000	0,03987	1032,8	41,31
1 id. 2 atomes étain.....	0,04504	0,04415	933,7	42,05
1 at. bismuth, 2 at. étain, 1 at. antim. . .	0,04621	0,04564	901,8	41,67
1 id: 2 at. étain, 1 antim., 2 at. zinc.	0,05657	0,05479	735,6	41,61
—				
1 at. plomb, 2 at. étain, 2 at. bismuth.	0,04476	0,04012	1023,9	45,83
1 id. 2 id. 2 id.....	0,06082	0,03785	1085,2	66,00
1 atome mercure, 1 atome étain.....	0,07294	0,04172	1000,5	72,97
1 id. 2 atomes étain.....	0,06591	0,04563	912,1	60,12
1 id. 1 atome plomb.....	0,03827	0,03234	1280,1	48,99

Dans l'énoncé de la deuxième loi, on entend par corps de constitution chimique semblable, ceux dont l'atome composé est formé d'un même nombre d'atomes de chaque espèce, quoique de natures différentes; tels que les composés RO et SO; RO² et SO²...; R, O, S représentant un atome de métal, d'oxygène et de soufre. Les lois de Dulong et de Newmann sont des cas particuliers de celle-ci, qui se vérifie dans les mêmes limites que celle des corps simples. Les discordances ne dépassent pas généralement $\frac{1}{10}$, au plus $\frac{1}{9}$, et proviennent des causes déjà indiquées (1074). Les produits des capacités par les poids atomiques sont d'ailleurs d'autant plus près d'être égaux que les substances comparées sont plus complètement *isomorphes*, c'est-à-dire cristallisent sous des formes plus rapprochées, et nous savons que la forme cristalline peut être différente à des températures différentes (I, 492). — L'oxyde de zinc et l'alumine donnent des résultats qui ne s'accordent pas avec la loi, mais nous avons vu que la capacité diminue quand on rapproche les molécules, et ces oxydes augmentent de densité quand on les calcine. De plus, ils perdent alors de la chaleur et deviennent incandescents, ce qui s'explique par la diminution qu'éprouve leur capacité. En même temps, les propriétés chimiques de ces oxydes sont modifiées, car ils deviennent difficilement solubles dans les acides. Le soufre mou, obtenu en versant du soufre à 250° dans de l'eau froide, présente un dégagement de chaleur analogue, quand on le porte à 90° environ. M. Regnault a vu la température du thermomètre de la corbeille P (fig. 769) monter jusqu'à 110°, et en même temps le soufre mou reprendre rapidement son état ordinaire, ce qui n'a lieu spontanément qu'au bout de quelques jours. Il en faut conclure que la chaleur spécifique du soufre mou est plus grande que celle du soufre ordinaire, ce qui ne doit pas étonner après ce que nous avons dit des différentes capacités

que peut présenter le soufre (1065). — Les changements de capacité qu'éprouvent les liquides avec la température, les rendent surtout impropres à la vérification de la loi. Nous voyons donc que la relation entre le poids atomique et la capacité est modifiée par diverses circonstances variables, dont l'influence est heureusement trop faible pour l'empêcher de se dessiner nettement. Le tableau qui suit contient une faible partie des résultats publiés par M. Regnault.

NOMS DES SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques c .	POIDS ATOMIQUES adoptés p .	PRODUIT $c \times p$.
<i>Oxydes RO.</i>			
Protoxyde de plomb fondu....	0,05089	1394,5	70,94
Oxyde de mercure.....	0,05179	1365,8	70,74
Protoxyde de manganèse.....	0,15701	445,9	70,01
Oxyde de cuivre.....	0,14201	495,7	70,39
— de nickel calciné.....	0,15885	469,6	74,60
Magnésie.....	0,24394	258,4	63,03
<i>Oxydes R²O³.</i>			
Fer oligiste.....	0,16695	978,4	163,35
Acide arsénieux.....	0,12786	1240,1	158,56
Oxyde de chrome.....	0,17960	1003,6	180,01
— de bismuth.....	0,06053	2960,7	179,22
— d'antimoine.....	0,09009	1912,9	172,34
<i>Oxydes RO³.</i>			
Acide Tungstique.....	0,07983	1483,2	118,38
— Molybdique.....	0,13240	898,5	118,96
— silicique.....	0,19132	577,5	110,48
— borique.....	0,23743	436,0	103,52
<i>Sulfures RS.</i>			
Protosulfure de fer.....	0,13570	540,4	73,33
Sulfure de nickel.....	0,12843	570,8	73,15
— de cobalt.....	0,12512	570,0	71,34
— de zinc.....	0,12303	604,4	74,35
— de plomb.....	0,05086	1495,6	76,00
— de mercure.....	0,05117	1467,0	75,06
<i>Sulfures R²S.</i>			
Sulfure de cuivre.....	0,12118	992,0	120,21
— d'argent.....	0,07460	1553,0	115,86
<i>Chlorures R²Cl².</i>			
Chlorure de sodium.....	0,21401	733,5	156,97
— de potassium.....	0,17295	932,5	161,19
Protochlorure de mercure....	0,05205	2974,2	154,80
— de cuivre.....	0,13827	1234,0	156,83
Chlorure d'argent.....	0,09109	1794,2	163,42

NOMS DES SUBSTANCES	CHALEURS spécifiques <i>c</i> .	POIDS ATOMIQUES adoptés <i>p</i> .	PRODUIT $c \times p$.
<i>Chlorures RCl₂.</i>			
Chlorure de barium.....	0,08957	1299,5	116,54
— de strontium.....	0,14990	989,9	118,70
— de calcium.....	0,16420	698,6	114,72
— de magnésium.....	0,19460	601,0	118,54
— de plomb.....	0,06641	1737,4	115,35
Perchlorure de mercure.....	0,06889	1708,4	117,68
Chlorure de zinc.....	0,13618	845,8	115,21
Protochlorure d'étain.....	0,10161	1177,9	119,59
Chlorure de manganèse.....	0,14255	788,5	112,51
<i>Azotates AzO₅,R₂O.</i>			
Azotate de potasse.....	0,23875	1266,9	302,49
— de soude.....	0,27821	1067,9	297,13
— d'argent.....	0,14352	2128,6	305,55
<i>Sulfates SO₃,RO.</i>			
Sulfate de baryte.....	0,11285	1458,1	161,54
— de strontiane.....	0,14279	1148,5	161,01
— de plomb.....	0,08723	1895,7	165,39
— de chaux.....	0,19656	857,2	168,49
— de magnésie.....	0,22159	759,5	168,30
<i>Carbonates CO₂, R₂O.</i>			
Carbonate de potasse.....	0,21623	865,0	187,04
— de soude.....	0,27275	666,0	181,65
<i>Carbonates CO₂,RO.</i>			
Marbre saccharoïde.....	0,21585	631,0	136,20
Carbonate de baryte....	0,11038	1231,9	135,99
— de strontiane.....	0,14483	922,3	133,58
— de fer.....	0,19345	714,2	138,16

1076. Interprétation de la loi des chaleurs moléculaires des corps composés. — M. Woestyn a découvert que l'état de combinaison ne change pas la capacité des atomes simples qui forment l'atome composé, ce que M. Regnault avait déjà remarqué sur les alliages, et il le prouve en montrant que la chaleur spécifique de l'atome composé est égale à la somme des chaleurs spécifiques des atomes simples qui le constituent, de sorte que, si l'on désigne par P, p, p', p'', \dots les poids atomiques du composé et de ses éléments, par C, c, c', c'', \dots les chaleurs spécifiques, en supposant que c, c', c'', \dots soient les mêmes, dans les

corps composés que lorsque les atomes ne sont pas combinés, et par $n, n', n'' \dots$ les nombres d'atomes simples qui entrent dans l'atome composé, on aura

$$[1] \quad P \cdot C = npc + n'p'e' + n''p''e'' + \dots$$

Cette formule, qui montre que le produit PC, ou la chaleur moléculaire, croît avec la complication de la formule chimique, se vérifie dans les mêmes limites que la loi des chaleurs atomiques. Quand les composés contiennent des substances dont la capacité n'a pas été mesurée, on combine par addition et soustraction les formules atomiques de divers composés, ainsi que les produits pc correspondants, et l'on trouve que les résultats sont les mêmes quand les formules résultantes sont identiques.

Il résulte de là que, si les corps de même formule atomique conduisent sensiblement au même produit pc , c'est que les produits qui correspondent aux corps simples sont les mêmes; mais ce résultat peut être en défaut, et l'on remarque, comme on pouvait le prévoir, que les corps simples dont les produits sont les plus forts, communiquent à leurs composés, des valeurs qui donnent des produits aussi plus forts que ceux des autres composés de formule similaire. Tels sont le mercure et le bismuth.

M. Ch. Garnier a fait une autre remarque qui permet d'interpréter la loi des chaleurs atomiques, d'une autre manière: il a trouvé que *les chaleurs spécifiques de tous les corps, simples ou composés, sont en raison inverse des poids atomiques moyens*¹. Ce qui résulte aussi de la formule [1], qui donne

$$\frac{p}{n + n' + \dots} C = pc, \text{ en remarquant que } pc = p'e' = p''e'' \dots, \text{ d'après la}$$
 loi de Dulong. Ainsi, l'eau étant formée de deux atomes d'hydrogène et d'un d'oxygène, son poids atomique moyen est $\frac{1}{3} 112,5 = 37,5$, qui multiplié par sa chaleur spécifique 1 donne 37,5. En passant en revue les capacités des composés binaires, déterminées par M. Regnault, M. Garnier a trouvé sensiblement le produit 37,5, et ce nombre est le même que celui que donnent les corps simples.

Si les produits sont différents quand on passe d'une classe de composés à une autre, c'est que le nombre d'atomes simples n'est pas le même. On voit donc de nouveau que *les atomes simples conservent leur capacité quand ils entrent dans des combinaisons*. Pour satisfaire à cette loi, il faut prendre pour poids atomique moyen de la potasse et de la soude, le poids atomique absolu divisé par 3, ce qui suppose que ces corps sont composés de deux atomes de métal et d'un atome d'oxygène, comme M. Regnault l'avait déjà déduit de la capacité de l'atome de ces métaux (1074). Voici quelques-uns des résultats calculés par M. Garnier :

¹ Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris, t. XXXV, p. 278.

SUBSTANCES	POIDS ATOMIQUE moyen <i>p.</i>	CHALEUR spécifique <i>c.</i>	PRODUIT $c \times p.$
RO — protoxyde de plomb...	697	0,051	35,5
R ² O ² — oxyde de chrome...	201	0,179	35,98
RS — sulfure de plomb.....	747	0,050	37,35
R ² S ³ — sulfure d'antimoine..	443	0,084	37,21
R ² S — sulfure d'argent.	517	0,074	38,25
RC ² chlorure de mercure....	736	0,052	38,27
RC ² chlorure de plomb.....	579	0,066	38,21
RB ² bromure de plomb.....	757	0,053	40,12
R ² I iodure de mercure.....	1021	0,039	39,81
RI ² iodure de mercure.....	945	0,041	38,74

Les composés ternaires, les sels, ne paraissent pas soumis à cette loi, ou du moins ils s'en éloignent notablement. Est-ce que dans ces composés les atomes ne conserveraient pas la même capacité que lorsqu'ils sont isolés? ou bien l'eau interposée dans beaucoup de sels, et qu'on ne peut chasser toujours complètement, les incertitudes des méthodes de mesure, sont-elles les causes qui déguisent la loi? C'est ce qui ne peut être décidé dans l'état actuel de la science.

La loi, trouvée par M. Garnier, n'est satisfaite qu'autant qu'on prend, pour constituer le composé, des nombres d'atomes simples entre eux comme les volumes des gaz qui se combinent. Ainsi, l'atome d'eau doit être formé de deux atomes d'hydrogène et de un atome d'oxygène, pour que son poids atomique moyen satisfasse à la loi. Voilà donc une preuve nouvelle et inattendue de ce principe si important que les gaz simples contiennent sous le même volume, dans les mêmes conditions de pression et de température, le même nombre d'atomes (1050).

1077. Dissolutions. — Il résulte de quelques nombres publiés par Person, sur les capacités des dissolutions, et des expériences de M. H. Schüller faites par la méthode des mélanges¹, que la capacité des dissolutions est moindre que la somme des capacités des substances associées. M. Thomsen² est arrivé à la même conclusion à la suite d'expériences faites en introduisant dans les liquides comparés, des quantités égales de chaleur fournies par la combustion d'un certain volume d'hydrogène.

M. Marignac³ a montré que ce résultat présente plusieurs exceptions importantes; ainsi, les dissolutions de sucre ou d'ammoniaque dans l'eau ont des capacités moléculaires sensiblement égales à celles de leurs éléments; et il en

¹ *Ann. de Pogg.*, t. CXXXVI, et *Ann. de ch. et de ph.*, 4^e série, t. XVII, p. 478.

² *Annales de Poggendorff*, t. CXLII, p. 337, et *Journal de physique*, t. I, p. 35.

³ *Bibliol. de Genève*, arch. des sc. (1870), et *Ann. de ch. et de ph.*, 4^e s., t. XXII, p. 385.

est de même des dissolutions de phosphore, d'iode, et de brome dans le sulfure de carbone. Les mélanges d'eau et d'alcool présentent une chaleur moléculaire plus grande que la somme de celles de leurs composants, et même leur capacité peut être plus grande que celle de l'eau. M. Marignac procédait en introduisant dans les dissolutions une certaine quantité de chaleur, par l'immersion d'un thermomètre chaud à long réservoir roulé en hélice, dont il observait le refroidissement.

D'après MM. Jamin et Amaury, la capacité de l'alcool est supérieure à celle de l'eau, quand il contient plus de 0,66 d'eau; le maximum, 1,0656, a lieu pour 0,80 d'eau.

Cependant, la diminution de chaleur spécifique des dissolutions est un fait très-général; et, par exemple, M. Marignac, a vu une dissolution contenant 24,5 pour cent d'acide chlorhydrique, présenter une capacité inférieure de 14 pour cent à celle de l'eau seule qu'elle contient. D'un autre côté, le nombre de cas où la loi des chaleurs moléculaires se vérifie est tellement grand que l'on est porté à croire que quelque cause particulière l'empêche de se vérifier sur les dissolutions. M. Marignac suppose, avec d'autres physiciens, que, pendant l'échauffement, la constitution chimique des combinaisons de l'eau avec le sel ou l'acide dissous, change; d'où résulte un dégagement ou une absorption de chaleur qui modifie la chaleur spécifique normale. Il trouve, en outre, que la contraction du mélange répond à peu près à la diminution de la chaleur moléculaire, et peut servir à l'expliquer en partie. Cette contraction n'existe pas pour les dissolutions aqueuses de sucre et d'ammoniaque qui satisfont à la loi des chaleurs moléculaires. Ajoutons enfin, qu'il résulte d'expériences de M. Pfaundler que les capacités des mélanges d'eau et d'acide sulfurique augmentent avec la température, plus vite que celles de l'eau et de l'acide séparés.

1078. Considérations théoriques. — Nous avons vu que les corps simples forment un groupe à part donnant une valeur particulière pour le produit $p \times c$. On ne peut être certain que ces corps soient réellement simples et qu'on ne pourra pas un jour en tirer diverses substances, comme cela a eu lieu pour plusieurs corps regardés pendant longtemps comme simples. La loi de Dulong et Petit prouve du moins, comme le dit M. Hirn, que tous ces corps, s'ils sont composés, ont une constitution chimique semblable; si bien que si l'on venait à démontrer qu'un d'eux est réellement simple, on pourrait dire qu'il en est de même des autres, de ceux du moins dont la capacité et les propriétés chimiques sont bien connues, et qui ont, sans aucun doute, la même chaleur atomique.

La loi des chaleurs atomiques ne se vérifie qu'approximativement; mais, comme nous l'avons déjà remarqué (1074), la structure a une grande influence sur la capacité; par exemple, pour le silicium, le bore et le carbone qui s'éloignent notablement de la loi au-dessous de 100°, et qui présentent des chaleurs spécifiques différentes quand leur structure est graphitoïde, amorphe ou cristalline. D'un autre côté, la température modifie la capacité. En général, celle qui correspond aux plus basses températures satisfait le mieux à la loi. Par exemple, pour le potassium, le sodium, le brome, le mercure; mais c'est le contraire

pour le silicium, le bore et le carbone, comme nous l'avons vu plus haut (1074).

Certains corps simples ne satisfont à la loi que si l'on change leur formule atomique, en s'appuyant, du reste, sur des analogies chimiques qui autorisent ces changements. Quoi qu'il en soit, on a proposé de modifier la loi en l'énonçant ainsi : Les chaleurs spécifiques des corps simples sont en raison inverse des poids atomiques ou d'un multiple ou sous-multiple très-simple de ces poids.

Les inégalités dans le produit *pv* s'expliquent, en outre, dans la théorie où l'on considère la chaleur comme un mouvement (817). Quand un corps s'échauffe, la chaleur fournie produit deux effets : 1° l'élévation de température, qui consiste en une augmentation d'amplitude de vibrations des atomes, due à l'introduction d'une certaine quantité de force vive ; 2° l'écartement des molécules, qui exige une nouvelle dépense de chaleur destinée à vaincre la cohésion. Cette seconde dépense, qui, dans un même corps, change avec sa structure, ne peut évidemment être la même dans les divers corps.

Le premier effet représente un apport de chaleur ou de force vive, qui ne dépend, ni de la nature, ni de l'arrangement des atomes dans le corps, simple ou composé ; c'est cette quantité qui répond aux lois des chaleurs atomiques ou moléculaires ; on la nomme *capacité absolue*. Le second effet ajoute une dépense de chaleur, qui vient altérer les résultats et rendre moins nette la vérification de la loi. Il résulte de là que la capacité devrait dépendre de la ténacité, de l'élasticité des corps, et que les liquides devraient avoir une capacité moindre que les solides, tandis que c'est généralement le contraire ; mais il faut tenir compte de l'étendue des espaces dans lesquels les molécules vibrent. Cantoni ayant calculé les capacités des corps simples rapportés à l'unité de volume, au lieu de l'unité de poids, ce qui se fait en multipliant la chaleur spécifique par la densité ¹, a mis en évidence que les capacités les plus fortes ainsi considérées appartiennent aux métaux les plus résistants. Voici quelques-uns des nombres qu'il a publiés ² :

Potassium.....	0,143	Magnésium.....	0,435	Zinc.....	0,669
Sodium.....	0,283	Cadmium.....	0,487	Palladium.....	0,670
Iode.....	0,267	Aluminium.....	0,556	Iridium.....	0,678
Tellure.....	0,286	Lithium.....	0,559	Platine.....	0,685
Bismuth.....	0,305	Molybdène.....	0,567	Cuivre.....	0,842
Antimoine.....	0,340	Tungstène.....	0,587	Fer.....	0,882
Plomb.....	0,357	Rhodium.....	0,615	Cobalt.....	0,906
Soufre.....	0,359	Or.....	0,624	Manganèse.....	0,921
Étain.....	0,415	Osmium.....	0,662	Nickel.....	0,961

On voit que ces capacités diffèrent beaucoup moins les unes des autres que celles qui sont rapportées à l'unité de poids, et que l'ordre de ces nombres est en

¹ Car c étant la capacité du volume, v , de l'unité de poids, celle, q , de l'unité de volume sera $q = c : v$, ou $q = cd$, l'unité de poids étant $1 = vd$.

² *L'Union des forces physiques*, par le P. A. Secchi, trad. française (1874), p. 79.

rapport avec les densités et les ténacités des corps. Ces propriétés varient avec la structure ; d'où l'influence de celle-ci sur les capacités d'un même corps.

Les capacités des liquides, en volume, conduisent à la même conclusion, elles ne varient que de 1 à 3,5 au lieu de 1 à 30 ; les liquides les plus volatils ont les plus faibles capacités, et ces capacités, sauf pour l'eau, sont toujours inférieures à celles des solides.

Cantoni, qui a multiplié les recherches dans cette direction, a aussi reconnu que les quantités de chaleur nécessaires pour produire une même dilatation sur des volumes égaux de différents corps, sont les plus grandes pour les solides les plus cohérents, moindres pour les liquides, surtout pour les plus volatils, et enfin, pour un même corps, moindre à l'état liquide qu'à l'état solide. Il a constaté, en outre, que le rapport entre la capacité et le coefficient d'élasticité des métaux non cristallins est à peu près constant, et égal à 1,36.

Les gaz vont nous fournir d'autres aperçus qui ne feront que confirmer les déductions qui précèdent.

§ 2. — CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ

1079. Définitions. — Les gaz présentant généralement des lois simples quand on les considère en volumes, on a été conduit à comparer leurs capacités, en les rapportant aux volumes et non plus aux poids. On définit donc la chaleur spécifique d'un gaz sous une pression donnée : la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° l'unité de volume de ce gaz. La découverte de la loi des chaleurs atomiques a donné une plus grande importance encore à cette manière de procéder. Du reste, il est toujours facile, étant donnée la quantité q de chaleur absorbée par l'unité de volume d'un gaz pour s'échauffer de 1°, d'en déduire la quantité c qui serait absorbée par l'unité de poids du même gaz, au moyen de la formule $q = cd$, (1078), dans laquelle d est la densité du gaz.

Chaleurs spécifiques à volume constant et à pression constante. — Il y a deux manières de considérer les chaleurs spécifiques des gaz : ou bien le gaz qui s'échauffe peut se dilater librement en conservant sa pression, et alors sa capacité est dite à *pression constante* ; ou bien il ne peut se dilater, et est forcé de conserver son même volume en augmentant de force élastique, et alors sa capacité est à *volume constant*. On a cru longtemps que la première de ces capacités surpassait la seconde de toute la quantité de chaleur nécessaire pour produire la dilatation du gaz, quantité qui ne serait pas absorbée quand le volume ne peut varier. Nous reviendrons sur ce point (1093).

On a fait, depuis un siècle, un grand nombre d'expériences sur les capacités des gaz. Lavoisier et Laplace, en 1784, faisaient passer lentement un volume connu de gaz chaud dans un serpentín entouré de glace, et mesuraient la quantité de glace fondue. Crawford, en 1788, se servait de la méthode des mélanges ; mais la masse de gaz, contenue dans un vase de cuivre mince porté à 100°, était

trop faible pour qu'on pût obtenir des résultats même approximatifs. Leslie s'est appuyé sur l'échauffement qu'éprouve l'air raréfié quand il est comprimé par un gaz qui se précipite dans l'espace qu'il occupe. Gay-Lussac faisait arriver dans un même récipient de l'air et un autre gaz à des températures différentes, et calculait le rapport entre les capacités de ces gaz comme dans la méthode des mélanges. Dalton, Clément et Désormes, Haycraft, Dulong, se sont aussi occupés du même sujet.

1080. Expériences de Delaroche et Bérard. — La plus grande difficulté, dans ces sortes de recherches, tient à la faible masse des gaz, et, par suite, à

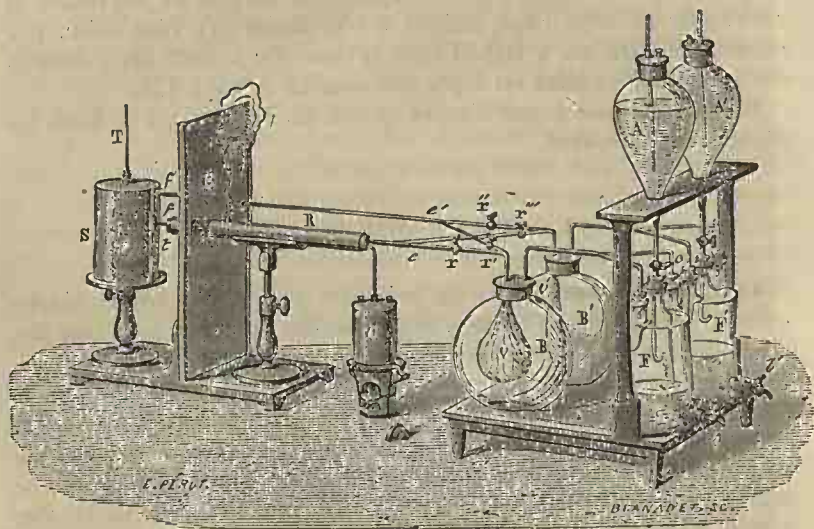


Fig. 773.

l'importance relative des corrections à faire. Delaroche et Bérard, dans un grand travail publié en 1812 et couronné par l'Académie des sciences de Paris, sont parvenus à vaincre en grande partie ces difficultés, en employant une disposition d'appareil très-ingénieuse. Le gaz traversait avec une vitesse constante, un serpentín entouré d'eau à laquelle il cédait une partie de sa chaleur. Il entraît à une température connue, et le développement du serpentín était assez grand pour qu'il sortit toujours avec la température de l'eau.

Le calorimètre *S* (fig. 773), soutenu par un support non conducteur, contient un serpentín formé d'un tube aplati. On fait circuler le gaz dans ce serpentín, avec une vitesse constante, obtenue par un moyen déjà décrit (I, 444). Le gaz est contenu dans des vessies *v, v'* renfermées elles-mêmes dans deux ballons *B, B'* de 40 litres, qui communiquent avec des réservoirs *F, F'* remplis d'air, que refoule l'eau de deux vases de Mariotte *A, A'*. La communication est établie par

des tubes qui se divisent en deux branches munies de robinets, dont l'une plonge jusqu'au fond du réservoir F, F'. Les vessies peuvent être mises en communication avec l'orifice supérieur ou l'orifice inférieur du serpentin S, par un système de tubes munis de robinets. Si la vessie B est pleine de gaz, on fait fonctionner le vase de Mariotte qui est du même côté; le gaz refoulé traverse les tubes rR , t , le robinet r' étant fermé, et entre par le bas du serpentin; les robinets convenables étant ouverts et fermés. Le gaz sort par la partie supérieure du serpentin et se rend par $e' r''$, le robinet r''' étant fermé, dans la vessie du ballon B', la gonfle, et l'air refoulé passe dans le réservoir F' à travers l'eau qu'il contient, et presse ce liquide de manière à le chasser par le robinet b' .

Quand la vessie B' est pleine, on ferme les robinets qui étaient ouverts, et l'on ouvre les autres, on fait fonctionner à son tour le vase de Mariotte F', le gaz est chassé de V', et, traversant le tube $r'''e$, passe en R, puis en t , entre dans le serpentin, et vient se rendre, par $e' r'$ dans la vessie du ballon B. L'eau du réservoir F sort en même temps par le robinet b . Pendant ce temps-là, on remplit d'eau le vase de Mariotte qui ne sert pas. En faisant ainsi fonctionner alternativement, et sans interruption sensible, les deux vases de Mariotte, on peut obtenir un courant constant de gaz dans le serpentin, aussi longtemps que l'on veut. — Le gaz s'échauffe, en traversant un manchon R, dans lequel on fait circuler de la vapeur d'eau, venant d'une petite chaudière C et sortant par le tube E. La température du gaz est donnée par un thermomètre placé dans le tube t que traverse ce gaz¹. Le calorimètre S est, d'ailleurs, dans une chambre séparée de celle qui contient le reste de l'appareil. Il est à remarquer que les gaz sont humides, ce qui modifie un peu leur chaleur spécifique. De plus, il y a de la chaleur cédée par conductibilité au calorimètre par le tube t , et d'autre, par le rayonnement de l'extrémité du tube R. En formant le tube t en verre, et disposant des écrans convenables, on rendait l'erreur négligeable.

1081. Capacité des gaz par rapport à l'air. — Delaroche et Bérard ont d'abord cherché les rapports entre les chaleurs spécifiques des divers gaz. Pour cela, ils faisaient passer un courant de gaz, avec une vitesse constante, à travers le serpentin, jusqu'à ce que la température du calorimètre devint stationnaire, ce qui avait toujours lieu au bout d'un certain temps, la perte extérieure augmentant avec la température du calorimètre, et la chaleur cédée dans le même temps par le gaz allant en diminuant. La température finale et stationnaire était donnée par un thermomètre dont le réservoir occupait toute la profondeur du bain; de plus, le gaz chaud entrant par le bas, les couches inférieures de l'eau étaient le plus échauffées, ce qui déterminait des courants.

Pour abrégé les expériences, on portait le calorimètre, au moyen d'une

¹ Le thermomètre est toujours un peu trop bas, à cause de la chaleur qu'il rayonne vers le tube t , qui est refroidi par le contact de l'air extérieur. Comme, d'un autre côté, la température du gaz est un peu inférieure à celle de la vapeur du tube R, on prenait pour température de ce gaz la moyenne entre celle de l'eau bouillante et celle du thermomètre en t .

lampe à esprit de vin, à peu près à la température à laquelle il devait s'arrêter, puis on faisait circuler le gaz. Comme, dans le voisinage du maximum, les variations sont extrêmement lentes, on observait ces variations de 10 en 10 minutes, et quand elles étaient très-petites, on échauffait le calorimètre au-dessus du maximum, puis on observait la marche du refroidissement, et quand les variations étaient très-faibles, on arrêtait l'expérience. On prenait pour température stationnaire la moyenne entre deux indications ainsi observées, très-voisines du maximum. Une expérience semblable était faite ensuite sur un autre gaz, et le rapport des capacités des deux gaz s'obtenait en exprimant que les quantités de chaleur cédées dans l'unité de temps au calorimètre, quantités qui sont égales à celles qui se perdent, sont entre elles comme les excès de température sur l'air ambiant; la loi de Newton pouvant s'appliquer ici. Si donc T est la température du gaz à son entrée dans le serpentin, x sa capacité, v sa vitesse, ou le volume qui passe dans l'unité de temps; θ la température finale du calorimètre; T' , x' , v' , θ' les mêmes quantités pour l'autre gaz, et enfin t , t' les températures de l'air ambiant, on aura

$$vx(T - \theta) : v'x'(T' - \theta') = (\theta - t) : (\theta' - t');$$

d'où l'on tirera le rapport $x : x'$.

Delaroché et Bérard ont employé une seconde méthode, qui consiste à comparer les volumes de gaz qui élèvent d'une quantité donnée la température du calorimètre dans les mêmes circonstances, et à prendre le rapport inverse de ces volumes, pour le rapport des capacités. Pour se mettre à l'abri des erreurs provenant de la perte de chaleur du calorimètre, ils appliquaient la méthode de compensation de Rumfort (1058), en donnant d'abord au calorimètre une température inférieure à celle de l'air ambiant.

1082. Capacité des gaz par rapport à l'eau. — Les deux méthodes précédentes ayant donné les rapports entre les capacités des gaz et de l'air, il restait à déterminer la chaleur spécifique de l'air par rapport à l'eau. Delaroché et Bérard ont employé pour cela trois méthodes différentes.

1° On calcule la quantité de chaleur Q que perd le calorimètre traversé par l'air pendant une minute, quand sa température est stationnaire, et on l'égale à la quantité de chaleur $vx(T - \theta)$ cédée par l'air au calorimètre pendant le même temps; ce qui donne une équation d'où l'on tire x . — Pour calculer Q , supposons que, le passage du gaz étant supprimé, on laisse refroidir l'appareil, et soit V la vitesse du refroidissement, ou l'abaissement de température pendant une minute. Si P est le poids de l'eau et de l'équivalent en eau du calorimètre, la quantité de chaleur perdue par l'appareil pendant une minute sera $Q = PV$, en désignant par V la vitesse du refroidissement.

Il reste à évaluer V . Pour cela, on observe l'abaissement de température pendant m minutes, à partir du moment où, la température du calorimètre étant stationnaire et supérieure de t° à la température ambiante, on a arrêté le

passage du gaz. L'excès de température t' après m minutes sera (928) $t' = ta^m$. En prenant la dérivée par rapport à m , on aura, pour V ,

$$V = t' \log a. \quad [1]$$

Pour obtenir $\log a$, on prend les logarithmes dans $t' = ta^m$, ce qui donne $\log a = \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t}$; équation dans laquelle t' , t et m sont connus par l'observation. On a donc, pour trouver la capacité x de l'air,

$$vx(T - 0) = t \log a.$$

Le même procédé pourrait servir à mesurer directement la capacité d'un gaz quelconque par rapport à l'eau.

2° On fait passer très-lentement un courant constant d'eau à travers le serpentín du calorimètre, jusqu'à ce que sa température devienne stationnaire. L'eau, fournie par un vase de Mariotte V (fig. 774), s'échauffe dans un tube T , autour duquel circule de la vapeur d'eau, et sort de la partie supérieure du serpentín par un tube effilé e qui la verse dans une éprouvette graduée servant à faire connaître la vitesse. La température de l'eau à son entrée, est donnée par trois thermomètres placés à des hauteurs différentes dans le tube t . On compare ensuite les chaleurs spécifiques de l'eau et de l'air, par le calcul du numéro précédent.

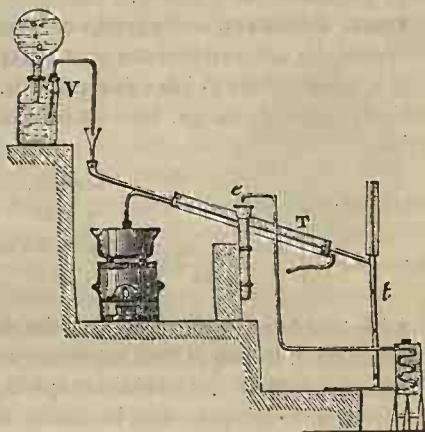


Fig. 774.

3° **Mesure directe de la capacité de l'air.** — La troisième méthode, employée aussi

par Rumfort, qui a imaginé le calorimètre à serpentín, donne directement la capacité par rapport à l'eau. Le gaz circule dans le serpentín avec une vitesse constante, et élève sa température de t^0 à θ^0 ; entré à T^0 , il sort à une température toujours égale à celle du serpentín, et qui varie d'une manière continue, de t^0 à θ^0 . Si l'on suppose que ce gaz sort à une température constante égale à la moyenne $\frac{1}{2}(t + \theta) = t'$, sa température se sera abaissée de $(T - t')^0$. Soit V le volume de gaz écoulé, x sa capacité, P les poids de l'eau du calorimètre et de son équivalent en eau, on aura, pour déterminer x

$$xV(T - t') = P(\theta - t).$$

On applique la méthode de compensation de Rumfort. Comme le gaz se

refroidit, dans le calorimètre, à peu près régulièrement, θ différant peu de t , le temps pendant lequel le calorimètre est au-dessous de la température ambiante, est sensiblement égal à celui pendant lequel il la dépasse, et il y a compensation presque exacte.

Correction pour les pressions. — La pression des gaz ayant évidemment une influence sur leur chaleur spécifique rapportée aux volumes, pour avoir des résultats comparables, il faut les ramener à la même pression. Delaroche et Bérard ont employé la marche suivante : ayant mesuré les capacités x et x' de l'air sous des pressions p et p' , l'une supérieure et l'autre inférieure à 760^{mm}, en modifiant convenablement les vases de Mariotte A, A' (fig. 773), ils ont calculé le rapport $r = \frac{x' - x}{x} : \frac{p' - p}{p}$, et l'ont supposé constant pour tous les gaz, dans les limites des variations de la pression atmosphérique. Alors, x étant mesuré sous la pression p , ils en concluaient la valeur de x' sous la pression p' , qu'ils prenaient égale à 760^{mm}.

1083. Résultats. — Delaroche et Bérard ont trouvé, par les méthodes qui précèdent, des valeurs différentes pour les capacités des gaz simples ou composés, sous le même volume et à la même pression. Rapportées aux poids, les capacités diffèrent encore davantage. Voici les capacités obtenues *en volume* par rapport à l'air.

Gaz simples....	Air.	Oxygène.	Hydrogène.	Azote.
	1,000	0,9765	0,9033	1,000
Gaz composés..	Acide carbonique.	Protoxyde d'azote.	Gaz oléfiant.	Oxyde de carbone.
	1,2583	1,3503	1,5530	1,0340

À l'époque de ces expériences, la loi des *chaleurs atomiques* n'avait pas encore été découverte. Dulong et Petit ont remarqué qu'elle s'applique aux *gaz simples* du tableau précédent ; car les chaleurs spécifiques de ces gaz, considérées sous le même volume, sont égales dans les limites des erreurs des observations, et ils contiennent le même nombre d'atomes sous le même volume, quand les conditions de température et de pression sont égales.

1084. La méthode de Delaroche et Bérard comportait plusieurs causes d'erreur : les gaz étaient humides, il s'y mêlait de l'air par endosmose à travers les parois des vessies, et le thermomètre n'était pas alors un instrument très-précis. C'est pourquoi plusieurs physiciens ont repris la question. M. Hayercraft a expérimenté au moyen d'un appareil analogue à celui de Delaroche et Bérard ; seulement, les gaz qu'il voulait comparer étaient introduits, après avoir été desséchés, dans deux cylindres, munis de pistons qui les chassaient dans deux calorimètres identiques. — MM. Apjohn et Suerman, chacun de leur côté, ont mesuré les capacités de divers gaz, en partant du froid produit par un courant de gaz sec passant sur la boule d'un thermomètre mouillé¹. Le principe de cette

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. XXVI et LXIII.

méthode est celui du *psychromètre*, que nous étudierons dans l'hygrométrie.

1085. Expériences de A. De la Rive et F. Marceſt. — Ces expériences ont été faites par la méthode du refroidissement. Après avoir d'abord procédé en renfermant un volume constant de gaz dans un ballon de verre mince, ce qui ne donna que des résultats défectueux, MM. De la Rive et Marceſt firent, vers 1835, de nouvelles expériences par un procédé que Dulong avait aussi imaginé de son côté, et qui offre beaucoup de garanties d'exactitude¹. L'appareil consiste en un calorimètre cylindrique *v* (fig. 775) de cuivre très-mince, ayant 37^{mm} de hauteur, et 33^{mm} de largeur, traversé par un petit serpentín de cuivre, dont les extrémités reçoivent deux tubes de verre *t*, *t'* communiquant avec des gazomètres. Un thermomètre *T* est placé au milieu du serpentín dans le vase *v*. Ce vase *v* est suspendu, par les tubes *t*, au centre d'un ballon de cuivre, *B*, noirci en dedans, dont on peut extraire l'air par le robinet *r*.

L'appareil est installé dans une vaste salle dont la température est constante, et le vase *v* est rempli d'essence de térébenthine, dont la capacité est environ moitié de celle de l'eau, afin de rendre les variations de température plus sensibles.

Voici comment on opère : on échauffe le vase *v*, et on le dispose dans la sphère noircie, dont on extrait l'air, et qu'on plonge dans un bain d'eau à la température ambiante. On observe le temps que met le thermomètre *t* à baisser de 15 à 20 degrés. On répète ensuite cette expérience dans les mêmes conditions, mais en faisant passer dans le serpentín, un courant régulier d'air sec à la température ambiante. Alors la vitesse du refroidissement du vase *v* est due en partie à la soustraction d'une certaine quantité de chaleur, par l'air qui passe. On fait enfin une troisième expérience, en faisant circuler le gaz, bien sec, dont on veut comparer la capacité à celle de l'air. On a soin, en réglant un robinet, de donner la même vitesse aux deux gaz. Les volumes des gaz qui ont parcouru l'appareil sont mesurés dans le gazomètre qui les reçoit. Pour déduire des données des expériences le rapport des capacités, on emploie la méthode de calcul suivante, due à Dulong.

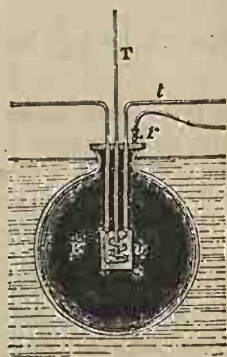


Fig. 775.

Soient *V*, *V'* les vitesses totales de refroidissement pendant le passage de l'air, puis du gaz; *R* la vitesse totale par rayonnement seul; *v* et *v'* les vitesses produites par l'air seul et par le gaz seul; on aura évidemment $v = V - R$, $v' = V' - R$. D'un autre côté, les vitesses *v* et *v'* sont proportionnelles aux capacités des gaz et aux volumes *U*, *U'*, qui passent dans l'unité de temps, en partant d'un même excès initial *t* du calorimètre. On a donc, en appelant *c*, *c'* les capacités des deux gaz,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXXV, p. 113.

$$v : v' = Ue : U'e', \text{ d'où } e : e' = Uv : Uv' = U'(V - R) : U(V' - R). \quad [2]$$

Les excès de température ne dépassant pas 10° à 12° , les vitesses R , V , V' se calculent au moyen de la formule [1] du n^o 1082, qui donne $R = t \log a$, $V = t \log a'$, $V' = t \log a''$, expressions dans lesquelles on a (1082)

$$\log a = \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t}, \quad \log a' = \frac{1}{m'} \log \frac{t''}{t}, \quad \log a'' = \frac{1}{m''} \log \frac{t'''}{t};$$

t' , t'' , t''' étant les excès observés après des nombres de minutes représentés par m , m' , m'' . L'équation [2] devient alors, en faisant toutes les substitutions,

$$e : e' = U' \left[t \left(\frac{1}{m'} \log \frac{t''}{t} - \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t} \right) \right] : U \left[t \left(\frac{1}{m''} \log \frac{t'''}{t} - \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t} \right) \right]$$

Si l'on suppose, comme cela avait lieu, que les trois expériences, commencées avec un même excès t , soient terminées lorsque les excès sont devenus égaux entre eux et à t' , la formule devient, en remplaçant t'' et t''' par t' ,

$$\frac{e}{e'} = \frac{U'}{U} \cdot \frac{m - m'}{m - m''} \cdot \frac{m''}{m'}, \quad \text{ou enfin } \frac{e}{e'} = \frac{u'}{u} \cdot \frac{m - m'}{m - m''},$$

en appelant u et u' les volumes de gaz qui ont parcouru le serpentín pendant les temps m' et m'' , ce qui donne $U = u : m'$, et $U' = u' : m''$, puisque la vitesse est uniforme. Sous la dernière forme, la formule ne contient que des valeurs données directement par l'observation.

MM. De la Rive et Marcet ont trouvé, par cette méthode, la même capacité pour l'air, l'oxygène et l'hydrogène.

1086. Expériences de Dulong. — A la même époque, Dulong étudiait la capacité des gaz, par une méthode semblable à celle que nous venons d'exposer. Le travail de cet éminent physicien n'a pas été publié; on a seulement trouvé, dans les notes qu'il a laissées, l'énoncé des lois suivantes :

1^o Les gaz composés formés de gaz simples qui, dans leur réunion, ne sont pas condensés, ont même chaleur spécifique, rapportée au volume, que les gaz simples; d'où l'on doit conclure que la chaleur spécifique des gaz combinés est alors la même que s'ils étaient simplement mélangés; comme pour les corps solides (1076). — 2^o Les gaz composés, dans la formation desquels il y a eu une même condensation des gaz constituants, ont des chaleurs spécifiques égales entre elles et très-différentes de celles des gaz simples; loi qui n'a pas été confirmée depuis (1091). On ne peut que regretter que les détails du travail de Dulong n'aient pas été retrouvés après sa mort.

1087. Expériences de M. Regnault. — M. Regnault a fait connaître, en 1853, les résultats de recherches poursuivies pendant plus de quinze ans,

sur les capacités calorifiques des gaz¹. Après avoir suivi d'abord la méthode de MM. De la Rive et Marcet, il a adopté définitivement celle de Delaroche et Bérard, mais en apportant de nombreux perfectionnements aux appareils, et en prenant une foule de précautions nouvelles.

La figure 776 représente l'ensemble de l'appareil employé. Le gaz desséché et purifié était refoulé par le tube *n*, au moyen d'une machine de compression, dans un réservoir de cuivre R, de 35 litres de capacité. Ce réservoir communiquait par le tube *m*, avec le manomètre à air libre qui avait servi aux expériences sur la loi de Mariotte (I, 380); et il était plongé dans une grande masse d'eau agitée par des lames annulaires, L. Quand on ouvrait le robinet *r*, le gaz passait par les tubes *t*, *t'*, *t''*, dans un serpentin S, où il s'échauffait. Ce serpentin était

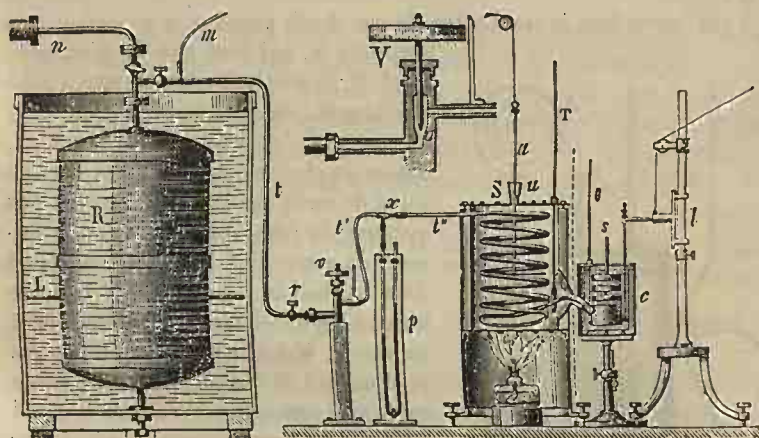


Fig. 776.

plongé dans de l'huile entretenue à une température constante par une lampe à alcool ou à gaz, et régulièrement remuée par l'agitateur *a*. Du serpentin, le gaz passait dans le calorimètre *c*, dont il sortait par le tube *s*, après en avoir pris la température; ce que l'on vérifiait au moyen d'un thermomètre engagé dans le tube *s*.

Calorimètre. — Le calorimètre est représenté à part dans la figure 777; il est protégé contre le refroidissement par une enveloppe de laiton, polie en dedans, *ee*, fermée en dessus pour empêcher l'évaporation, et dans laquelle il s'appuie sur des cônes de liège. L'eau qu'il contient est mêlée régulièrement par l'agitateur *a*, *a* (fig. 777), dont une règle fixe, *l* (fig. 776), dirige le mouvement.

¹ *Comptes rendus de l'Acad. des Sc. de Paris*, t. XXXVI, p. 676; *Mémoires de l'Institut (Académie des sciences)*, t. XXVI; et *Relation des expériences sur les données, etc.*, nécessaires au calcul des machines à feu, t. II, p. 41.

Le gaz arrive d'abord dans le vase *v* (fig. 777), et passe successivement dans des boîtes α , β , γ , dans lesquelles des cloisons en spirale, représentées à part en A, le forcent de circuler.

Quand le gaz attaquait le cuivre, le serpentín S (fig. 776) était en platine, ainsi que le vase *v* (fig. 777), qui était surmonté d'un serpentín de même métal remplaçant les boîtes α , β , γ .

On obtenait le poids de l'eau du calorimètre en mesurant son volume dans un ballon à col étroit, jaugé exactement à 4°; et l'on calculait ce poids comme si l'eau eût été à 4°, parce que la capacité calorifique de ce liquide augmentant un peu avec la température, il y avait sensiblement compensation entre cet accroissement et la diminution de la valeur du poids, quand la température était plus élevée.

A son entrée dans le calorimètre, le gaz devait posséder la température du serpentín S, qui avait 10^m de développement. M. Regnault s'en est, du reste, assuré directement, en soudant en σ (fig. 777) un tube vertical contenant un thermomètre *t*, autour du réservoir duquel le gaz circulait avant de sortir par le tube *d*. Ce tube était préservé du refroidissement par un renflement du réservoir à huile, puis enveloppé d'un bouchon de liège qui servait en même temps à l'ajuster à un tube de verre adapté au vase *v*. Malgré ces précautions, le gaz perd un peu de chaleur dans son passage en *d*; mais cette perte est insensible, quand la vitesse du gaz est suffisamment grande, car les résultats sont alors indépendants de la vitesse, tandis qu'ils croissent avec elle quand elle est au-dessous d'une certaine limite.

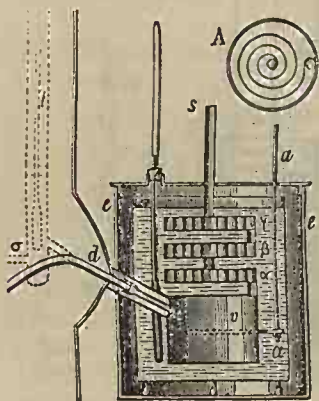


Fig. 777.

Si le gaz augmentait sensiblement de volume par son expansion propre en entrant dans le calorimètre; il en résulterait un refroidissement difficile à apprécier. M. Regnault a reconnu, en faisant communiquer les tubes *d* et *s* avec des manomètres à eau, que la différence des pressions dans ces deux tubes n'était que de 1^{mm} d'eau; il ne pouvait donc en résulter aucun effet calorifique sensible.

1088. Vitesse et masse du gaz. — Il était nécessaire, pour la régularité de l'échauffement du calorimètre, que le gaz traversât l'appareil avec une vitesse constante. Quand on voulait opérer sous la pression atmosphérique, on obtenait ce résultat, malgré la diminution de pression dans le réservoir R, en gênant plus ou moins le passage du gaz, au moyen d'une vis, *v*, à large tête divisée (fig. 776), vue à part en V, traversant une boîte à étoupes, et dont l'extrémité inférieure terminée en cône, fermait plus ou moins l'ouverture *o*. Le tube *t'*,

assez large, présentait un étranglement en x , de manière que la pression était toujours moindre en t'' qu'en t' , où elle était mesurée par un manomètre à eau p . En faisant tourner à la main la vis V , v , de manière à maintenir la pression constante en p , on rendait la vitesse constante en t'' et dans tout l'appareil. Quant à la différence de pression en t' et t'' , on l'établissait au moyen du robinet r , et en relevant plus ou moins la vis en commençant.

Quand le gaz devait circuler sous une pression plus grande que celle de l'atmosphère, le tube s était terminé par une ouverture étroite; la partie rétrécie x était supprimée, de manière que le gaz se détendait en passant par l'ouverture o et possédait dans le reste de l'appareil une pression supérieure à celle de l'atmosphère, donnée par le manomètre p dans lequel l'eau était remplacée par du mercure.

A la fin de chaque expérience, il fallait connaître la masse de gaz qui avait traversé le calorimètre. Cette masse se déduisait de la diminution de pression du réservoir R . On mettait ce réservoir en communication avec un ballon à robinet, et l'on pesait le gaz qui remplissait ce ballon, en prenant les mêmes précautions que dans la mesure des densités des gaz (1048), et en tenant compte de la diminution de pression produite par la sortie de ce volume de gaz.

Supposons d'abord la loi de Mariotte exacte, et le volume V du réservoir R , invariable. Soient H et H' les pressions en R avant et après la sortie du gaz, dont d est la densité à 0° et à la pression de 760^{mm} ; les poids du gaz, contenus dans le réservoir, sous les pressions H et H' , seront $P = \frac{V d H}{760 (1 + \alpha t)}$, et $P' = \frac{V d H'}{760 (1 + \alpha t)}$; α étant le coefficient de dilatation de l'air. La différence de ces poids est égale au poids p du gaz introduit dans le ballon; on a donc

$$p = Vd \frac{(H - H')}{760 (1 + \alpha t)}. \quad [1]$$

La valeur de p étant connue, on calcule la valeur du produit Vd , et la formule sert ensuite à calculer p pour un abaissement de pression $H - H'$.

La loi de Mariotte n'est pas exacte, et le volume V du réservoir change avec la pression. Mais comme les effets qui résultent de là sont très-faibles, on peut toujours représenter le poids du gaz qui remplit le récipient à 0° , par une formule empirique $P_0 = aH + bH^2 + cH^3$; d'où l'on déduit le poids à la température t , en divisant par $1 + \alpha t$. En retranchant l'un de l'autre les poids P , P' qui correspondent aux pressions H et H' , il vient

$$p = \frac{a(H - H') + b(H^2 - H'^2) + c(H^3 - H'^3)}{1 + \alpha t},$$

formule qui donne le poids p du gaz recueilli dans le ballon à densités, quand la pression passe de H à H' . Pour déterminer les constantes a , b , c , on fait trois expériences semblables sous des pressions H très-différentes; on a ainsi trois

valeurs de p , et par suite trois équations de condition, au moyen desquelles on calcule les trois constantes a , b , c .

1089. Corrections. — Soit P le poids du gaz qui a traversé l'appareil, T sa température à son entrée dans le calorimètre, t et θ les températures initiale et finale de ce dernier; la quantité de chaleur abandonnée par le gaz sera $Px [T - \frac{1}{2}(t + \theta)]$. Or le calorimètre reçoit, en outre, de la chaleur venant de l'extérieur. Soit r l'élévation de température produite par cette chaleur étrangère pendant la durée de l'expérience, p l'équivalent en eau du calorimètre, en remplaçant la température finale θ par $\theta - r$, il viendra

$$Px [T - \frac{1}{2}(t + \theta)] = p [(\theta - r) - t]. \quad [1]$$

Voici maintenant comment on évalue la quantité r . Cette variation de température provient : 1° de la chaleur rayonnée par les écrans, et de celle qui passe par conductibilité à travers le tube d (fig. 777); les changements de température du calorimètre étant négligeables par rapport à T , qui est relativement très-grand, on peut regarder comme constant l'échauffement par minute, k , dû à ces causes. 2° Elle provient encore de l'action du milieu ambiant, qui est proportionnelle à la différence de température ($\tau' - \tau$) de l'air et du calorimètre. L'échauffement par minute est donc

$$m = C(\tau' - \tau) + k. \quad [2]$$

Pour déterminer les constantes C et k , on attend que la température T de l'huile du réservoir S soit parfaitement établie, et l'on observe pendant 10^{min} les variations de température du calorimètre et de l'air. τ' et τ étant les moyennes observées, c'est-à-dire les sommes de ces températures divisées par 10, l'équation [2] exprimera la variation de température pour une minute, et fournira une première équation de condition pour déterminer C et k .

Une seconde équation sera fournie par des observations faites après l'expérience calorifique, à laquelle on procède immédiatement à la fin de la 10^e minute. On fait donc passer le gaz, et l'on observe encore, de minute en minute, les températures du calorimètre et de l'air. En désignant par $t'_1, t_1; t'_2, t_2; t'_3, t_3; \dots$ les moyennes températures pendant chaque minute, les échauffements dus aux causes extérieures seront, pendant les minutes successives,

$$m_1 = C(t'_1 - t_1) + k; \quad m_2 = C(t'_2 - t_2) + k; \quad m_3 = C(t'_3 - t_3) + k; \dots$$

Au bout de n minutes, on arrête le passage du gaz, et l'échauffement r qui a été produit pendant les n minutes par les causes extérieures est

$$[3] \quad r = m_1 + m_2 \dots + m_n = C(t'_1 + t'_2 \dots + t'_n - t_1 - t_2 \dots - t_n) + nk.$$

Pour avoir la seconde équation, on observe comme avant le passage du gaz, à la fin de la n^e minute, la marche des thermomètres pendant 10^{min}; on déduit

de ces observations, l'échauffement m dû aux causes extérieures pendant une minute, et en désignant par τ'_1 , τ_1 les moyennes des températures de l'air et du calorimètre observées pendant ces 10^{min}, on a

$$m = C (\tau'_1 - \tau_1) + k,$$

équation qui, avec [2], servira à trouver les valeurs de C et k . Ces valeurs une fois connues, l'équation [3] donnera la valeur de r , qu'il n'y aura plus qu'à porter dans l'expression [1], qui donnera la capacité x .

1090. Cas des vapeurs. — Les vapeurs sont des gaz considérés près de leur point de liquéfaction. La détermination de leur capacité calorifique exige que l'on connaisse la *quantité de chaleur* qu'elles abandonnent sous l'unité de masse, pour passer à l'état liquide sans changement de température; quantité que nous apprendrons plus tard à mesurer. — Voici comment on opère. La vapeur du liquide en ébullition passe dans le serpentin S (fig. 776) et s'y échauffe jusqu'à T° , température supérieure au point d'ébullition Θ du liquide. Cette vapeur surchauffée se rend dans le calorimètre, s'y liquéfie, et le liquide formé reste dans le vase v , où il prend la température du calorimètre; son poids P est égal à celui de la vapeur employée. La quantité de chaleur reçue par le calorimètre est évaluée par le moyen indiqué dans le cas des gaz. Cette quantité de chaleur provient : 1° de la chaleur $Px(T - \Theta)$ abandonnée par la vapeur pendant que sa température descend de T° à Θ° , x désignant la capacité cherchée; 2° de la chaleur PL que la vapeur abandonne ensuite en se liquéfiant; 3° de celle enfin qu'abandonne le liquide formé, pour se refroidir de Θ° à la température finale θ du calorimètre, quantité égale à $P(c\theta - c_1\theta)$, en désignant par c et c_1 , les capacités moyennes du liquide entre 0° et Θ° , et entre 0° et θ° . On a donc

$$[x(T - \Theta) + L + c(\Theta - \theta)] = \frac{p}{P}(\theta - r - t) + c_1\theta,$$

t , r et p , ayant les mêmes significations que dans la formule [1]. On répète l'expérience en donnant au gaz une température T' beaucoup plus élevée que T ; θ , r , t , c_1 , se changent en θ' , r' , t' , c'_1 , et en retranchant membre à membre la nouvelle équation obtenue au moyen de ces quantités, de l'équation précédente, il vient

$$x(T' - T) = p \frac{\theta' - r' - t'}{P'} - \frac{\theta - r - t}{P} + c'_1\theta' - c_1\theta,$$

formule qui servira à calculer la capacité moyenne x de la vapeur entre les températures T' et T .

Les résultats obtenus ainsi sur les vapeurs, comportent des incertitudes assez grandes, L étant, comme nous le verrons, un nombre considérable, de sorte que les quantités que l'on retranche étant très-grandes, et la différence

$x (T' - T)$, très-petite, les erreurs d'observation, qui peuvent s'ajouter dans la différence, peuvent en former une partie importante.

1091. Résultats. — Il résulte des expériences de M. Regnault, que la capacité en poids des gaz qui suivent la loi de Mariotte ne dépend ni de la *pression*, ni de la *température* donnée par le thermomètre à air; ce qui montre que les indications de cet instrument sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit.

Pour les gaz liquéfiables, cette capacité est aussi indépendante de la pression, si ce n'est peut être très-près du point de liquéfaction; mais elle croît avec la température. Par exemple, l'acide carbonique a donné en poids, les nombres 0,18427; 0,20246; 0,21692, entre -30° et 10° , 10° et 100° , 10° et 210° . Sa capacité en poids peut être représentée par la formule $c = A0 + B0^2 + c0^3$. Il en est de même du protoxyde d'azote.

D'après plus de 100 déterminations faites dans des conditions variées, la capacité de l'air est notablement supérieure à celle qu'avaient trouvée Delaroche et Bérard. Il est à remarquer aussi que la capacité, en poids, de la vapeur d'eau, n'est que la moitié de celle de l'eau, et égale à celle de la glace. Voici les nombres trouvés par M. Regnault :

	GAZ	CHALEURS SPÉCIFIQUES		DENSITÉS ADMISES
		en poids.	en volume.	
Gaz simples ou mélangés.	Air.	0,2374	0,2374	1
	Oxygène.	0,2175	0,2405	1,1056
	Azote.	0,2438	0,2370	0,9713
	Hydrogène.	3,4090	0,2359	0,0692
	Chlore.	0,4210	0,2964	2,4502
	Brome.	0,0555	0,3040	5,4772
Gaz composés.	Protoxyde d'azote.	0,2262	0,3447	1,5241
	Bioxyde d'azote.	0,2315	0,2406	1,0390
	Oxyde de carbone.	0,2479	0,2399	1,9674
	Acide carbonique.	0,2169	0,3307	1,5201
	Acide sulfureux.	0,1544	0,3114	2,2143
	Acide chlorhydrique.	0,1845	0,2302	1,2474
	Acide sulhydrique.	0,2432	0,2857	1,4747
	Gaz ammoniac.	0,5080	0,2994	0,5894
	Hydrogène protocarboné.	0,5929	0,3277	0,5527
	Hydrogène bicarboné.	4,4040	0,4160	0,9672
Vapeurs.	Eau.	0,4805	0,2989	0,6219
	Sulfure de carbone.	0,1569	0,4122	2,6258
	Alcool.	0,4513	0,7171	1,5890
	Ether.	0,4797	1,2266	2,5573
	Éther chlorhydrique.	0,2738	0,6096	2,2269
	Éther bromhydrique.	0,1896	0,7026	0,1896

	GAZ	CHALEURS SPÉCIFIQUES		DENSITÉS ADMISES
		en poids.	en volume ¹ .	
Vapeurs (suite)	Ether sulphydrique	0,4008	1,2466	3,1101
	Éther cyanhydrique	0,4255	0,8290	1,9021
	Chloroforme	0,1568	0,8310	5,3000
	Liqueur des Hollandais	0,2298	0,7911	3,4500
	Éther acétique	0,4008	1,2184	3,0400
	Acétone	0,4125	0,8341	2,0220
	Benzine	0,3754	1,0114	2,6943
	Essence de térébenthine	0,5061	2,3776	4,6978
	Protochlorure de phosphore	0,1346	0,6386	1,7445
	Chlorure d'arsenic	0,1122	0,7013	6,2510
	Chlorure de silicium	0,1329	0,7788	5,8600
	Chlorure d'étain	0,0939	0,8639	9,2000
	Chlorure de titane	0,1263	0,8634	6,8360

Il résulte de la comparaison des nombres contenus dans ce tableau, que :

1^o Les chaleurs spécifiques *en volume*, de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène, diffèrent très-peu les unes des autres; ce qui confirme, pour ces gaz, la loi approximative de l'égalité de leurs capacités. Mais le chlore et le brome ont des capacités, sensiblement égales entre elles, très-supérieures à celles des autres gaz simples. Cela tient-il à la proximité du point de liquéfaction, ou bien faut-il en conclure que le chlore et le brome ne sont pas des corps simples, comme le cyanogène, qui présente tant d'analogies avec eux? C'est ce que tendrait à confirmer le grand pouvoir absorbant de ces deux vapeurs (870).

2^o L'égalité des capacités *en volume* s'étend, comme l'avait trouvé Du-Long (1086), aux gaz composés qui se forment sans condensation. Ces gaz sont en italiques sur le tableau précédent. Appliquée à l'oxyde de carbone, cette loi montre que la densité de la vapeur de carbone est bien celle qu'ont adoptée les chimistes. Il est à remarquer aussi que la loi s'applique à l'acide chlorhydrique, dont un des éléments, le chlore, ne satisfait pas à la loi des chaleurs atomiques, quand il est isolé. — La loi relative aux gaz dans la formation desquels il y a condensation égale (1086) ne se vérifie pas, comme on peut le voir sur l'acide carbonique, les vapeurs d'eau et de sulfure de carbone, composés formés de trois volumes condensés en deux.

3^o Nous avons vu que la loi des chaleurs atomiques s'applique aux gaz simples

¹ On passe des nombres de la première colonne des deux tableaux à ceux de la seconde, en multipliant les premiers par les densités des gaz *par rapport à l'air* (1078). Si l'on voulait avoir les capacités *en volume*, en prenant pour unité la capacité de l'eau, il faudrait multiplier par les densités des gaz *par rapport à l'eau* (1078). Les capacités des gaz simples seraient alors à peu près égales à 0,000307.

qui suivent la loi de Mariotte (1083); mais il est à remarquer que le produit du poids atomique par la capacité en poids, est à peu près moitié de celui que donnent les solides et les liquides, et il en est de même du produit des capacités par les poids atomiques moyens des gaz composés; le produit se trouve divisé par 2. Il y a donc là un phénomène imprévu qui attend encore son interprétation physique.

4° La chaleur spécifique *en poids* d'un corps gazeux, est toujours plus faible que celle du même corps liquide; elle est quelquefois au-dessous de la moitié, comme pour le brome.

1092. Expériences nouvelles. — Depuis les remarquables expériences de M. Regnault, M. E. Wiedemann a mesuré la capacité d'un certain nombre de gaz, en s'appliquant à simplifier les appareils, et en réduisant la quantité de gaz employée. Il remplace le serpentín du calorimètre, qu'il fait en argent et qui n'a que 55^{mm} de hauteur, par trois tubes de même métal communiquant entre eux de manière à n'en former qu'un, et remplis de tournure d'argent, pour offrir au gaz une grande surface de contact. L'équivalent en eau de ce calorimètre n'atteignait pas 5^{gr}. Le gaz était chauffé dans un tube rempli de tournure d'argent, dans lequel il était poussé lentement par le procédé de Delaroché et Bérard; seulement, la vessie, de 20 litres de capacité, était en caoutchouc épais. L'expérience ne durant que 30^{min} la diffusion était négligeable. Les nombres trouvés par M. Wiedemann sont d'accord avec ceux qu'a publiés M. Regnault.

M. Jamin a appliqué aux gaz la méthode de l'électro-calorimètre (1062). Le gaz arrive par un tube de verre au milieu d'un bouchon, où un thermomètre en donne la température; de là, il passe dans un second tube contenant une hélice métallique chauffée par un courant; il passe ensuite sur un thermomètre, et revient, avant de sortir, autour du tube pour empêcher les pertes extérieures de chaleur. On attend que la température soit devenue constante; alors le gaz enlève à chaque instant autant de chaleur que l'hélice en apporte, et cette dernière chaleur étant connue (1062), on calcule la capacité du gaz comme à l'ordinaire, d'après la durée de l'expérience, l'échauffement du gaz et le volume qui a traversé. L'échauffement n'étant que de 20°, on échappe par ce procédé à l'incertitude relative à la chaleur qui peut pénétrer par le tube d'entrée du gaz dans le serpentín.

1093. De la capacité des gaz à volume constant. — Nous avons indiqué la différence que les physiiciens ont établie entre les chaleurs spécifiques des gaz à *pression constante* et à *volume constant* (1079). Les méthodes que nous avons décrites donnent la capacité sous *pression constante*. On n'a pu, jusqu'à présent, mesurer directement la capacité à *volume constant*, la quantité de chaleur absorbée ou cédée par le gaz étant insignifiante à côté de celle que le vase cède ou absorbe. On avait cru pouvoir la déduire de la capacité à *pression constante* telle qu'on la mesure habituellement, en en retranchant la chaleur qui se dégage quand on ramène brusquement le gaz à son volume primitif. On a fait à ce sujet beaucoup d'expériences que nous décrirons en

traitant de la quantité de chaleur produite par la compression des gaz. Mais ces expériences, propres à faire connaître cette quantité, ne peuvent donner la différence réelle entre les deux capacités.

En effet, la quantité de chaleur qu'absorbe un gaz qui se dilate sous la pression atmosphérique, se compose de trois parties distinctes : 1° la *capacité absolue* c' du gaz, c'est-à-dire la quantité de chaleur employée à augmenter sa température sans changement de volume; 2° la chaleur employée à dilater le gaz; celle-ci ne peut être qu'extrêmement petite, la cohésion dans les gaz étant à peine sensible, surtout chez les gaz permanents; 3° la chaleur employée à refouler l'atmosphère pendant la dilatation. Cette quantité, négligeable dans les solides et les liquides auprès de celle qui est dépensée pour vaincre leur cohésion, est considérable pour les gaz; car si nous supposons 1 mètre cube de gaz échauffé de 1°, la chaleur aura à effectuer un travail égal à $\frac{1}{273} P$, en représentant par P la pression atmosphérique en poids sur un mètre carré, ou

$$\frac{1}{273} \times 10336 \text{ kil} = 38 \text{ km.}$$

Si donc on appelle c et c' les capacités à pression constante et à volume constant, l la chaleur à dépenser pour produire une dilatation de $\frac{1}{273}$, v l'accroissement du volume V pour 0°, et enfin F la quantité de chaleur qui fournit le travail nécessaire pour refouler l'atmosphère, la quantité de chaleur $cV\theta$ absorbée pour échauffer le volume V , de 0°, aura pour expression $cV\theta = c'V\theta + lv + F$; d'où

$$c = c' + \frac{lV}{273 + t} + f, \text{ pour l'unité de volume et pour } 1^\circ, \text{ en remarquant que}$$

$$\text{l'on a } v = V \frac{\theta}{273 + t}, \text{ (1023), } t \text{ étant la température initiale. La différence}$$

entre les deux capacités provient surtout du terme f ; si f n'existait pas, c'est-à-dire si la dilatation s'accomplissait sans obstacle, sans production de *travail extérieur*,

$$\text{on aurait } c' = c - \frac{lV}{273 + t}. \text{ Le second membre différerait très-peu de } c,$$

la quantité l étant extrêmement petite, et il exprimerait la valeur vraie de la *capacité à volume constant*; mais f est loin d'être nul; il ne faut donc pas oublier que la valeur de c telle que la donne l'expérience est compliquée de la quantité de chaleur employée à vaincre la pression atmosphérique. En partant de cette valeur, on a trouvé dans le cas de l'air, pour le rapport $c : c'$ des nombres qui oscillent autour de 1,45, que l'on peut calculer en partant de la formule de la vitesse du son (I, 689), et que nous apprendrons à déterminer plus directement quand nous nous occuperons de la chaleur dégagée par la compression des gaz.

M. Jamin applique la méthode de l'électro-calorimètre à la détermination du rapport $c : c'$. Il fait passer un courant électrique intense à travers un fil métallique tendu dans une grande cloche de verre contenant le gaz, dans lequel il introduit ainsi une quantité de chaleur connue. Une partie de cette chaleur

se perd par rayonnement; l'autre fournit au gaz une quantité de chaleur qu'on calcule en partant de l'élévation de température déduite soit de l'augmentation de volume sous pression constante, soit de l'augmentation de pression sous volume constant. Des deux résultats, on peut déduire le rapport des deux capacités.

CHAPITRE VI

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS — VAPEURS

«..... Comme l'eau a la propriété, étant par le feu changée en vapeur, de faire ressort comme l'air, et ensuite de se recondenser si bien par le froid qu'il ne lui reste plus aucune apparence de cette force de ressort, j'ai cru qu'il ne seroit pas difficile de faire des machines dans lesquelles, par le moyen d'une chaleur médiocre et à peu de frais, l'eau seroit ce vide parfait, qu'on a inutilement cherché par le moyen de la poudre à canon..... »

(PAPIN, *Recueil de diverses pièces*, etc., 1695, p. 53.)

§ 1. — FUSION ET SOLIDIFICATION

I. Fusion des corps solides.

1094. Le premier effet de la chaleur sur les corps est d'élever leur température et de les dilater; et, dans le chapitre précédent, nous avons vu comment on mesure les quantités de chaleur nécessaires pour produire ces modifications. La chaleur peut aussi changer l'état des corps. Quand on chauffe suffisamment un corps solide, il *fond*, c'est-à-dire qu'il passe à l'état *liquide*. Si l'on chauffe ce liquide, il se dilate, puis se transforme à son tour, et passe à l'état de *vapeur* ou de *gaz*. Si, au contraire, on refroidit convenablement certains gaz, ils se condensent et prennent l'état liquide, puis se solidifient, si le refroidissement est suffisant. Ces passages successifs d'un état à un autre exigent pour s'accomplir des quantités déterminées de chaleur, que l'on s'est appliqué à mesurer; ils sont accompagnés de phénomènes particuliers et sont soumis à des lois que nous allons étudier.

1095. Lois de la fusion. — Le passage d'un corps solide à l'état liquide peut se faire de deux manières différentes: par la chaleur ou par l'action d'un liquide qui le dissout. Les chimistes du dix-huitième siècle, qui considéraient la chaleur comme une matière, réunissaient ces deux modes de liquéfaction en un seul, en regardant la fusion par la chaleur comme une *dissolution* dans le

calorique. Nous allons nous occuper d'abord de la fusion par la chaleur. Voici les lois auxquelles est soumis ce phénomène :

1° *Chaque substance fond à une température déterminée, qu'on appelle son point de fusion.*

2° *Quand la fusion est commencée, la température du corps solide n'augmente plus; elle ne peut dépasser le point de fusion.*

3° *Pour la plupart des substances, il y a un changement brusque de volume au moment du passage à l'état liquide.*

Nous allons entrer dans quelques détails sur les deux premières lois; nous parlerons de la troisième en traitant du passage de l'état liquide à l'état solide, dans lequel les mêmes changements de volume se produisent, mais en sens inverse.

1096. Point de fusion. — L'existence d'un *point de fusion*, pour chaque corps, se présente si naturellement à l'esprit, qu'on a peine à concevoir comment la première loi a pu être si longtemps méconnue. Du reste, les divers corps fondent à des températures très-différentes : par exemple, le mercure solide fond à -40° , la glace à 0° , le soufre à 114° , le plomb à 325° , le fer, le cuivre, au rouge blanc, etc.

Corps réfractaires. — On nommait autrefois corps *fixes* ou *réfractaires*, ceux qui n'avaient pu être fondus. Ces termes s'appliquent aujourd'hui aux corps qui ne fondent que très-difficilement, comme le platine. La grande différence qui existe entre les points de fusion des corps, a fait admettre que tous pourraient être obtenus à l'état liquide, si l'on parvenait à porter leur température à un point assez élevé. En effet, on a vu diminuer le nombre des substances infusibles à mesure que l'on trouvait le moyen d'obtenir des températures plus élevées.

On obtient la fusion des substances réfractaires, au moyen de l'électricité ou du chalumeau à hydrogène et oxygène. C'est ce qu'on fait pour le platine. Cependant, M. H. Sainte-Claire Deville est parvenu à le fondre au feu de forge, dans un creuset de chaux, en faisant arriver l'air du soufflet par une couronne de petits trous qui le répandaient dans toute la masse du combustible, et en employant un coke très-dur en petits fragments, provenant des résidus de la combustion imparfaite de la houille. Il a pu, par le même moyen, fondre la silice, qui n'avait pu l'être que par le chalumeau à hydrogène et oxygène. Au moyen de ce dernier instrument, Lavoisier a fondu la chaux, la magnésie, la baryte, et M. Gauguain, le quartz et l'alumine. Les miroirs et les verres ardents ont aussi été employés. Despretz est parvenu à fondre le bore et le silicium, dans l'arc éblouissant formé par l'électricité d'une pile de 600 éléments dont nous indiquerons plus tard la disposition. Le charbon lui-même s'est ramolli entre les mains du même physicien, et a donné des indices non équivoques de fusion.

Dans le tableau suivant sont indiqués les points de fusion d'un certain nombre de corps :

SUBSTANCES	DEGRÉS centigrades.	SUBSTANCES	DEGRÉS centigrades.	PYROMÈTRE de Wedgwood.
Mercure.....	— 39°	Étain.....	235°	
Brome.....	— 20	Bismuth.....	260	
Essence de térébent.	— 10	Plomb.....	325	
Glace.....	0	Zinc.....	362	
Beurre.....	32	Antimoine.....	433	
Suif.....	33	Bronze.....	900	
Spermaceti.....	49	Argent pur.....	1000	20
Stéarine.....	55	Cuivre.....	"	27
Acide margarique...	60	Fonte blanche.....	1050	"
Cire vierge.....	61	Fonte grise.....	1100	"
Cire blanche.....	68	Or ($\frac{4}{10}$ cuivre).....	1180	"
Acide stéarique....	70	Or pur.....	1250	32
Phosphore.....	44	Cobalt.....	"	130
Potassium.....	58	Acier.....	1400	130
Sodium.....	90	Fer doux.....	1500	130
Iode.....	107	Fer écroui.....	1600	"
Soufre.....	114	Nickel.....	"	160
Campbre.....	175	Manganèse.....	"	160

Presque toutes les températures supérieures à 500° ont été déterminées par Pouillet, soit au moyen du pyromètre à air (1040), soit au moyen du platine, par la méthode calorimétrique (1067).

Procédé de Hall. — Il y a des corps qui se décomposent par la chaleur avant d'entrer en fusion. Hall, pour confirmer la théorie géologique de Hutton, a fait des expériences dans lesquelles il a pu fondre la craie, la houille, la corne¹. Il renfermait ces substances dans des tubes de porcelaine ou de fer hermétiquement fermés, de manière que les gaz provenant d'une petite portion décomposée, exerçaient une pression énorme, qui empêchait la décomposition du reste. La craie entre ainsi en fusion et prend souvent, après le refroidissement, l'aspect du marbre saccharoïde, dont la cassure présente une multitude de facettes cristallines. La sciure de bois se transforme en un charbon bitumineux semblable à la houille et brûlant avec une flamme brillante.

1097. Fusion vitrée. — La plupart des corps passent brusquement à l'état liquide, comme la glace, le soufre, les métaux, après être devenus friables quelques degrés auparavant. D'autres, au contraire, se ramollissent graduellement, de sorte que le passage d'un état à l'autre se fait peu à peu, et que le point de fusion ne peut être fixé. Seulement, à chaque degré de mollesse correspond une même température, autant qu'on en peut juger, l'appréciation du degré de

¹ Bibliothèque britannique (1804), t. XXVII, p. 289.

consistance étant très-incertaine. Le verre, l'acide phosphorique, les silix, les résines, la poix..., sont dans ce cas. Ce mode de fusion se nomme *fusion vitrée*, le verre le présentant à un haut degré; c'est même sur cette propriété que sont fondés les divers procédés que l'on emploie pour souffler et travailler cette matière.

1098. Chaleur latente de liquidité. — Pendant qu'un corps fond, on remarque que sa température reste constante, quelle que soit l'intensité de la chaleur fournie. Ce phénomène remarquable a d'abord été observé sur la glace fondante, par les académiciens de Florence, et constaté depuis, sur une foule d'autres corps. Black en a conclu que toute la chaleur absorbée par le corps est employée à le faire fondre, et qu'elle reste confinée dans sa masse, où sa présence est nécessaire pour le maintenir à l'état liquide. Si l'on fournit une plus grande quantité de chaleur, on fait fondre dans le même temps une plus grande masse de matière. Un corps à l'état liquide posséderait donc une quantité considérable de chaleur, insensible à nos organes ainsi qu'au thermomètre. Cette chaleur a reçu le nom de *chaleur latente*, par opposition au nom de *chaleur sensible* donné à la chaleur qui produit des effets extérieurs.

On croyait autrefois que la température de fusion d'un corps une fois atteinte, une légère addition de chaleur faisait tout fondre à la fois, en rompant l'équilibre des molécules. Mais l'expérience montre que la fusion se fait graduellement. Les académiciens de Florence avaient constaté que la glace conserve une température fixe pendant sa fusion dans un vase entouré d'eau bouillante. Fareinheit avait vu l'eau maintenue au-dessous de son point de congélation remonter subitement à 0° quand il la faisait ensuite congeler, expérience que de Mairan a beaucoup variée, en discutant l'opinion alors répandue que le point de fusion était variable. Le docteur Black, en 1762, ayant rapproché tous ces faits, distingua la *chaleur latente* et la *chaleur sensible*, après avoir reconnu que la température d'un mélange de poids égaux d'eau chaude et de glace était de beaucoup au-dessous de la moyenne de leurs températures primitives. Cette découverte concourut, avec celle de la chaleur spécifique, à rendre célèbre l'école d'Édimbourg. Des expériences faites sur les métaux et sur les sels, particulièrement par Landriani, permirent de généraliser le phénomène.

On doit se demander si la chaleur qui disparaît existe bien réellement, à l'état *latent*, dans le liquide formé, ou si, plutôt, elle n'est pas *détruite* pendant le changement d'état. C'est cette dernière opinion qu'on est conduit à admettre, dans la théorie *mécanique* de la chaleur (817) : la quantité de chaleur qui a disparu a fourni le *travail* nécessaire pour séparer les molécules, en vainquant la cohésion. Quoi qu'il en soit, l'hypothèse de la chaleur latente, considérée comme expression des faits, peut être conservée provisoirement sans inconvénient. C'est ce que nous ferons, sauf à revenir sur ce sujet quand nous étudierons la thermodynamique.

II. Solidification des liquides.

1099. Phénomènes relatifs à la température. — Quand on enlève suffisamment de chaleur à un liquide, il passe à l'état solide. La *solidification* porte le nom de *congélation* quand elle se fait à une basse température; elle est soumise aux lois suivantes :

1^o *Le point de solidification est fixe pour chaque substance, et le même que le point de fusion.* A la température du point de fusion, la moindre soustraction de chaleur fait solidifier une partie du corps s'il est à l'état liquide, et la moindre addition de chaleur en fait fondre une partie s'il est à l'état solide, ce qui a été établi par Newton, après avoir été longtemps contesté. Les points de solidification des divers liquides sont donc très-différents; et il en est qui passent peu à peu d'un état à l'autre, en augmentant graduellement de consistance. Ce sont ceux qui présentent la *fusion vitrée* (1097) :

2^o *Pendant tout le temps de la solidification, la température du liquide ne s'abaisse pas*, quelle que soit la quantité de chaleur soustraite à chaque instant. Baumé vit, le premier, de l'eau entourée d'un mélange réfrigérant, rester à 0°, pendant que la congélation se faisait graduellement; d'où il conclut qu'il se dégageait de la chaleur pendant la congélation. Ce fait s'explique par la transformation de la *chaleur latente de liquidité* en chaleur sensible. Cette chaleur rétablit continuellement la température; sans cela la solidification se ferait subitement et en même temps dans toute la masse, dès que le point de congélation serait atteint. Nous verrons quelle interprétation fournit la théorie mécanique de la chaleur.

Certains liquides n'ont pu être solidifiés; comme le sulfure de carbone, l'alcool absolu et plusieurs autres d'origine organique. Cependant, Despretz, au moyen d'un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther, a pu rendre l'alcool assez consistant pour que le vase qui le contenait pût être renversé sans le répandre. La grande différence entre les points de solidification des divers liquides, autorise à penser que tous se congèleraient si l'on pouvait les refroidir suffisamment.

Le mercure a été congelé pour la première fois, par Braun, en 1759, dans un mélange réfrigérant de neige et d'acide nitrique. Ce métal présente alors l'aspect du plomb; on peut le battre à coups de marteau. En le touchant, on éprouve une impression que l'on confond avec celle que produit un fer chaud. On a vu, depuis, le mercure se congeler par le froid de l'atmosphère.

1100. Surfusion. — La température d'un liquide peut être abaissée au-dessous du point de solidification, sans qu'il change d'état; mais le contact d'une parcelle solide de la substance provoque instantanément la solidification d'une partie du liquide, et la température remonte au point de fusion. Ainsi, l'étain fondu, qui se solidifie à 228°, peut rester liquide à 225°. Le salpêtre en fusion

reste souvent liquide au-dessous du point de solidification, puis il se solidifie tout à coup, et sa température remontant au point de fusion, le vase, s'il est de verre ou de porcelaine, peut être brisé par cet échauffement brusque. Le phosphore, qui fond à $44^{\circ},2$, peut rester liquide à 15° , et même à -5° comme l'a vu M. Schroetter. E. Desains a remarqué qu'il ne remonte au point de fusion en se solidifiant, qu'autant que sa température n'est que de quelques degrés au-dessous de ce point, à cause des pertes de chaleur à l'extérieur. Le soufre fondu sur la boule d'un thermomètre, s'y maintient liquide de 15° à 10° , en gouttelettes qui se solidifient subitement par la pression d'un corps dur.

Voici comment M. Gernez montre la surfusion de certains corps¹. Prenons pour exemple le phosphore. Dans un grand ballon (*fig. 778*) rempli d'eau à 45° , on plonge deux étroites éprouvettes *t*, *t'*, contenant du phosphore fondu sous l'eau. On laisse refroidir le ballon, et l'on voit le phosphore rester liquide à 30° , et même à 10° si l'on a mis un peu de potasse ou d'acide azotique dans l'eau qui le recouvre. On peut enfoncer un fil de fer dans ce phosphore liquide, pourvu qu'on ne touche pas les parois, sans provoquer la solidification; mais elle se produit aussitôt, si l'on comprime du phosphore contre les parois. Il en est de même si le fil de fer retient quelques parcelles de phosphore blanc; et, si l'on a mis préalablement dans l'éprouvette une goutte de mercure et un peu d'acide azotique, le phosphore solidifié est noir. Le phosphore rouge ne provoque pas la solidification comme le phosphore blanc.

Le soufre peut être surfondu dans le même appareil, seulement il faut porter l'eau du ballon à 80° au moins.

M. Gernez a appliqué la surfusion à la détermination exacte du point de solidification des corps qu'on n'a qu'en petite quantité. On fait fondre avec surfusion, dans un tube de verre bouché, de 3^{cm} de diamètre, une quantité de substance formant une couche liquide de 5 à 6^{cm} de hauteur, au milieu de laquelle est maintenu un petit thermomètre. On plonge le tube dans un bain dont la température est un peu inférieure au point de solidification présumé; quand la température du bain est à peu près égale à celle du liquide, on provoque la solidification au moyen d'un fil de verre retenant quelques parcelles de la substance; le thermomètre monte, et sa température est un peu inférieure à celle que l'on cherche. On recommence l'opération en prenant pour guide cette température plus approchée, et au bout de deux ou trois essais, quand on arrive à des résultats qui diffèrent à peine, on prend le plus élevé pour point de solidification.

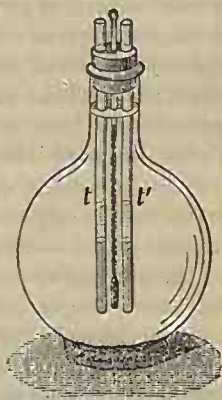


Fig. 778.

¹ *Journal de physique*, de M. d'Alméida, t. III, p. 17 et t. V, p. 213.

1401. Surfusion de l'eau. — Le phénomène de la *surfusion* a été d'abord observé et étudié sur l'eau. Fahrenheit put maintenir liquide de l'eau dans un matras à col effilé et fermé à la lampe, exposé à l'air au-dessous de 0° . Ayant brisé la pointe, il vit aussitôt la glace se former; ce qu'il attribua au contact de l'air. Mais une autre fois, ayant fait un faux pas pendant qu'il portait un vase contenant de l'eau au-dessous de 0° , une partie se congela subitement, et en même temps la température remonta à 0° , à cause de la chaleur dégagée par la partie solidifiée. Phénomène dans lequel il crut voir le passage à l'état *sensible*, de la *chaleur latente* de liquidité.

On peut porter l'eau jusqu'à -12° , tout en lui conservant l'état liquide, à la condition d'en maintenir les différentes parties en repos les unes par rapport aux autres, et d'éviter les courants intérieurs; ce qu'on obtient en refroidissant le vase lentement et par le bas. L'eau doit être limpide; sans cela, les parcelles en suspension qui se contractent autrement que le liquide, éprouveraient des déplacements. L'eau purgée d'air n'est pas aussi propre à ces sortes d'expériences; ce que Black attribua aux mouvements provoqués à la surface par l'air qui se dissout. Aussi réussit-on mieux en recouvrant la surface d'une couche d'huile, comme de Mairan l'a conseillé.

Blagden a constaté que, tandis que la glace se contracte au-dessous de 0° , comme tous les corps solides, l'eau continue de se dilater. Despretz a suivi sa dilatation jusqu'à -20° (1019).

Pour que l'eau au-dessous de zéro se solidifie en partie, il suffit d'y projeter une parcelle de glace, ou bien de faire vibrer le vase, de le frapper, de manière à déplacer les molécules liquides les unes par rapport aux autres. Aussitôt des aiguilles de glace s'entrecroisent en tous sens, et la température remonte à zéro; ce qui limite la masse de glace formée.

Expériences de M. Dufour. — Le contact des solides favorisant la congélation, M. Dufour opère sur des globules d'eau en suspension, suivant la méthode de M. Plateau (I, 169), dans un liquide de même densité formé d'un mélange de chloroforme, d'huile d'amandes douces et de pétrole¹. Le système liquide peut être abaissé à -10° sans congélation des globules d'eau, et même à -20° pour les plus petits. Une parcelle de glace détermine la congélation, ce que ne fait pas toujours l'agitation au moyen de baguettes de verre ou de métal. Si l'on pousse un des globules d'eau de 3 à 5^{mm} de diamètre, contre un globule égal de glace, et si le mélange est à -6° ou -7° , le globule liquide se congèle et reste contigu au globule de glace. Si la température est de -3° à -4° , le globule liquide s'étend sur l'autre en formant une bosseure plus ou moins étalée. En opérant ainsi sur plusieurs globules d'eau, on peut former des amas de glace présentant les formes les plus bizarres. Enfin, si le milieu est à -2° ou -1° , le liquide enveloppe entièrement le globule solide et le recouvre d'une couche de glace.

¹ *Bibl. de Gen.* (Arch. des sc.), 1861, et *Ann. de ch. et de ph.* 3^e s. LXVIII, 370.

Le soufre, qui fond vers 114° , mis en suspension dans une dissolution de chlorure de zinc, est encore liquide à 40° , et même, à 10° et 5° pour les globules de $\frac{1}{2}^{\text{mm}}$. Des globules de phosphore de 1 à 2^{mm} restent liquides dans la même dissolution à zéro; et la naphthaline, qui fond à 79° , dans l'eau à 40 degrés.

Le phénomène de la *surfusion* s'explique par l'inertie des molécules. Ces molécules sont les unes par rapport aux autres dans un état d'équilibre instable rendu permanent par la viscosité du liquide, qui les empêche de se déplacer les unes par rapport aux autres pour prendre les positions qui correspondent à l'état solide. Le contact d'une parcelle solide rompt l'équilibre, à cause de l'action exercée par les molécules déjà fixées, sur celles qui les touchent. Des vibrations, qui les déplacent les unes par rapport aux autres, les font céder aux forces qui tendent à les grouper régulièrement. Une agitation trop vive peut aussi empêcher la congélation, quoique la température soit inférieure à 0° , les molécules n'ayant pas le temps de céder à leurs actions mutuelles. Ce fait a été constaté par Despretz sur l'eau pure et sur les dissolutions de divers sels dans l'eau. Avec une dissolution de potasse renfermant 0,617 de cette substance, la température peut être maintenue, pendant l'agitation, à plus de 2° au-dessous du point de congélation ¹. Cette circonstance a conduit Despretz à définir ce point : *la température stationnaire et constante qui se produit quand le passage à l'état solide est commencé*; alors la température est celle du point de fusion.

On peut encore maintenir l'eau au-dessous de 0° , en la renfermant dans des tubes très-capillaires; l'adhérence aux parois du tube, gênant les mouvements des molécules, empêche leurs déplacements relatifs. Despretz a pu maintenir ainsi de l'eau à -20° , dans des tubes thermométriques ordinaires. Ce phénomène explique comment les plantes résistent à la gelée, les fluides étant chez elles renfermés dans des vaisseaux microscopiques. Comme il est difficile de distinguer un filet très-mince d'eau, d'un filet de glace, M. Sorby observe dans la *lumière polarisée*, au moyen d'un microscope armé d'un *polariscope*; si l'eau est congelée, le filet paraît coloré, comme nous l'expliquerons dans l'optique.

Les liquides, et particulièrement l'eau en gouttelettes fines, peuvent rester liquides au-dessous de zéro, à cause de l'action exercée sur les molécules intérieures par celles de la superficie, qui sont dans un état d'équilibre particulier (I, 310). C'est ce qui a lieu, d'après M. Mousson, pour des gouttes d'eau de moins de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre, posées sur une surface qu'elles ne mouillent pas; le contact d'une pointe d'aiguille les fait aussitôt congeler. De fines gouttelettes de phosphore, de soufre, et même d'argent fondu, présentent ainsi une inertie moléculaire remarquable. Il résulte de là que les gouttelettes d'eau très-fines des nuages et des brouillards, peuvent être bien au-dessous de 0° . Ce fait, déjà remarqué par de Saussure, en 1783, a été établi surtout par M. Fournet, au moyen de nombreuses observations poursuivies pendant l'hiver,

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. V, p. 19.

de 1841 à 1855. Souvent le thermomètre était à -10° , -12° , et même -15° , et l'air était obscurci par un épais brouillard ¹.

1102. Problème. — On peut demander quelle proportion de liquide en surfusion se solidifiera quand on agitera, en supposant connu le nombre de calories, l , qu'abandonne 1^{er} de la substance en se solidifiant. — Soit T° le point de fusion, P le poids du liquide, t sa température inférieure à T , et c sa chaleur spécifique. Supposons que le liquide s'échauffe d'abord jusqu'à T° en conservant son état. Il faudra pour cela qu'il reçoive avec le vase qui le contient un nombre de calories égal à $(Pc + \pi y)(T - t)$, π et y étant le poids et la capacité du vase. Ce nombre de calories est fourni par la masse x qui se solidifie; elle est donc égale à lx , et l'on a

$$[1] \quad (Pc + \pi y)(T - t) = lx, \quad \text{qui devient} \quad Pc(T - t) = lx, \quad [2]$$

si l'on fait abstraction du vase.

Si l'on veut connaître la température t pour laquelle toute la masse serait solidifiée, il faut remplacer x par P , et alors l'équation [2] donne $t = T - \frac{l}{c}$ pour le phosphore; on aurait, d'après E. Desains, $T = 44^{\circ},2$, $c = 0,2$, $l = 5,4$, et alors $t = 17^{\circ},2$.

Dans le cas de l'eau, on a $T = 0$, $c = 1$, $l = 80$, et l'équation [2] devient $-tP = 80x$, qui donne pour la température de surfusion pour laquelle il y aurait congélation de tout le liquide, $t = -80$. On n'a pas pu jusqu'à présent maintenir l'eau liquide à une température aussi basse.

Nous avons supposé dans ce qui précède, que la capacité de l'eau ne change pas au-dessous de zéro, et que l'effet calorifique est le même quand la congélation ne se fait qu'après que tout le liquide est arrivé à 0° , et quand elle commence à $-t^{\circ}$. E. Desains a démontré qu'il en est ainsi². Pour le second point; il a montré par l'expérience « qu'un liquide, pour s'échauffer d'une température inférieure à son point de fusion jusqu'à une température supérieure, exige la même quantité de chaleur, soit que dans ce passage il se gèle et se fonde ensuite, soit au contraire qu'il reste toujours liquide. »

1103. Particularités que présente le soufre. — Le soufre liquide quand on l'échauffe au-dessus de son point de fusion qui est vers 114° , devient de plus en plus visqueux, en même temps que sa couleur se rembrunit; et, entre 200° et 250° , il est tellement épais qu'on peut renverser le vase qui le contient sans le répandre. Au delà, il reprend sa fluidité en absorbant beaucoup de chaleur, et devient presque noir, jusqu'à 440° où il entre en ébullition. Si on le verse dans l'eau froide pendant qu'il est à plus de 200° , il se solidifie sous forme de cordons flexibles, mous, élastiques, semblables à des cordons de caoutchouc, et qui ne

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XLVI, p. 203.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXIV, p. 419.

reprennent l'aspect du soufre ordinaire qu'au bout d'un temps plus ou moins long.

M. Gernez, en cherchant le point de solidification du soufre, par sa méthode de la surfusion (1100), a observé plusieurs faits très-curieux ¹. Si le soufre liquide provient de la fusion de la variété insoluble dans le sulfure de carbone, le point de solidification est toujours le même, 114°,3, quelle que soit la température à laquelle le liquide peut avoir été préalablement porté. Mais si l'on a fait fondre des cristaux de soufre octaédrique, le point de solidification change avec la température qu'a subie le liquide. Si ce liquide a été porté à

121°. 144°. 170°. 200 à 447°,

la solidification a lieu aux températures

117°,4. 113°,4. 112°,2. 114°.

On voit que le point de solidification s'abaisse, quand la température subie par le liquide s'élève jusqu'à 170°; au delà, le point de fusion monte, et, à 447°, il est à peu près le même que pour le soufre insoluble.

Si le liquide vient de la fusion du soufre prismatique, les résultats sont ceux du liquide provenant du soufre insoluble ou du soufre octaédrique, suivant que le soufre prismatique a été obtenu par la cristallisation de l'une ou de l'autre de ces deux variétés.

Ces résultats expliquent les divergences entre les points de solidification du soufre trouvés par différents observateurs, et qui varient de 105° à 124°. Ils montrent aussi que le soufre liquide conserve des traces de la structure qu'il possédait à l'état solide, ou un groupement de molécules qu'on ne peut faire disparaître que par des fusions et des cristallisations répétées. L'eau nous montre aussi un exemple de groupement particulier des molécules liquides, quand elle se dilate par le refroidissement, de 4° à 0° et au-dessous de 0°, et quand elle présente un maximum de viscosité à 4° (I, 273).

1104. Changement du point de fusion avec la pression. — Des considérations théoriques relatives à la transformation de la chaleur en travail mécanique avaient fait penser à M. J. Thomson qu'il devait y avoir, sous l'influence de la compression, un léger abaissement du point de fusion de la glace, qui augmente de volume en se formant; tandis que la pression devait élever le point de fusion des corps qui se contractent en se solidifiant. M. W. Thomson a voulu vérifier ce résultat par l'expérience ². Comme la



Fig. 779.

¹ *Journal de physique*, de M. Ch. d'Almeida, t. V, p. 212.

² *Phil. Magaz.*, 3^e sér., p. 423; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e sér., t. XXXV, pp. 384 et 383.

théorie n'indique qu'une fraction de degré pour 10 atmosphères, il a remplacé le mercure du thermomètre par l'éther, qui se dilate 9 fois plus. L'instrument, renfermé, pour le soustraire à la compression, dans un tube épais contenant du mercure qui enveloppait son réservoir *t* (fig. 779), était introduit dans l'appareil d'Ersted pour la compressibilité des liquides. Cet appareil était rempli d'eau distillée, avec de la glace au fond, et en haut où elle était soutenue par une rondelle de plomb *r*. Le thermomètre étant à 0°, on comprima l'eau, en enfonçant le piston au moyen de la vis *v*, et l'on vit le thermomètre baisser. La température de l'eau en contact avec la glace se trouvait donc au-dessous de zéro, ce qui montre que le point de congélation était abaissé. Deux expériences faites avec soin ont donné $-0^{\circ},059$ et $-0^{\circ},129$, sous les pressions de 8,1 et de 16,8 atmosphères, pressions données par le manomètre *n*.

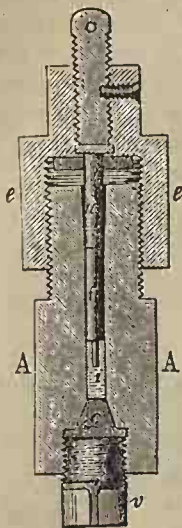


Fig. 780.

M. Mousson, au moyen de compressions énormes, est parvenu à abaisser le point de congélation de l'eau jusqu'à -18° ¹. L'eau est contenue dans un prisme d'acier AA (fig. 780), foré dans toute sa longueur, et dont l'orifice inférieur est bouché par un cône de cuivre *c*, pressé par une forte vis *v*. La partie supérieure du canal, légèrement conique, est fermée par un

long cône de cuivre *f* sur lequel s'appuie un cylindre d'acier *a* que l'on presse fortement en faisant tourner l'écrou *ee*. L'appareil, renversé et ouvert en *e*, fut

rempli d'eau bouillie; on y introduisit un morceau de fil de cuivre *i* destiné à servir d'index, et l'on fit congeler l'eau. On plaça alors le bouchon *cv*, et l'appareil étant redressé dans la position de la figure, on le plongea dans un mélange réfrigérant à la température de -18° à -20° . On exerça ensuite une très-forte compression en faisant tourner l'écrou *ee* au moyen d'un long levier. La vis *v* ayant ensuite été desserrée, le cône *c* fut repoussé, la glace l'enveloppa instantanément, et l'index *i* fut trouvé immédiatement derrière lui. Cet index avait donc pu descendre à travers la colonne; la glace était donc devenue liquide pendant l'expérience, pour ne se congeler qu'au moment où l'on avait cessé de la comprimer. M. Mousson évalue la pression exercée dans cette expérience, à 130 kil. environ par millimètre carré, ou à plus de 13000 atmosphères. La diminution correspondante de volume aurait été d'environ $\frac{41}{77}$.



Fig. 781.

D'après les calculs de M. Puschl, la température du maximum de densité s'abaisse aussi par la compression, de 1° pour 87 atmosphères.

¹ *Bibl. de Gen.* (arch. des sc.), t. III, 1858; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e s., t. LVI, p. 252.

Le cas des substances qui se contractent en se solidifiant a été étudié par M. Bunsen sur le blanc de baleine et la paraffine¹. Un tube capillaire à parois épaisses (fig. 781), recourbé en *cde*, présente un renflement *bc*. On le remplit de mercure, et l'on ferme à la lampe l'extrémité *a*, en y laissant une petite colonne d'air destinée à mesurer les pressions. On fait sortir un peu de mercure en *e*, on le remplace par du blanc de baleine ou de la paraffine, et l'on ferme l'extrémité *e*. La partie *cde* étant plongée seule dans de l'eau à 50°, la substance fond, puis, l'eau se refroidissant, elle se solidifie à une température indiquée par un thermomètre placé à côté de l'instrument. On répète l'expérience en plongeant dans l'eau chaude une partie plus ou moins grande du renflement *bc*, de manière que le mercure, en se dilatant, comprime le blanc de baleine. On trouve alors que la solidification se fait à une température un peu plus élevée. Voici les résultats obtenus :

Blanc de baleine...	} Pressions.....	1 atm.	29	96	441	456
		Températures..	47°,7	48,3	49,7	50,5
Paraffine.....	} Pressions.....	1 atm.		85	100	
		Températures..	46°,3	48,9	49,9	

M. Hopkins a tiré de ces faits une conséquence importante, c'est que la croûte solide du globe doit être beaucoup plus épaisse qu'on ne le croit, quand on l'évalue en partant de la fusibilité des matériaux qui en composent les couches profondes, ceux-ci étant rendus peu fusibles par l'énorme compression qu'ils supportent.

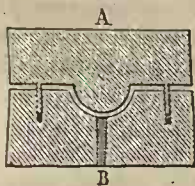


Fig. 782.

1105. Applications. — L'abaissement du point de congélation de l'eau par la pression a servi à expliquer l'espèce de ductibilité que présente la glace des glaciers, qui glissent dans les vallées, s'allongent en en suivant les sinuosités et en se moulant sur le fond, et présentent cette particularité que les couches inférieures, pressées par les couches supérieures, descendent plus vite que ces dernières, comme s'il s'agissait d'une masse pâteuse. Or M. Tyndall a prouvé, par des expériences directes, que la glace peut devenir plastique sous l'influence d'une forte pression². Il prit une boule de glace à zéro, de quelques centimètres de diamètre, et la comprima, au moyen d'une presse hydraulique, entre deux blocs de bois dur laissant entre eux une cavité lenticulaire. La glace fut d'abord écrasée, mais bientôt les fragments se soudèrent de manière à former, en quelques secondes, une lentille de glace transparente. En donnant aux cavités des formes différentes, M. Tyndall put mouler la glace sous des figures plus compliquées : médailles, statuettes, etc.

¹ *Annales de Pogg.*, t. LXXXI, p. 562; et *Ann. de ch. et ph.*, 3^e s., t. XXXV, p. 383.

² *Trans. phil.* (1857), 2^e p.; et *Bibl. de Gen.* (arch. des sc., 1858). t. II, p. 200.

Par exemple, on obtient une coupe de glace bien transparente au moyen des blocs A et B (fig. 782), dont on la sépara ensuite en poussant la cheville B.

Voici comment M. J. Thomson explique ces phénomènes. La glace comprimée se liquéfie en partie, parce que la compression abaisse le point de congélation ; et elle se refroidit à cause de l'absorption d'une certaine quantité de chaleur latente. L'eau de fusion est chassée dans les pores, et les fissures de la glace écrasée, où elle cesse d'être comprimée, ce qui fait remonter le point de congélation ; elle se solidifie donc en soudant les petits fragments.

1106. Regel. — MM. Tyndall et Forbes, n'admettant pas cette explication, ont cherché à rattacher le moulage de la glace à un autre phénomène découvert par Faraday, vers 1850, et désigné sous le nom de *regel*. Voici en quoi il consiste : si l'on met en contact deux morceaux de glace fondante, l'eau qui les mouille ne tarde pas à se congeler, de manière à les souder l'un à l'autre. On a voulu voir dans ce phénomène un effet de pression capillaire. Mais le résultat est

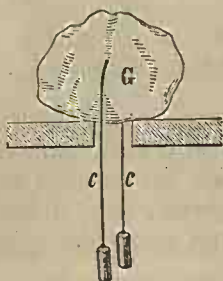


Fig. 783.

le même quand les morceaux de glace sont plongés dans l'eau, froide ou chaude. Des pièces de monnaie, des étoffes peuvent aussi se souder à la glace fondante. — Il nous semble que ces faits peuvent se rattacher aux phénomènes suivants observés par Person : si l'on plonge une masse de glace dans de l'eau maintenue à 0° , dans un vase entouré de glace fondante, cette masse s'accroît continuellement. Ce phénomène montre l'existence d'actions moléculaires exercées par la glace formée, sur les molécules d'eau à 0° . La chaleur dégagée par la congélation de celle-ci est sans cesse absorbée par le vase maintenu à 0° . Or, dans le cas du *regel*, tant que la surface de la glace est exposée à l'action de l'air ambiant, elle en reçoit de la chaleur, et fond ; quand ensuite elle est appliquée contre une autre bloc de glace, les actions des molécules solides sur celles de la mince couche d'eau interposée, déterminent la solidification de celle-ci, par une action analogue à celle qui fait que l'eau au-dessous de zéro se congèle subitement au contact d'une parcelle de glace. La chaleur latente abandonnée traverse la glace et produit une augmentation dans la fusion des parties extérieures. Il n'y aurait donc là qu'un déplacement de chaleur, occasionné par des actions moléculaires.

Dans l'expérience suivante due à M. J. Thomson, on voit d'une manière frappante le phénomène du *regel*. Sur un bloc de glace à 0° , G (fig. 783) est posé un fil de fer dont les deux brins pendants *c*, *c'* sont tendus par des poids égaux. On voit le fil pénétrer peu à peu dans le bloc et le traverser, et en même temps les faces de la fente se ressouder au point de ne se distinguer un peu que par quelques bulles d'air qui y sont restées engagées. On remarque que le fil de fer est au-dessous de zéro tout près de la glace ; car une goutte d'eau se congèle à son contact.

1107. Changement de volume. — Au moment de la solidification, il y a le plus souvent un notable changement de volume. Ce changement est ordinairement une contraction, comme pour le soufre, le mercure et la plupart des métaux. Mais il y a quelques substances qui augmentent de volume en se solidifiant. L'eau est dans ce cas. Réaumur a découvert la même particularité dans la fonte de fer, le bismuth, l'antimoine. Si l'on coule du bismuth dans des tubes de verre chauds, ils sont brisés au moment de la solidification. La fonte doit à cette propriété la perfection avec laquelle elle se moule. A ces métaux, il faut joindre l'acide sulfurique à 3 atomes d'eau, qui se congèle vers 6°; et, d'après M. Ermann, l'alliage formé de 1 partie de plomb, 1 d'étain et 4 de bismuth. On connaît donc 6 substances plus denses à l'état liquide qu'à l'état solide.

L'augmentation de volume de l'eau en se congelant est prouvée par ce fait que la glace flotte sur l'eau. Galilée, les académiciens de Florence ont constaté directement l'expansion de la glace; ceux-ci, en étudiant le maximum de densité, virent le niveau monter subitement dans leur tube thermométrique, au moment de la congélation. Néanmoins, cet accroissement de volume a été regardé depuis comme apparent. Huyghens, Homberg, Mariotte... l'attribuaient à l'air qui se sépare de l'eau refroidie; mais l'eau purgée d'air et congelée dans le vide éprouve la même expansion. De Mairan l'expliquait par un désordre dans l'entrecroisement des petites aiguilles de glace, d'où résulterait un volume apparent plus grand que le volume réel. Mais ces explications tombent devant les expériences qui prouvent que l'expansion se produit malgré les obstacles les plus résistants.

Force expansive de la glace. — Les académiciens de Florence firent congeler de l'eau dans une sphère de cuivre, qui s'étendit au point de ne pouvoir plus passer par un anneau qu'elle traversait facilement auparavant. Dans une autre expérience, la sphère se fendit, quoique très-épaisse.

Huyghens fit la même expérience avec un tube de fer; c'est de cette manière qu'on l'exécute aujourd'hui dans les cours: on remplit d'eau un tube de fer, par exemple un canon de pistolet dont on a bouché la lumière, et après avoir fermé l'ouverture avec un bouchon à vis, on le plonge dans un mélange réfrigérant. Au bout de quelque temps, on entend un craquement qui indique que le tube a été fendu dans une certaine étendue. La glace retirée du tube est opaque et flotte sur l'eau bouillante. La grande résistance du fer n'a donc pu empêcher l'expansion.

Le major d'artillerie Eward William, à Québec, en 1784, remplit d'eau une bombe de 13 pouces de diamètre, ferma le trou de la fusée avec un bouchon de fer enfoncé fortement, et l'exposa à la gelée. Au bout de quelque temps, le bouchon fut lancé à plus de 100 mètres, et un cylindre de glace de 0^m2 de long sortit de l'ouverture. Une fois, le bouchon ayant résisté, la bombe fut brisée, et l'on vit une lame de glace s'échapper par la fente (fig. 784). Ces expériences, répétées depuis, notamment en France, par MM. Martins et Chancel, ont montré que les éclats sont souvent lancés à plusieurs mètres, ce qui s'explique par la surfusion de l'eau sous l'influence de la forte pression due à sa dilatation à

partir de 4°, pression qui retarde la congélation, qui se fait ensuite subitement dès que le vase cède, en produisant l'effet de la détente d'un ressort. — M. Bous-singault a vu l'état liquide persister dans des tubes d'acier très-forts, exposés à des températures de -9° à -24° . Une bille intérieure que l'on faisait rouler permettait de constater l'état liquide de l'eau.

La force expansive de la glace explique un grand nombre de phénomènes : les vases, les tuyaux remplis d'eau, se brisent par la gelée; c'est pourquoi on enveloppe les pompes pendant l'hiver, d'étoffes de laine, de paille, ou mieux de fumier dont la fermentation lente dégage de la chaleur.

Quand l'eau contenue dans un vase profond présente une grande surface, ce vase n'est pas ordinairement brisé, surtout si la congélation se fait lentement. La glace augmentant d'épaisseur de dehors en dedans tant à la surface que sur les parois, l'eau emprisonnée, fortement comprimée, crève la croûte en son milieu où l'épaisseur est moindre et où la glace n'est pas soudée aux parois, et

s'épanche au-dessus. En même temps la glace formée sur les parois, les consolide et augmente leur résistance. Si le vase est brisé, la rupture se fait ordinairement du côté où la glace appliquée aux parois a le moins d'épaisseur, c'est-à-dire du côté le moins exposé au froid.

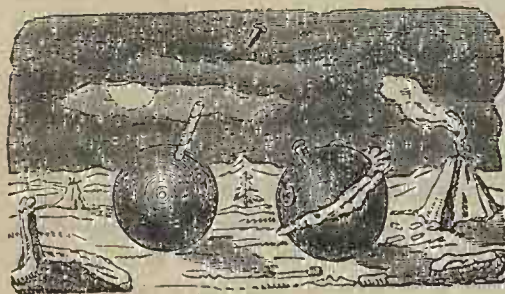


Fig. 784.

Quand une couche d'eau peu épaisse gèle dans toute son épaisseur, il se forme souvent des proéminences *n*, *c*, au-dessus des points où il y a plus de profondeur (fig. 785); l'augmentation d'épaisseur étant proportionnelle à la hauteur du liquide. Dans les pays froids, quand la terre est très-humide, le sol se gonfle en gelant, au point de soulever les édifices. Les pierres gélives tombent en poussière après la gelée : ce sont des pierres très-poreuses qui, imprégnées d'eau, se divisent en tous sens par l'expansion de la glace qui s'y forme. Les arbres éclatent par les grands froids, avec des détonations comparables à celles des armes à feu, par la glace que forme la sève. La destruction des plantes quand elles gèlent, est attribuée à la désorganisation produite dans les tissus par une cause semblable. Cependant, M. Dunal a vu des plantes aquatiques geler et dégeler plusieurs fois sans périr; et le microscope ne lui a montré aucun indice de désorganisation dans les tissus d'une plante morte par le froid.

On a cherché à expliquer l'expansion, pendant la solidification de certains corps, au moyen du nouvel arrangement que prennent les molécules, en se groupant d'une manière régulière, comme l'indique la cristallisation. Les

substances qui éprouvent la fusion vitrée ne sont pas dans ce cas, et se contractent en se solidifiant. Pour l'eau, l'expansion est annoncée d'avance par la *dilatation* qu'elle éprouve au-dessous de 4° . Il serait important de vérifier si les autres substances qui se solidifient avec expansion, possèdent aussi un maximum de densité. Nous avons déjà vu (1017) que Despretz a constaté l'absence de ce maximum sur diverses matières qui se contractent en se solidifiant.

Il résulte des faits qui précèdent que, si l'on pouvait empêcher, par une pression assez forte, l'expansion de se produire, on empêcherait les molécules de prendre les positions qui correspondent à l'état solide, et la congélation ne pourrait avoir lieu. C'est, en effet, ce qu'a reconnu M. Mousson¹, qui a vu l'eau rester liquide à -5° dans un tube de fer où elle était fortement comprimée par le même moyen que dans l'appareil (fig. 780). Deux fentes opposées garnies de lames de verre épaisses permettaient de reconnaître l'état liquide, par le déplacement de l'index de cuivre. Ce résultat, constaté aussi par M. Boussingault, est en harmonie avec le fait de la liquéfaction de la glace par la compression.

1108. Évaluation de l'expansion de la glace. — Le changement de

volume qu'éprouve la glace en fondant a été appliqué à la mesure des quantités de chaleur.

Suivant M. Bohn, R. Hermann proposait le principe de cette méthode dès 1834 et J. Herschell, d'après M. Andrews,

l'exposait de son côté en 1847².

Nous avons vu (1062) le parti qu'en a tiré M. R. Bunsen dans la construction de son petit calorimètre à glace.

On a fait beaucoup d'expériences pour évaluer la variation de volume de l'eau dans son passage d'un état à l'autre, le plus souvent en prenant la densité de la glace à 0° . M. Brunner fils a trouvé, en cherchant la perte de poids dans l'huile de pétrole (997), le nombre 0,918. — Mais comme il y a des différences notables entre les densités publiées par divers physiciens, M. Dufour a repris la question en cherchant à former un mélange alcoolique dans lequel la glace pût rester en suspension, ce qui évite de la peser³. Il prit ensuite la densité du mélange en cherchant la perte de poids qu'y éprouve une masse de verre. Le mélange était entourée d'une couche liquide plus dense que le mélange. Pour avoir de la glace pure, il faisait bouillir de l'eau dans un creuset de platine, la congelait dans un mélange réfrigérant, et choisissait les parties extérieures, tout-à-fait exemptes de bulles d'air, de la masse de glace. La moyenne de 24 expériences a donné



Fig. 785.

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences, 1858), t. III, p. 296.

² Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. XXVIII, p. 398.

³ Bibliothèque universelle de Genève (Archives des sciences, 1860), t. VIII, p. 320.

à M. Dufour, pour densité de la glace à 0° par rapport à l'eau aussi à 0°, le nombre 0,9178 qui diffère peu de celui qu'a trouvé M. Brunner.

M. R. Bunsen a étudié de nouveau la densité de la glace, à l'occasion de ses expériences du calorimètre à glace (1062). Dans un tube épais replié sur lui-même, *tn'*o (fig. 786), on introduit du mercure bouilli jusqu'en *nn*, on pèse et l'on remplit la partie *no* d'eau que l'on purge avec soin par l'ébullition, le tube de caoutchouc *h* plongeant dans de l'eau bouillante. On laisse refroidir, on bouche le tube *h* et l'on ferme la pointe *o*, en fondant le verre. On pèse de nouveau, et l'on a ainsi le poids *P* de l'eau introduite. On remplit la branche *tn* de mercure bouilli et l'on y ajuste le bouchon *t* en refoulant le mercure dans le tube capillaire *c* et dans l'éprouvette *m*. On enfonce l'appareil dans de la sciure de bois, et on l'expose au froid de l'air au-dessous de zéro, en le retirant peu à peu de la sciure, de manière que la colonne d'eau se congèle graduellement de haut en bas, jusq'en *n*. On porte alors tout l'appareil à 0°, en le plongeant dans la neige fondante, on retire l'éprouvette *m*, on la pèse, et on la remet en place.



Fig. 786.

Après avoir enlevé la neige, on fait fondre toute la colonne de glace *no*, en l'approchant d'une flamme de gaz, puis on reporte l'appareil à 0°, et l'on pèse l'éprouvette *m*. On trouve une diminution de poids provenant de la sortie par le tube *ct* d'un poids *M* de mercure, dont le volume à 0°, $M : D$, représente la contraction produite en *no* pendant la fusion, c'est-à-dire la différence des volumes $P : x$ et $P : d$ du poids *P* de glace et d'eau à 0°, x représentant la densité de la glace, $d = 0,99988$, celle de l'eau à 0°, et $D = 13,596$, celle du mercure. On a donc, pour déterminer x ,

$$\frac{M}{D} = \frac{P}{x} - \frac{P}{d}.$$

M. R. Bunsen a trouvé ainsi, pour moyenne de trois valeurs qui ne diffèrent pas de deux unités de la quatrième décimale, la densité 0,92674. Ce qui donne 0,09087 pour l'expansion au moment de la congélation, ou $\frac{1}{12}$ environ du volume de l'eau à zéro.

1109. Corps divers. — M. H. Kopp a étudié les changements de volume pendant la solidification, par la méthode suivante. La substance solide remplissait un tube de verre *r* (fig. 787), introduit dans un autre plus large *A*, auquel était ajusté un tube gradué *t*, par l'intermédiaire d'un bouchon de liège rendu imperméable par son immersion dans de l'huile à 100°. Un liquide, dont la nature variait suivant la substance placée en *r*, achevait de remplir l'appareil, et s'élevait jusqu'au zéro de la division du tube *t*. Le poids de ce liquide s'obtenait en retranchant de celui de l'appareil plein, le poids de l'appareil vide et celui du solide *r*. Ce liquide était l'huile d'olive dans le cas des sels, l'essence de térébenthine pour la glace, l'eau pour les autres substances sauf le soufre, pour

lequel on a employé l'acide sulfurique. Dans ce cas, il n'y avait plus de bouchon, et le soufre était introduit dans un simple tube de thermomètre. Pour faire l'expérience, on échauffait l'appareil dans un bain d'huile, et l'on observait, pour chaque température, la position du niveau dans le tube *t*. Connaissant les dilata-tions du verre et du liquide, on calculait les volumes de la substance *r*, à l'état solide et à l'état liquide. Voici les principaux résultats obtenus :

Le phosphore se dilate uniformément de 0° à 44°; alors il fond et se dilate brusquement dans le rapport de 1 à 1,0343, puis il se dilate régulièrement. Les coefficients sont 0,000383 à l'état solide, et 0,000506 à l'état liquide.

Le soufre se dilate irrégulièrement à l'état solide. M. H. Kopp a représenté son volume par une formule empirique dont les coefficients sont différents entre 0° et 78° et entre 0° et 115°. En fondant, son volume augmente brusquement dans le rapport de 1 à 1,005. Suivant M. H. Kopp, il se dilaterait ensuite régulièrement; mais M. Berthelot et M. Moitessier ont trouvé, entre 160° et 170°, un minimum de dilatation, que M. Pisati a surtout fait ressortir en considérant les variations du volume spécifique.

La cire blanche n'éprouve en fondant qu'un changement de volume insignifiant. L'acide stéarique fond à 70°, en augmentant de volume dans le rapport de 1 à 1,11. La stéarine se dilate jusqu'à 50°, température à laquelle elle éprouve un changement d'état physique signalé par M. Duffy, et son volume diminue brusquement dans le rapport de 1 à 0,977, puis elle se dilate jusqu'à son point de fusion; à 60°, elle fond en augmentant de volume dans le rapport de 1 à 1,0496. Ces trois derniers corps se dilatent irrégulièrement de 0° au point de fusion, puis régulièrement; il en est de même des trois sels qui suivent.

Le chlorure de calcium hydraté fond à 29° en augmentant dans le rapport de 1 à 1,0965; le phosphate de soude hydraté, à 35°, et l'hypo-sulfate de soude hydraté, à 45°, en augmentant l'un et l'autre de volume dans le rapport de 1 à 1,051. Il est à remarquer que l'eau contenue dans ces sels ne leur donne pas la propriété de se contracter comme la glace, en se liquéfiant.

L'alliage de H. Rose (2 parties de bismuth, 1 de plomb, 1 d'étain) présente une particularité curieuse. Il possède, vers 60°, un maximum de dilatation, puis il se contracte jusqu'à 95°, fond et éprouve une augmentation très-rapide, mais non subite de volume; puis la dilatation est uniforme et à peu près la même qu'à l'état solide avant 60°. En étudiant les chaleurs latentes, nous verrons d'autres propriétés singulières de certains alliages (1129).

Les résultats obtenus par M. H. Kopp sur l'alliage de H. Rose et sur le phosphore avaient été antérieurement observés par M. G. A. Ermann, par un procédé tout différent. Il pesait le phosphore dans l'eau, et l'alliage dans l'huile d'olive, à différentes températures; ces corps étaient placés dans une petite



Fig. 787.

cuvette de verre mince suspendue à la balance. La dilatation du verre et celle du liquide étaient évaluées avec soin dans chaque expérience.

1110. Solidification lente ou brusque. — Quand un liquide se solidifie lentement, ses molécules s'arrangent régulièrement et forment des cristaux qui s'enchevêtrent les uns dans les autres, de manière qu'on ne peut plus les distinguer. Souvent cependant, la cassure montre des facettes brillantes comme dans le bismuth, le zinc; et l'on dit alors que la structure est cristalline. Quand la cassure ne présente aucune trace de cristallisation, il ne faut pas en conclure que la structure est amorphe, car nous avons vu comment on peut faire apparaître des cristaux à la surface de certains corps, en les attaquant par les acides faibles, ou simplement par la chaleur, comme lorsqu'on produit les *fleurs de glace* (I, 493).

Quand la solidification se fait très-rapidement, par un passage brusque du liquide à une température de beaucoup au-dessous du point de solidification, ses molécules prennent un arrangement qui paraît moins régulier, et les propriétés du solide ne sont pas les mêmes que dans la solidification lente, pendant laquelle les molécules ont le temps d'obéir aux forces qui les sollicitent, telles qu'elles sont au point de passage. Comme exemple, nous rappellerons les *larmes bataviques* et leurs singulières propriétés, et les différences de structure des fontes grise et blanche (I. 542,545).

M. R. Pictet a étudié avec soin les circonstances de la formation de la glace ¹. Il a remarqué que lorsqu'elle s'est formée lentement, elle est transparente et composée d'une multitude de petits rhomboédres contigus, visibles à la loupe, et que l'on peut séparer en exposant la glace aux rayons solaires, qui agissent dans toute la masse; une légère pression suffit alors pour écraser la masse et désagréger les petits rhomboédres. Mais, si la glace est formée artificiellement par un froid de plus de -5° , elle est opaque, moins résistante et un peu moins dense. En observant au microscope, par un temps froid, une mince lamelle de cette glace, on y distingue une multitude de petites bulles d'air, qui ont été emprisonnées sur place au moment de la congélation rapide. On peut obtenir de la glace transparente à de basses températures, en agitant vivement l'eau, soit au moyen d'un système de palettes, soit au moyen d'un courant de bulles d'air, comme l'a fait M. Turrettini; l'air dissous se dégage alors, et est expulsé.

M. Pictet ayant opéré sur de l'eau *privée d'air* contenue dans des vases métalliques plongés dans un liquide dont la température passait successivement de 0° à -8° environ, et vice-versà, a obtenu des blocs de glace composés de couches concentriques, alternativement transparentes et un peu opaques, ces dernières se formant au moment de la plus basse température. Au centre de la masse était un noyau blanc très-opaque. M. Pictet a conclu de là que l'opacité de la glace peut être due à une autre cause que la présence des bulles d'air,

¹ Bibliothèque universelle de Genève (archives des sciences), t. LIX (1877), p. 154.

la même eau donnant les deux sortes de glace. Il pense que le trouble apporté dans l'enchevêtrement des cristaux pendant une congélation rapide, doit être pour beaucoup dans l'absence de transparence.

III. Liquéfaction par dissolution.

1111. Le passage à l'état liquide peut s'effectuer sans l'intervention de la chaleur. Quand un corps solide est mis en contact avec un liquide, il arrive souvent qu'il disparaît en prenant lui-même la forme liquide; on dit qu'il s'est dissous. C'est ce qui a lieu pour le sucre, le sel, dans l'eau; l'or, l'argent, dans le mercure.

La dissolution d'un corps se fait d'autant plus facilement que ses propriétés chimiques ressemblent davantage à celles du dissolvant. C'est le contraire pour les combinaisons, ce qui montre que les deux ordres de phénomènes diffèrent essentiellement.

Le phénomène de la dissolution est souvent précédé d'une combinaison, que contracte le corps solide avec le dissolvant; de sorte que ce n'est plus le corps solide employé qui se dissout, mais bien la combinaison qu'il a d'abord formée avec le liquide.

Quand une semblable combinaison se fait, il peut y avoir élévation de température, et le liquide combiné est en proportion définie: comme dans les hydrates d'oxydes, les combinaisons d'eau et de certains sels, etc. Quand, au contraire, il ne se forme pas de combinaison, ou bien quand elle est formée d'avance, la dissolution est accompagnée d'un refroidissement dû à une absorption de chaleur latente. Par exemple, quand on dissout de l'azotate d'ammoniaque dans l'eau à 0°, la température s'abaisse jusqu'à — 16°. Si l'on jette dans du mercure, des fragments de plomb, de bismuth ou d'étain, ils se dissolvent, et la température s'abaisse de 15 ou 20°. Cette absorption de chaleur montre qu'il y a une grande analogie entre la liquéfaction par dissolution et la fusion par la chaleur, analogie confirmée par ce fait que la capacité calorifique des sels dissous est celle qu'ils présentent à l'état liquide (1069).

Étât de saturation. — Une masse déterminée d'un liquide ne dissout pas ordinairement une quantité indéfinie de la substance donnée; il arrive un moment où le liquide refuse d'en prendre davantage; on dit qu'il est *saturé*. La quantité maximum de substance dissoute dépend en général de la température, et augmente le plus souvent avec elle, tantôt proportionnellement, comme pour les sels peu solubles, tantôt beaucoup plus rapidement, comme pour les sels très-solubles dans l'eau. Gay-Lussac a mesuré la solubilité d'un certain nombre de sels à des températures croissant graduellement. Pour connaître la quantité dissoute, il pesait dans un matras une portion de la dissolution, et, faisant évaporer le liquide, il pesait la quantité de sel déposé.

La méthode graphique est commode pour se rendre compte des résultats; on

prend les températures pour abscisses, et les quantités de sel qui saturent l'eau, pour ordonnées. Avec les sels peu solubles, comme les *chlorures de barium* ou de *potassium*, le *sulfate de potasse*, etc., on obtient une ligne droite; et dans le cas des sels très-solubles, comme les *azotates de potasse* ou de *baryle*, le *chlorate de potasse*, une courbe convexe vers l'axe des abscisses.

Il y a des sels dont la solubilité augmente jusqu'à une certaine température, pour diminuer ensuite : tel est le *sulfate de soude*, dont le maximum de solubilité est à 33°, et qui possède le même degré de solubilité à 30° et à 100°. Pour le *sulfate de chaux*, le maximum est à 35°. Cette anomalie apparente provient de ce que la quantité d'eau combinée change avec la température, et est d'autant plus faible, en général, que la température est plus élevée. Ce n'est donc pas, en réalité, le même corps qui se dissout dans l'eau froide et dans l'eau chaude. C'est ainsi que le *sulfate de soude* ne contient pas d'eau combinée quand il cristallise à 33°, tandis qu'il en contient à des températures inférieures. Enfin, il y a des sels, comme le sel marin, dont la solubilité ne change pas sensiblement avec la température.

1112. Retour à l'état solide. — Quand on abandonne à l'évaporation spontanée, ou bien quand on laisse refroidir lentement une dissolution faite à chaud, la dissolution, supposée saturée, laisse déposer la substance dissoute, sous forme de cristaux qui se montrent à la surface et sur les parois du vase, principalement sur les aspérités qu'elles peuvent présenter. Les molécules solides ont une tendance marquée à se déposer sur les cristaux déjà formés, et aussi sur des cristaux isomorphes de substance différente. Si plusieurs sels sont dissous dans le même liquide, on peut les faire déposer séparément sur des cristaux de leur espèce. Par exemple, dans une dissolution de 2 parties de nitre et de 3 de sulfate de soude dans 5 d'eau tiède, un cristal froid de nitre appelle à sa surface le nitre de la dissolution; tandis qu'un cristal de sulfate de soude provoque le dépôt du sulfate de soude seul. Nous avons vu la glace exercer sur l'eau à 0° une action moléculaire analogue (1106). Cette propriété permet d'obtenir de gros cristaux avec de petites quantités de dissolution que l'on renouvelle continuellement; le cristal que l'on veut *nourrir* est retourné de temps à autre, de manière à s'appuyer successivement sur ses différentes faces.

Eau de cristallisation. — Il y a des sels qui, en cristallisant, emportent avec eux de l'eau combinée qu'on nomme *eau de cristallisation*, et qui est nécessaire à la forme et à la transparence des cristaux. Cette eau est en proportion définie. Certains sels peuvent en prendre différentes proportions, comme l'ont constaté M. Haidinger, puis Mitscherlich. En général, cette quantité d'eau est d'autant plus grande que la cristallisation se fait à une température plus basse. Le séléniate de zinc peut prendre ainsi trois proportions différentes d'eau de cristallisation. A chaque proportion correspond une forme cristalline particulière; ce qui se conçoit, puisque ce sont en réalité des substances différentes qui cristallisent. Nous avons vu que cette eau, d'après sa capacité calorifique, semble être à l'état solide (1069).

La chaleur fait disparaître l'eau de cristallisation, qui est quelquefois en assez grande abondance pour que le sel s'y dissolve; on dit alors qu'il éprouve la *fusion aqueuse*. M. Legrand a remarqué que la température à laquelle bout une dissolution saturée d'un sel, suffit pour lui enlever son eau de cristallisation, ce qui peut, du reste, avoir lieu à une température plus basse. Il y a même des sels qui abandonnent l'eau combinée, à la température ordinaire. Ils perdent alors leur transparence, et tombent en poussière; ils sont dits *efflorescents*.

1113. Sursaturation. — Une dissolution peut être *sursaturée*, c'est-à-dire contenir, sans déposer de cristaux, plus de matière dissoute que dans l'état de saturation. Par exemple, une dissolution de sulfate ou de carbonate de soude peut être refroidie, sans cristalliser, beaucoup au-dessous de la température à laquelle elle est saturée; l'immersion d'un cristal de sel détermine aussitôt la cristallisation, et la température remonte subitement au point qui correspond à la saturation. La sursaturation n'est pas en rapport avec l'affinité du sel pour son dissolvant, car des sels ayant peu d'affinité pour l'eau peuvent se sursaturer bien plus facilement que d'autres qui ont pour ce liquide une grande affinité. On était porté à croire que ce phénomène était un effet de l'inertie des molécules, parce que l'on croyait qu'un repos complet était indispensable, et qu'il fallait aussi que la surface du vase fût dépourvue d'aspérités. Mais si ces conditions sont parfois nécessaires, la cristallisation peut ne pas se faire, quoiqu'elles ne soient pas remplies. Ainsi, M. H. Lœwel a vu des dissolutions de sulfate de soude hydraté rester sursaturées dans des tubes scellés, quand il les agitait, l'intérieur contenant même des fragments de verre brisé. Il est bien difficile d'invoquer ici l'inertie des molécules.

On doit à Gay-Lussac les expériences suivantes dont on a longtemps cherché l'explication. Une dissolution sursaturée de *sulfate de soude*, privée du contact de l'air, soit par une couche d'huile, soit en la faisant bouillir dans un ballon à long col que l'on effilé et ferme à la lampe quand tout l'air a été expulsé, ne cristallise pas après le refroidissement. Mais vient-on à introduire de l'air, soit en l'insufflant à travers la couche d'huile, soit en brisant la pointe du ballon, la cristallisation peut se faire subitement, et il y a dégagement de chaleur. Cette expérience a été souvent répétée depuis, et variée de différentes manières.

M. Gernez et M. Ch. Violette, chacun de leur côté¹, ont reconnu que l'air n'agit en cette circonstance qu'en apportant dans la dissolution des parcelles de sulfate de soude répandues dans l'atmosphère. Si l'on a soin de tamiser cet air, en le faisant passer à travers du coton ou de l'amiante, il perd son efficacité. Une baguette de verre introduite dans la dissolution refroidie et sursaturée y fait apparaître les cristaux; mais si cette baguette a été lavée avec soin, ou chauffée dans la flamme d'une lampe à alcool, elle ne produit plus d'effet; M. Gernez a surtout insisté sur les précautions minutieuses qu'il faut prendre pour éviter, dans les expériences, l'introduction de parcelles de sel charriées par l'air ou

¹ Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, t. LX et t. LXI.

déposées par lui sur les corps que l'on met en contact avec la dissolution. C'est faute d'avoir pris assez de précautions à cet égard, que plusieurs observateurs ont attribué la faculté de provoquer la cristallisation à divers solides, gaz ou liquides, entre autres à des gouttes de dissolution saturée.

Pour démontrer la présence du sulfate de soude dans l'air, M. Gernez fait passer à travers de l'eau distillée, dans un alambic en platine, quelques mètres cubes d'air puisés même en pleine campagne. Quelques gouttes de cette eau, évaporées sur une lame de verre, déposent de petits cristaux de sulfate de soude visibles au microscope. La présence de ce sel dans l'atmosphère peut s'expliquer par celle de l'acide sulhydrique et du sel marin, dont elle contient presque toujours des traces.

Le phénomène de la sursaturation a été observé sur des dissolutions de beaucoup d'autres sels, et M. Gernez en a étudié 26, qui toutes cristallisent avec dégagement de chaleur, par le contact d'une parcelle du même sel ou d'un sel isomorphe. La cristallisation d'une solution sursaturée de certains de ces sels ne peut même être provoquée que par ce moyen, et l'air ou les autres corps qui la produisent ne le font qu'en apportant des parcelles de la matière dissoute. D'autres dissolutions sursaturées peuvent cristalliser par l'agitation ou par le frottement de deux corps solides, comme dans la solidification des liquides surfondus.

L'influence des parcelles les plus déliées est telle qu'on en a déduit un moyen d'analyse qualitative d'une sensibilité extrême, pour reconnaître dans un fluide, la présence des plus faibles quantités d'un minéral, en mettant le fluide en présence d'une dissolution sursaturée de la substance dont on soupçonne la présence.

Nous pouvons rapprocher de cette puissance des parcelles cristallines de forme appropriée, les phénomènes suivants observés par M. Gernez sur la cristallisation du soufre. On fait fondre du soufre à 125°, dans un tube en U, en ayant soin de le préserver des poussières extérieures, on plonge le tube dans de l'eau bouillante et le soufre reste en surfusion. On jette alors, dans l'une des branches, une parcelle de soufre *octaédrique*, dont le contact provoque la formation d'un octaèdre, qui grossit de haut en bas et s'étend bientôt jusqu'à la courbure du tube. Si alors on introduit au bout d'un fil de verre une parcelle de soufre *prismatique* dans l'autre branche, elle est bientôt remplie de soufre prismatique, dont on reconnaît la nature en laissant refroidir le tube; le soufre prismatique devenant opaque, tandis que le soufre octaédrique reste transparent dans l'autre branche.

1114. Changement de volume. — Quand un sel cristallise, il y a, le plus souvent, augmentation de volume. Ce fait est bien connu pour le sulfate de soude, et la force expansive de ce sel a été mise à profit par M. Brard, pour reconnaître les pierres gélives; on en trempe un fragment dans une dissolution saturée à chaud de sulfate de soude, et l'on observe si la pierre se fendille pendant la cristallisation. Quelquefois l'expansion d'un sel qui cristallise ne s'aperçoit

pas, le liquide qui se refroidit diminuant en même temps de volume. Si même la contraction du liquide l'emporte sur l'expansion du sel, il y a, en apparence, diminution de volume. M. Longchamp a pu reconnaître une expansion dans la cristallisation du *nitrate de soude*, du *chlorure de potassium*, du *salpêtre*, etc., en comparant l'abaissement de niveau d'une dissolution cristallisant dans un matras à long col gradué, à l'abaissement de niveau produit par le refroidissement dans un autre matras, d'une portion de la dissolution qui a déposé son sel. — Le *sulfate de cuivre*, le *sulfate de soude* manifestent une élévation de niveau; le *nitrate de baryte*, qui est anhydre, se dilate de près de 18 pour cent, ou à peu près deux fois et demi autant que l'eau qui se congèle. Le *sulfate d'ammoniaque*, au contraire, éprouve une contraction réelle de 0,95 pour cent.

1115. Congélation des dissolutions. — Quand l'eau contient des sels dissous, son point de congélation s'abaisse. Ainsi, l'eau de mer se congèle à une température plus basse que l'eau douce, et c'est pour cela qu'on met du sel dans l'eau des réservoirs disposés dans les combles de certains édifices, en cas d'incendie. Blagden, en 1788, avait annoncé que l'abaissement t était proportionnel à la quantité de sel dissous; de manière que si m était la masse de sel dissoute dans 100 parties d'eau, $t : m$ resterait constant. M. Dufour a reconnu que cette loi est vraie approximativement, mais qu'il y a des exceptions. M. Rüdorff trouve aussi le rapport $t : m$ constant pour certains sels, qu'il considère comme dissous à l'état anhydre, c'est-à-dire sans former préalablement un hydrate; mais pour d'autres sels, ce rapport va en augmentant avec m , ce qu'il explique par la formation d'hydrates définis, qui constituent alors le corps dissous.

Pendant la congélation, les sels dissous se séparent, de sorte que la glace n'est formée que d'eau pure. Si l'on colore avec de la teinture de tournesol une dissolution étendue de sel marin, que l'on expose ensuite à l'action du froid, on voit la teinte bleue diminuer à la périphérie, et augmenter au milieu de la masse; et bientôt, on a une enveloppe de glace pure entourant une dissolution saturée. On tire parti de ce résultat, dans les pays du Nord, pour concentrer l'eau de mer dont on veut extraire le sel.

Souvent, l'eau de fusion de la glace ainsi formée contient un peu de sel; mais il n'est jamais en proportion définie, et l'on doit en attribuer la présence à une certaine quantité de dissolution interposée, d'autant plus grande que la congélation s'est faite plus rapidement. Ce liquide interposé peut disparaître peu à peu; c'est ainsi que M. J. Rae a trouvé, dans les régions arctiques, la vieille glace marine toujours pure, l'eau de fusion ayant pendant l'été produit une espèce de lavage en s'infiltrant à travers les blocs. M. Rüdorff montre bien la tendance du sel à se séparer, par l'expérience suivante: dans une dissolution de sulfate de soude sursaturée à -4° ou -5° , on jette une parcelle de glace sur laquelle on voit la glace s'accumuler. Si l'on introduit une parcelle de sulfate, elle se couvre de sel seulement, et l'on peut reproduire ces phénomènes plusieurs fois alternativement. Dans le premier cas, il est évident que, si la

glace contenait des parcelles de sulfate de soude, on obtiendrait en même temps des dépôts de glace et de sulfate.

Pendant la formation de la glace dans une dissolution, le liquide restant est de plus en plus concentré, de sorte que la température de congélation s'abaisse graduellement, et l'on finit par obtenir un hydrate, que M. Guthrie nomme *cryohydrate* pour rappeler son origine; il paraît présenter une composition constante, et se congèle de toute pièce sans se séparer de l'eau, à une température qui est de -8° pour le sulfate de soude, de -22° pour le sel marin, et qui peut être supérieure à 0° pour certains autres sels.

1116. Chaleur latente de dissolution et de dilution. — Nous verrons plus loin comment on mesure la chaleur latente de fusion des corps. Il serait important de la comparer à celle qui est nécessaire pour les dissoudre. Mais ici se présente une difficulté : l'action chimique qui accompagne la dissolution pouvant dégager de la chaleur. Il semble naturel d'admettre qu'il faut autant de chaleur pour faire passer un corps à l'état liquide par fusion ignée que par dissolution; de sorte que l'on devrait trouver des nombres moindres pour la chaleur enlevée par dissolution, à cause de l'action chimique. Person a trouvé tout le contraire : ainsi, 1^{er} d'azotate de potasse exige 49 calories pour se fondre, et 69 pour se dissoudre dans 5 parties d'eau. Si l'on augmente la quantité d'eau, il faut plus de chaleur encore : avec 20 parties d'eau, il faut 80 calories. On doit conclure de là qu'il y a absorption de chaleur latente quand on ajoute de l'eau à une dissolution; il y a donc, comme le dit Person, un *calorique de dilution*, qui s'ajoute à la chaleur latente de fusion, et est absorbé par suite de l'écartement des molécules dissoutes quand on ajoute du dissolvant. Avec le sel marin, il disparaît plus de chaleur quand on étend la dissolution que pendant qu'elle se fait. Il en est de même chez les sels qui ont peu d'affinité pour l'eau, comme l'azotate de potasse. Si l'action chimique est prononcée, la chaleur qu'elle produit peut l'emporter sur celle qui est enlevée par dissolution et par dilution; comme pour le chlorure de calcium, qui exige 41 calories pour fondre, et 20 seulement pour se dissoudre. Entre ces extrêmes, il faut citer le phosphate de soude, qui demande le même nombre de calories pour fondre et se dissoudre, la dilution et l'action chimique se compensant exactement.

1117. MÉLANGES FRIGORIFIQUES. — C'est principalement à l'absorption de la chaleur par dissolution, que l'on a recours pour produire artificiellement du froid. Les *mélanges frigorifiques* ou *réfrigérants* dont on se sert en pareil cas, sont formés de plusieurs substances, dont une au moins est solide, et qui peuvent se combiner spontanément, de manière à donner naissance à un composé liquide. L'action chimique se produisant avec dégagement de chaleur; il faudra, pour qu'il y ait refroidissement, que la quantité de chaleur absorbée par la liquéfaction de la substance solide soit plus grande que celle que dégage l'action chimique. Par exemple, si l'on mêle une partie d'acide sulfurique concentré avec quatre parties de glace, il se forme une combinaison liquide, et la température descend à -20° , la glace absorbant, en passant à l'état liquide, non-seulement

toute la chaleur dégagée par l'action chimique, mais encore une partie de la chaleur sensible du mélange. Si, au contraire, on mêle 4 d'acide avec 1 de glace, on obtient une élévation de température de 50 à 60°, la petite quantité de glace n'absorbant en fondant qu'une partie de la chaleur de combinaison.

Un mélange fréquemment employé est celui de sel marin et de glace, dont les deux ingrédients passent à l'état liquide. Dans certaines villes d'Amérique où le sel est à vil prix, on tire partie de cette propriété pour débarrasser les rues de la neige, en la saupoudrant de sel, mais on produit ainsi un liquide extrêmement froid.

C'est aux académiciens de Florence que sont dûs les premiers essais sur les mélanges réfrigérants. Fahrenheit, de Mairan, et surtout Réaumur, s'en sont occupés ensuite. Ce dernier a fait connaître, dans les Mémoires de l'Académie des sciences de Paris pour 1734, de nombreuses expériences sur le froid produit par les mélanges de divers sels et acides avec la glace.

Voici les principaux mélanges réfrigérants employés :

Parties.	Substances.	Abaissement de température.	Parties.	Substances.	Abaissement de température.
----------	-------------	-----------------------------	----------	-------------	-----------------------------

Eau et sels.

} 4 Eau.....	} 1 Azotate d'ammoniaque.....	} 26°	} 16 Eau.....	} 5 Chlorhydrate d'ammoniaque.....	} 26°
} 1 Azotate de potasse.....	} 29	} 4 Eau.....	} 57 Chlorhydrate de potasse.....	} 32 Chlorhydrate d'ammoniaque.....	} 15
} 5 Chlorhydrate d'ammoniaque.....	} 5 Chlorhydrate d'ammoniaque.....	} 22	} 10 Azotate de potasse.....	} 10 Azotate de potasse.....	} 15

Glace et sels.

} 2 Neige ou glace pilée.....	} 4 Sel marin.....	} 20	} 5 Neige ou glace pilée.....	} 2 Sel marin.....	} 24
} 5 Chlorhydrate d'ammoniaque.....	} 5 Azotate de potasse.....	} 28	} 5 Azotate d'ammoniaque.....	} 3 Neige ou glace pilée.....	} 18
} 5 Chlorure de calcium.....	} 5 Chlorure de calcium.....	} 18	} 4 Potasse.....	} 4 Potasse.....	} 18

Sels et acides étendus d'eau.

} 3 Sulfate de soude.....	} 2 Acide azotique.....	} 29	} 6 Sulfate de soude.....	} 5 Azotate d'ammoniaque.....	} 36
} 4 Chlorhydrate d'ammoniaque.....	} 2 Azotate de potasse.....	} 33	} 16 Acide sulfurique à 36°.....	} 8 Sulfate de soude.....	} 27
} 4 Acide azotique.....	} 9 Phosphate de soude.....	} 39	} 5 Acide chlorhydrique.....	} 5 Acide chlorhydrique.....	} 27

Les mélanges que l'on emploie le plus souvent sont ceux de *glace et de sel marin*, d'*eau et d'azotate d'ammoniaque*, de *sulfate de soude et d'acide chlorhydrique*. Après l'opération, on retrouve le sel des deux premiers par l'évaporation au soleil ou par le feu : et le sel du dernier, en distillant le mélange dans un alambic de verre, ce qui permet de recueillir l'acide.

Le froid produit par les mélanges frigorifiques a nécessairement une limite, car l'action chimique qui détermine la liquéfaction du sel cesse d'avoir lieu quand la température est trop basse. Deluc a reconnu que la température ne peut s'abaisser au-dessous du point de congélation du mélange.

Pour opérer rapidement, il faut employer les sels en poudre fine, bien secs, mais contenant cependant toute leur eau de cristallisation, et faire le mélange peu à peu en agitant continuellement. Il faut aussi que le vase dans lequel on opère, et les substances que l'on mêle, soient d'avance à une basse température. Quelquefois on les refroidit préalablement dans un premier mélange frigorifique. On doit enfin prendre toutes les précautions possibles pour préserver le vase dans lequel on opère, de la chaleur extérieure.

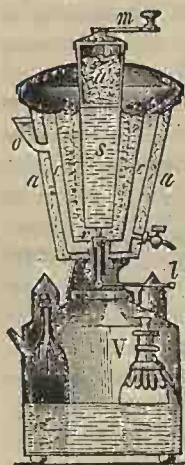


Fig. 788.

On croit généralement que le *maximum de froid* produit dépend essentiellement des proportions relatives des substances mélangées, de leur température initiale, et de leur état préalable d'hydratation. Mais il résulte des expériences de M. Guthrie sur les *cryohydrates* (1115) que ces circonstances n'ont d'influence sensible que sur la durée de l'opération; le cryohydrate qui tend à se former plus ou moins rapidement, ayant toujours la même composition, et son point de congélation indiquant la température la plus basse qu'on puisse obtenir. Des expériences nombreuses faites sur des mélanges de glace et de divers sels, ont donné, sauf quelques exceptions, la même température pour le froid obtenu, et pour le point de congélation du cryohydrate formé¹.

On a imaginé un grand nombre d'appareils destinés à l'application usuelle des mélanges réfrigérants. Comme exemple, nous citerons le *congélateur Villeneuve* (fig. 788). L'espace compris entre l'enveloppe extérieure *aa* et la suivante est remplie de feutre ou de tout autre mauvais conducteur de la chaleur, et l'espace *cc*, d'eau ou de glace. La préparation à congeler est placée dans un vase d'étain nommé *sorbetière* ou *sarbotière*, plongé dans le mélange qui remplit le vase intérieur. Le couvercle de ce vase contient des matières non conductrices *a'*, et est muni d'ailettes obliques qui agitent le mélange quand on fait tourner la manivelle *m*. Quand ce mélange a perdu son efficacité, on ouvre la soupape *lr* et le liquide tombe dans le vase *v*, où il sert à rafraîchir les boissons.

¹ *Philosophical Magazine*, XLIX, et *Journal de physique*, de M. d'Almeida, t. IV, p. 282.

Les mélanges frigorifiques les plus puissants sont formés avec l'acide carbonique solide. La température de ce corps, à l'air libre, descend à près de -80° . En y mêlant de l'éther, qui le rend bon conducteur, on forme une pâte frigorifique qui a été employée à liquéfier et congeler divers gaz. En ajoutant du protoxyde d'azote liquide à cette pâte, on forme le mélange frigorifique le plus énergique que l'on connaisse. C'est au moyen de ce mélange que Despretz est parvenu à amener l'alcool à l'état pâteux (1099).

IV. Mesure de la chaleur de fusion.

1118. Mesure de la chaleur de fusion de la glace. — On nomme *chaleur de fusion* ou de *liquidité* d'une substance, le nombre de calories nécessaires pour faire passer l'unité de poids de cette substance, de l'état solide à l'état liquide, sans changement de température.

Aussitôt que Black eut découvert la chaleur latente de fusion de la glace, il chercha à la mesurer. Pour cela, il suspendit, dans une chambre à 18° , deux ballons égaux de verre mince, l'un rempli d'eau à 0° , l'autre de glace fondante. Au bout d'une demi-heure, le premier atteignit la température de $4^{\circ},44$, tandis que l'eau de fusion de la glace dans l'autre ballon, n'arriva à cette température qu'après dix heures et demie; et comme la chaleur lui était fournie à peu près aussi rapidement, Black en conclut qu'il avait dû en absorber vingt et une fois plus que le premier, c'est-à-dire $21 \times 4 = 84$ calories, dont 80 avaient été employées à la fusion de la masse de glace. Il est remarquable que ce nombre diffère à peine de ceux qu'on a obtenus depuis. Black a encore opéré en portant l'eau au-dessous de 0° , pesant la glace formée par congélation subite et posant une équation semblable à celle du n^o 1102.

Enfin, Black a employé la méthode des mélanges : il plongeait dans un poids connu d'eau chaude, un certain poids de glace à 0° ; cette glace fondait, et il observait la température finale θ du mélange. En appelant t la température initiale de l'eau, P son poids et celui du vase en eau, p le poids de la glace et l sa chaleur de fusion, il posait, pour déterminer l , l'équation $lp + p\theta = P(t - \theta)$, qui exprime que la quantité de chaleur, lp , absorbée par la glace pour fondre, plus celle, $p\theta$, absorbée par l'eau de fusion pour passer de 0° à θ° , forment un total égal à la quantité que perd le poids P d'eau pour s'abaisser de t° à θ° .

Wilcke opérait en plongeant dans l'eau bouillante deux vases de verre, l'un rempli d'eau, l'autre de neige à 0° , et il comparait leurs températures quand celle de l'eau chaude était descendue à 72° . Lavoisier et Laplace introduisaient dans leur calorimètre (1059) un vase plein d'eau chaude, et cherchaient le poids de glace fondue quand cette eau était à 0° .

La moyenne des résultats trouvés par Black, Lavoisier et Laplace, Wilcke et Cavendish, est de 75 calories; d'où il résulterait qu'en mêlant des poids égaux d'eau à 75° et de glace à 0° , toute la glace devrait fondre, et le liquide se trouver à 0° . Mais nous allons voir que le nombre 75 est trop faible.

M. R. Bunsen a appliqué son calorimètre à glace (1062) à la même détermination, après avoir évalué le volume v d'une division du tube gradué n (fig. 765) et le nombre D de divisions parcourues pour une calorie introduite dans l'éprouvette centrale C . Quand celle-ci reçoit l calories, il se fond dans l'appareil 1^{er} de glace, et par conséquent $1 : l$ pour une calorie. En appelant d et e les densités de la glace et de l'eau à 0° , les volumes de ce poids seront $1 : ld$ à l'état de glace, et $1 : le$ à l'état d'eau à 0° ; et la diminution de volume pendant la fusion sera $(1 : ld) - (1 : le)$. Ce volume est aussi égal à Dv . On a donc

$$Dv = \frac{1}{ld} - \frac{1}{le}; \quad \text{d'où} \quad l = \frac{1}{Dv} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{e} \right)$$

M. Bunsen a trouvé ainsi $l = 80,03$ calories¹.

1119. Nouvelles mesures de la chaleur de fusion de la glace. — MM. de la Provostaye et P. Desains² ont déterminé la chaleur latente de fusion de la glace par la méthode des mélanges. Le calorimètre, de laiton mince, était pesé avec l'eau contenue, puis posé sur trois cônes de bois. Pendant qu'un des opérateurs observait le thermomètre, l'autre essayait entre plusieurs doubles de papier Joseph un morceau de glace à 0° , et l'introduisait dans le calorimètre, au moment où le premier notait la température en centièmes de degrés; puis, il suivait la marche descendante du thermomètre, tout en agitant le liquide, et il notait chaque degré dans les premiers moments, chaque fraction de degré quand le refroidissement se ralentissait, pendant que l'autre observateur pointait, sur un chronomètre, les temps correspondants. Après avoir observé la température finale du calorimètre, on le pesait, et l'augmentation de poids représentait le poids de la glace. Au moyen de la série observée des températures décroissantes, on calculait la perte de chaleur due au rayonnement (1058). On tenait compte aussi de la perte de poids due à l'évaporation d'une petite quantité d'eau. MM. de la Provostaye et P. Desains ont trouvé ainsi 79,25 calories.

M. Regnault est arrivé, de son côté, à un résultat presque identique, en introduisant dans le calorimètre de laiton tantôt de la neige bien sèche, tantôt de la glace fondante.

1120. Compensateur de Person. — Une des corrections les plus délicates dans les expériences faites au moyen du calorimètre ordinaire, est celle qui est relative à la chaleur qu'il perd. Person supprime cette perte de chaleur, en maintenant autour du calorimètre une enceinte ayant à chaque instant la même température que lui. Cette enceinte est formée d'un vase de fer-blanc A (fig. 789) à double paroi, séparé du calorimètre par un espace de 2^{cm} rempli d'air.

¹ Lavoisier introduisait dans son calorimètre un poids connu d'eau presque bouillante. M. Jamin, en calculant ce que devient le nombre 75 ainsi obtenu, quand on le corrige de l'influence de l'augmentation de capacité de l'eau avec la température (1068), a trouvé 79,37 nombre très-rapproché des évaluations les plus récentes.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVII, p. 250.

L'intervalle entre les deux parois de l'enceinte est rempli d'eau qu'on porte à la température que l'on veut, au moyen d'un vase extérieur V à moitié plein d'eau chaude, et qui peut monter et descendre, de manière à envelopper de cette eau une portion plus ou moins grande de l'enceinte. Le vase V passe à travers une ouverture pratiquée dans la table qui porte tout l'appareil; on le soulève ou on l'abaisse au moyen d'une crémaillère placée en dessous, et mise en mouvement par un pignon denté, disposé comme celui d'un cric. Dans l'enceinte et dans le calorimètre, sont des agitateurs sur lesquels agit un mouvement d'horlogerie, par les cordons *c*, *c'*. On reconnaît à chaque instant si la température de l'enceinte est égale à celle du calorimètre, au moyen d'un thermomètre différentiel D, dont un des réservoirs, très-allongé, plonge dans le calorimètre, tandis que l'autre s'enfonce dans l'enceinte. En soulevant avec précaution le vase V, on maintient l'index dans une position fixe.

L'index devrait être maintenu au zéro, s'il n'y avait pas de perte par le couvercle du calorimètre. Pour compenser cette perte, on tient la température un peu plus élevée dans l'enceinte, d'une quantité que l'on détermine par des expériences préalables, de la manière suivante. On maintient le calorimètre, rempli d'eau chaude, à une température fixe donnée par le thermomètre *t*, et l'on voit quelle position prend alors l'index. En faisant varier la température fixe, on construit une table donnant les positions de l'index pour chaque excès de température du calorimètre sur celle de l'air. Les excès successifs sont donnés par un second thermomètre différentiel *d*, dont l'un des réservoirs plonge dans le calorimètre, et l'autre, *r*, dans un vase plein d'eau à la température ambiante.

Person a mesuré, par ce moyen, la chaleur de fusion de la glace prise au-dessous de 0°, en tenant compte de la chaleur qu'elle absorbe pour s'échauffer d'abord jusqu'à zéro. Il reconnut ainsi qu'il y a deux calories d'absorbées de — 2° à 0°, ce qui fait une calorie de plus que la quantité de chaleur qui correspond à la capacité, 0,5, de la glace. Cet excès de chaleur absorbée provient d'un ramollissement qui précède le passage à l'état liquide, et qui exige l'absorption d'une certaine quantité de chaleur. Le ramollissement ne commence qu'à — 2°, car, si l'on part d'une température plus basse, on trouve toujours la même valeur pour la chaleur latente. En tenant compte de cette circonstance, la fusion d'un gramme de glace exige 80 calories.

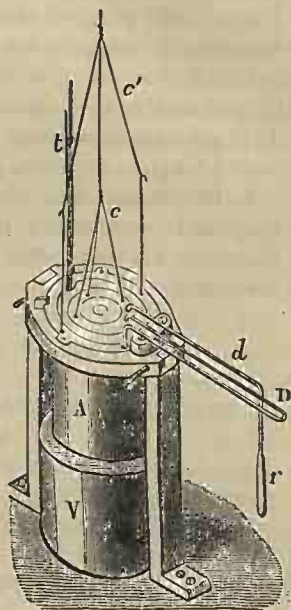


Fig. 789,

En rapprochant ce résultat du nombre 80,03 trouvé depuis par M. Bunsen, on voit qu'on peut adopter définitivement le nombre 80 pour représenter la chaleur de fusion de la glace. C'est la plus grande chaleur de fusion que l'on connaisse.

1121. Chaleur spécifique de la glace. — Les expériences qui précèdent exigent que l'on connaisse la chaleur spécifique de l'eau à l'état solide. On a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer cet élément. Clément et Désormes ont employé deux méthodes qui supposent connue la chaleur de fusion : 1° Ils plongent dans de l'eau à 0° un poids connu de glace à — 1°. Cette glace fait congeler une certaine quantité d'eau, et son poids augmente par le dépôt de la nouvelle glace formée, jusqu'à ce que sa température soit remontée à 0° par l'abandon de la chaleur latente de l'eau congelée. La chaleur spécifique, c , de la glace est alors donnée par l'équation $cP = pl$, dans laquelle P est le poids de la glace employée, p celui de la glace formée, et l sa chaleur latente.

2° Ils plongent dans de l'eau chaude, de la glace à — t° . Si T est la température de cette eau, p son poids, y compris l'équivalent en eau du calorimètre, et θ la température finale quand toute la glace est fondue, on a, pour déterminer c , l'équation

$$p(T - \theta) = P(ct + l + \theta),$$

qui exprime que la quantité de chaleur perdue par le calorimètre est égale à celle que la glace a absorbée pour passer de — t° à 0°, plus celle qu'elle a absorbée pour se fondre, augmentée enfin de celle que l'eau de fusion a dû prendre pour s'échauffer de 0° à θ° .

Person a repris ces expériences par trois méthodes différentes; les deux premières sont celles que nous venons d'indiquer, et il a reconnu que la première conduit à des résultats erronés, parce qu'il se forme indéfiniment de la glace (1106), de sorte que le poids de la masse congelée est d'autant plus grand que l'expérience dure plus longtemps. — La troisième consistait à observer le refroidissement occasionné par de la glace à — t° dans un liquide où elle se réchauffait sans se fondre. La glace était contenue dans une bouteille cylindrique de cuivre très-mince, dans laquelle on avait fait congeler de l'eau. Un thermomètre à long réservoir était pris dans la glace. La bouteille était contenue dans un étui de cuivre mince fermé par un bouchon que traversait la tige du thermomètre; on le refroidissait à — 20° dans un mélange de sel et de glace pilée continuellement agité. La bouteille était ensuite plongée dans le calorimètre, qui contenait, soit de l'eau salée, soit de l'essence de térébenthine, dont on avait déterminé la capacité. Une correction était faite, pour l'échauffement de la bouteille pendant le transport du mélange réfrigérant au calorimètre. Cette correction était de 6 calories environ. Person a trouvé ainsi $c = 0,5$.

Ayant plus tard reconnu l'influence du ramollissement de la glace à partir de — 2°, il reprit ces expériences, au moyen du calorimètre compensateur (fig. 789),

en ayant soin que la température n'atteignit pas -2° , et il trouva, entre -21° et -2° , la capacité 0,48, sensiblement moindre que 0,5, ce dernier nombre étant augmenté de la chaleur latente absorbée par le ramollissement.

A peu près à la même époque, E. Desains faisait des expériences très-soignées sur la capacité de la glace par la méthode des mélanges, soit en la faisant fondre dans un poids connu d'eau, soit en la laissant s'échauffer dans l'essence de térébenthine. Par le premier procédé, il a trouvé pour moyenne 0,513, et par le second, 0,46.

1122. Applications. — La grande quantité de chaleur nécessaire à la glace pour se fondre, joue un grand rôle dans la nature. Quand un froid intense fait geler les lacs et les rivières, la température de leurs eaux ne peut descendre au-dessous de 0° tant que la congélation ne s'étend pas dans toute la profondeur. Il en résulte que le froid est moins vif dans le voisinage des grandes masses d'eau. — Des étoffes mouillées peuvent préserver les corps de la gelée, tant que l'eau qui mouille ces étoffes n'est pas complètement transformée en glace. Pendant un dégel, la température de l'air, à une certaine hauteur, peut être de 10° au-dessus de celle de l'air inférieur, qui, étant en contact avec la glace fondante qui recouvre le sol, reste à zéro jusqu'à ce que tout soit fondu.

Dans l'hiver de 1740, qui fut très-rigoureux, on construisit à Saint-Petersbourg, avec les glaçons de la Newa, un palais d'une architecture élégante, de 56 pieds de long; on y donna des fêtes, sans que la chaleur accumulée au-dedans pût en faire fondre les murs. On fabriqua aussi, avec des blocs de glace, six canons avec leurs affûts, du calibre de 3 livres de poudre, et on lança des boulets de fer sans que le canon éclatât, quoique l'épaisseur des parois ne fût que de 4 pouces.

En Sibérie, on forme des carreaux de fenêtre avec des lames de glace. Le froid extérieur compense la chaleur intérieure, et les empêche de fondre; et même ils se couvrent de givre en dedans.

1123. Chaleur de fusion des corps quelconques. — Pour mesurer la chaleur latente de fusion des corps autres que la glace, on les fait fondre, comme l'a proposé Black, et l'on cherche, par la méthode des mélanges, la quantité de chaleur qu'ils abandonnent en se solidifiant. Soit, par exemple, p le poids d'un métal en fusion, P celui de l'eau et de l'équivalent d'un calorimètre dans lequel on le verse, et dont la température est t , 0 la température finale du mélange, c la chaleur spécifique du métal à l'état solide, et l sa chaleur de fusion; on aura, pour déterminer l , l'équation $lp + pc(T - 0) = P(0 - t)$, T étant la température de fusion du métal, température qu'il possède quand on le verse dans le calorimètre.

Quand la substance est attaquée par l'eau, on la renferme dans un vase métallique dont on tient compte. Cette méthode présente de grandes difficultés dans la pratique, surtout quand T est très-élevé, à cause de l'accroissement notable de température que prend le calorimètre, de la perte de chaleur qu'il éprouve alors par le contact du milieu ambiant, de la chaleur enlevée par la vapeur qui se dégage au moment de l'immersion du corps en fusion, et enfin de la perte de

chaleur qu'éprouve ce corps pendant qu'on le transporte dans le calorimètre. Aussi n'a-t-on possédé pendant longtemps que peu d'expériences sur ce sujet.

Rudberg, par la méthode du refroidissement, a cherché la chaleur latente de plusieurs métaux et alliages; il comparait le temps que mettait la température d'un creuset rempli de métal fondu à s'abaisser de 10° , le point de solidification étant compris entre ces dix degrés, au temps employé par le même creuset rempli de mercure, dans les mêmes conditions, pour se refroidir aussi de 10° . — Despretz a fait connaître, en 1840, les précautions multipliées qu'il faut employer dans la méthode des mélanges, pour arriver à de bons résultats¹; mais il n'a pas publié de nombres. Enfin, on doit à E. Desains des recherches sur la chaleur de fusion du phosphore, et sur sa capacité calorifique à l'état solide et à l'état liquide.



Fig. 790.

1121. Expériences de Person. — On ne possédait qu'un petit nombre de données sur les chaleurs latentes de fusion, lorsque Person publia les résultats d'expériences multipliées, qui le conduisirent à une relation entre la chaleur de fusion des corps et leur capacité à l'état solide et à l'état liquide².

Person a adopté la méthode des mélanges. Dans son calorimètre, de laiton mince, V (fig. 790) était un trépied destiné à soutenir le corps plongé. Un mouvement d'horlogerie faisait mouvoir régulièrement un agitateur annulaire soutenu par trois cordons e, traversant un couvercle qui empêchait l'évaporation. Les degrés du thermomètre, t, à réservoir intermédiaire (831) avaient 15^{mm} de longueur environ. On tenait compte de la partie non plongée (932); la correction était à peu près de $\frac{1}{100}$ de degré.

Pour avoir la température finale du calorimètre, on suivait la marche du thermomètre au moyen d'une lunette, à des instants très-rapprochés. La température du moment de l'immersion, était déduite avec une grande approximation, de la série des températures observées, par interpolation ou construction graphique.

Quand la variation de température était rapide, le thermomètre était toujours un peu en retard sur la température du bain; on mesurait préalablement l'étendue de ce retard, en introduisant un peu d'eau chaude dans le calorimètre, pendant que l'agitateur fonctionnait, et observant le temps que mettait le thermomètre à prendre la température du bain. Ce temps était de 3 ou 4 dixièmes de minute. Person faisait la correction relative à la perte extérieure du calorimètre; plus tard, il a employé son calorimètre compensé (1120).

La substance, solide ou liquide, que l'on voulait étudier était ordinairement renfermée dans une bouteille de cuivre mince, au milieu de laquelle se trouvait le réservoir d'un thermomètre. La température était obtenue dans une étuve ou

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. XI.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXI, XXII, XXVII.

dans diverses dissolutions bouillantes, dans lesquelles on plongeait la bouteille enveloppée d'un étui métallique mince.

1125. Formule de Person. — Par diverses considérations théoriques, Person a été conduit à exprimer la chaleur de fusion, l , par la formule

$$l = (n + t)(C - c), \quad [1]$$

dans laquelle t est la température de fusion, C et c les chaleurs spécifiques à l'état liquide et à l'état solide, et n une constante. Cette formule exprime que la chaleur latente de fusion est égale à la différence entre les chaleurs spécifiques sous les deux états, répétée autant de fois qu'il y a de degrés depuis le point de fusion jusqu'à n degrés au-dessous de zéro. La constante n , déterminée en portant dans la formule les quantités C , c , l , t , données par l'observation, s'est trouvée la même, et égale à 160, pour les corps non métalliques de natures très-diverses. Ce résultat a été vérifié en calculant les valeurs de l au moyen de la formule $l = (160 + t)(C - c)$ et les comparant à celles que donne l'expérience directe. Le tableau qui suit montre que l'accord est aussi satisfaisant qu'on peut le désirer, surtout si l'on se rappelle que les capacités, particulièrement celles des liquides, varient avec la température :

SUBSTANCES	POINT de fusion.	CHALEUR SPÉCIFIQUE		CHALEUR LATENTE	
		à l'état solide.	à l'état liquide.	trouvée.	calculée.
Eau.....	0°	0,504	1,0000	79,25	79,20
Phosphore.....	44,2	0,1788	0,2045	5,034	5,243
Soufre.....	115	0,20259	0,234	9,368	9,350
Nitrate de soude.....	310,5	0,27821	0,413	62,975	63,4
Nitrate de potasse.....	339	0,23875	0,33186	47,371	46,462

Person a encore vérifié sa formule sur le *chlorure de calcium*, le *phosphate de soude* et le *nitrate double de soude et potasse*. — La *cire* et le *spermaceti*, ont pour chaleurs de fusion 42,3 et 47,8, tandis que la formule donne 15,6 et 29,2. Ces deux anomalies peuvent s'expliquer par le ramollissement que ces corps éprouvent avant de fondre, ce qui rend impossible la détermination précise de leur chaleur de fusion, comme cela a lieu à fortiori pour les corps qui éprouvent la fusion vitrée.

Les métaux sont dans des conditions particulières que nous étudierons plus loin.

Variation de la chaleur de fusion avec la température. — La formule de Person indique que la chaleur dégagée dépend de la température à laquelle se fait la solidification. Par exemple, si l'on porte de l'eau à -10° et qu'alors on la fasse congeler, la chaleur dégagée ne sera pas de 80 calories; mais,

d'après la formule, de 75 calories, en y remplaçant C par 1, c par 0,5, capacité de la glace, et t par -10° . Or, c'est ce qui doit être. En effet, pour transformer 1^{re} de glace à -10° , en eau à 0° , il faut lui fournir d'abord ct calories pour l'échauffer jusqu'à 0° ; et pour la fondre, il faut encore 80 calories, ce qui fait en tout $ct + 80$. Maintenant, si nous voulons ramener cette eau à son état primitif de glace à -10° , il faudra évidemment lui enlever ce même nombre de calories $ct + 80$. Si d'abord nous la refroidissons jusqu'à -10° , sans changement d'état, il y aura Ct calories d'enlevées, C étant la capacité à l'état liquide. Si alors l'eau se congèle, elle devra abandonner le reste, c'est-à-dire $(ct + 80) - Ct$. On aura donc, pour la chaleur latente à -10° ,

$$l' = ct + 80 - Ct = 80 - t(C - c) = \left(\frac{80}{C - c} - t \right) (C - c),$$

qui rentre dans la formule générale, en donnant à t le signe qui lui convient.

Ce raisonnement suppose que la capacité à l'état liquide reste la même au-dessous du point de congélation. Person a vérifié ce résultat sur l'eau, comme E. Desains l'a aussi fait depuis (1102), en constatant que le refroidissement de ce liquide conserve sa régularité jusqu'à -7° , en passant par zéro tout en restant liquide.

Sens physique de la formule. — La formule $(160 + t)(C - c) = l$ peut s'écrire sous la forme $(160 + t)c + l = (160 + t)C$, qui exprime que la quantité de chaleur qu'il faudrait enlever à une masse liquide à t° , pour abaisser sa température à 160° au-dessous de zéro, peut se calculer comme si cette masse restait liquide et conservait sa même chaleur spécifique; car le second membre représente la quantité de chaleur ainsi calculée. Par exemple, pour faire passer 1^{re} d'eau, de 0° à -160° , il faudra lui enlever 160 calories, comme si elle restait liquide; en effet, $l + c \times 160$ représente la quantité de chaleur enlevée, calculée à la manière ordinaire: prenant $l = 80$, $c = 0,5$, on trouve 160. De même, pour faire passer 1^{re} de soufre, de -160 à $+140$, ce qui fait un intervalle de 300° , il faut $300 + 0,234 = 70,2$ calories, en calculant comme si le soufre restait toujours liquide avec la capacité $C = 0,234$. Or, si l'on calcule par la méthode ordinaire, en ajoutant à la chaleur absorbée depuis -160° jusqu'au point de fusion, la chaleur latente de fusion et celle qui est absorbée depuis le point de fusion jusqu'à 140° , on trouve 70,7, qui diffère à peine de 70,2.

1126. Du zéro absolu. — Si, au lieu de partir de -160° , on partait de toute autre température, on ne trouverait plus cette égalité dans les résultats. Ce nombre 160° a donc, à ce point de vue, quelque chose de tout spécial. Person le considère comme représentant le *zéro absolu*, ou la température pour laquelle les corps ne possèderaient plus de chaleur.

Pour connaître la quantité totale de chaleur x que contient un corps, il suffit de connaître son rapport r et sa différence d avec la quantité de chaleur inconnue y

que renferme un autre corps; car on a $x : y = r$ et $x + y = d$, d'où l'on tirera la valeur de x , en éliminant y . Or, le rapport des chaleurs spécifiques des deux corps est à peu près constant pour toutes les températures, surtout quand elles ne sont pas trop élevées, et l'on a sensiblement $x : y = c : c'$. Considérons l'eau et la glace; on a évidemment $y - x = l = 80$; la relation $x : y = c : c'$ s'applique à ce cas, l'eau liquide conservant sa même capacité au-dessous de zéro; et en faisant $c = 0,5$, $c' = 1$, et $l = 80$, on tire de ces équations $x = 80$, et $y = 160$; ce qui montre que 1^{re} d'eau à 0° contient 160 calories environ, et 1^{re} de glace, 80 calories.

La relation $x : y = c : c'$ montre que, si x est la quantité totale de chaleur que contient un autre corps à 0°, et c sa capacité à l'état solide, on a $x = \frac{y}{c} c = 160 c$. Si donc on enlève à un corps pris à 0°, 160 fois la chaleur qui fait varier sa température de 1°, il ne contiendra plus de chaleur, c'est-à-dire qu'il sera au *zéro absolu*.

Person a fait un rapprochement remarquable : les espaces célestes doivent posséder une température très-voisine du zéro absolu. Or, Pouillet a trouvé — 160° pour la température de ces espaces, quand on défalque l'effet de la chaleur solaire.

Remarques. — Il y a plus d'un demi-siècle que les physiciens ont tenté de calculer la quantité de chaleur contenue dans les corps, et la position du zéro absolu. Irwine, un des premiers, puis Crawford et Dalton s'occupèrent de cette question. Clément et Désormes fixèrent le zéro absolu à — 267°, parce que les gaz se dilatant de $\frac{1}{267}$, si l'on abaissait leur température à — 267°, la contraction serait égale au volume, c'est-à-dire que ce volume n'existerait plus, en supposant constant le coefficient $\frac{1}{267}$ alors admis. D'un autre côté, si l'on chauffe un gaz à 267°, son volume devient double, et il leur paraissait évident que la chaleur ajoutée était égale à celle que contenait le volume primitif.

Le travail de Person et les nouveaux résultats qu'il a trouvés sur cinq corps très-différents, ont rappelé l'attention sur ces questions importantes. Mais doit-on voir dans sa formule l'expression d'une loi naturelle, ou une simple formule empirique n'ayant pas de sens physique? C'est ce qui ne pourra être décidé qu'après qu'on aura étudié un plus grand nombre de corps. Une circonstance tend à jeter des doutes dans l'esprit; c'est que les capacités sous les deux états augmentent avec la température et varient très-rapidement dans le voisinage du changement d'état, surtout pour les corps qui se ramollissent avant de fondre, ce qui fait que le passage d'une capacité à l'autre a lieu graduellement et non brusquement. Quelles capacités faudra-t-il adopter? Il semblerait rationnel de prendre celles que l'on trouve près du passage d'un état à l'autre, et c'est précisément là qu'il y a le plus d'incertitudes.

Nous allons voir que la formule ne s'applique pas aux métaux; ce que Person attribue à leur ténacité. Elle ne s'applique pas non plus au *brome* et à la *naphthaline*; mais nous allons voir qu'il suffit de leur reconnaître une certaine ténacité, pour expliquer cette anomalie.

1127. Chaleur de fusion des métaux et des alliages. — Person ayant mesuré les capacités à l'état liquide, de plusieurs métaux et de divers alliages, dont les points de fusion sont bien déterminés, a obtenu les résultats suivants; les signes *Bi*, *Pb*, *Sn* représentant un atome de *bismuth*, de *plomb* et de *étain*.

SUBSTANCES	POINT de fusion.	CHALEUR SPÉCIFIQUE		CHALEUR latente.
		à l'état solide.	à l'état liquide.	
Étain.....	237°,7	0,05623	0,0637	44,252
Bismuth.....	266,8	0,0308	0,0363	12,640
Plomb.....	326,2	0,0314	0,0402	5,369
Zinc.....	415,3	0,09555	»	28,13
Cadmium.....	320,7	0,0642	0,0567	13,66
Argent.....	»	»	0,0570	21,07
Mercure.....	»	»	»	2,83
Alliage de Darcet (<i>Bi</i> ³ , <i>Pb</i> ² , <i>Sn</i> ²)....	96	0,0356	0,03895	4,496
Alliage de Rose (<i>Bi</i> ³ , <i>Pb</i> , <i>Sn</i> ²).....	94	0,049	0,04219	4,687
Alliage (<i>Bi</i> ³ , <i>Pb</i> ²).....	122,4	0,0317	0,03503	»
Alliage (<i>Bi</i> ³ , <i>Sn</i> ¹).....	135,3	0,0450	0,04540	»

Ce tableau montre que la capacité des métaux simples est à peu près la même à l'état liquide et à l'état solide, comme on l'avait déjà constaté pour le mercure. Le petit excès que présente l'état liquide n'est pas plus prononcé que l'augmentation de capacité des métaux solides dans les hautes températures. Il résulte de là que la formule $(160 + t)(C - c) = l$ ne se vérifie plus puisqu'on a sensiblement $C = c$; ce que Person attribue à l'état imparfait de liquidité des métaux fondus.

La chaleur de fusion des métaux varie cependant avec le point de fusion, car dans les alliages, plus fusibles que les métaux qui les composent, la chaleur de fusion de ces métaux est celle qui convient à la température à laquelle l'alliage fond, et elle peut se calculer au moyen de la formule, en admettant que cette formule serait vraie, si la liquidité était parfaite, c'est-à-dire qu'on aurait $\delta = C - c = \frac{l}{160 + t}$. Considérons, par exemple, l'alliage de Darcet, (*Bi*³, *Pb*², *Sn*²), qui fond à 96°, et désignons par δ' , δ'' , δ''' les valeurs de $C - c$ qui correspondent à un atome de bismuth, de plomb et de *étain*. La chaleur de fusion de l'alliage sera $(160 + 96) \left(\frac{3\delta' + 2\delta'' + 2\delta'''}{3 + 2 + 2} \right) = 6,369$. L'expérience donne 4,496; mais Person a reconnu que, pendant la formation de l'alliage, il se dégage à peu près 2 calories. En ajoutant cette chaleur perdue à 4,496, on retrouve à peu près 6,369.

Relation entre la chaleur de fusion des métaux et leur élasticité. —

Nous avons montré (988) que l'effort nécessaire pour écarter les molécules par traction, c'est-à-dire le coefficient d'élasticité, est d'autant plus petit que la dilatation est plus grande, c'est-à-dire que les molécules sont plus facilement écartées par la chaleur. Guidé par des considérations du même ordre, Person remarque que le travail accompli par la chaleur pour fondre un métal, c'est-à-dire pour désagréger ses molécules est d'autant plus grand, et par conséquent exige d'autant plus de chaleur, que la ténacité est elle-même plus grande, et il énonce la loi suivante : *les chaleurs de fusion des métaux sont sensiblement proportionnelles aux coefficients d'élasticité*. La proportionnalité n'est qu'approchée, ce qui tient en partie à ce que, dans la mesure du coefficient d'élasticité, on ne compare pas des poids égaux, comme pour les chaleurs de fusion. D'ailleurs, la chaleur de fusion doit être proportionnelle, non au coefficient d'élasticité, mais à une fonction de ce coefficient représentant le travail nécessaire pour vaincre la cohésion des molécules comprises dans l'unité de poids. En partant de là, Person représente le rapport entre les chaleurs de fusion, par la formule

$$l : l' = K \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}} \right) : K' \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d'}} \right),$$

qui exprime que ces chaleurs de fusion sont entre elles comme les coefficients d'élasticité augmentés d'une quantité qui dépend des poids spécifiques d et d' . Les résultats obtenus sont réunis dans le tableau suivant, dans lequel $K : K'$ représente la moyenne des rapports des coefficients d'élasticité obtenus par les vibrations longitudinales et transversales, et en employant successivement des métaux étirés, recuits ou coulés, afin de faire disparaître l'influence de l'état physique :

MÉTAUX	RAPPORT $l : l'$	RAPPORT $K : K'$	RAPPORT $K : K'$ corrigé.
{ Zinc }	4,97	2,17	2,17
{ Étain }			
{ Zinc }	5,23	4,80	5,28
{ Plomb }			
{ Étain }	2,65	2,20	2,42
{ Plomb }			
{ Zinc cristallisé..... }	2,22	2,28	»
{ Bismuth }			
{ Zinc }	3,68	3,67	3,92
{ Alliage de Darcet..... }			

La formule se vérifie bien. Pour le *zinc* et l'*étain*, dont les densités sont égales, le rapport $K : K'$ est sensiblement le même que ce rapport corrigé. Pour le *zinc* et le *bismuth*, la correction tendrait à altérer l'égalité des rapports,

ce qu'on peut attribuer à l'état de cristallisation de ces métaux. On voit que la formule s'applique aussi à l'*alliage de Darcey*. Comme vérification, Person s'est servi de cette formule pour calculer la chaleur latente du *cadmium* et de l'*argent*, en prenant le zinc pour terme de comparaison. En remplaçant l , k et d , par les valeurs qui correspondent à ce métal, la formule donne

$$l = 0,001669 K \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}} \right).$$

Il a trouvé ainsi les nombres 13,52 et 20,38, et l'expérience directe donne 13,66 et 21,07; l'accord est donc satisfaisant.

Il résulte de là qu'on peut, au moyen de la chaleur de fusion d'un métal, calculer celle d'un autre. C'est ainsi que Person a trouvé, pour les chaleurs de fusion du *platine* et du *fer*, 38 et 60 calories, en prenant le zinc pour terme de comparaison. Le fer est le plus résistant des métaux; il doit donc avoir la plus grande chaleur de fusion. Le mercure solide, dont la chaleur de fusion est 2,83, doit avoir une résistance encore plus faible que celle du plomb, dont la chaleur de fusion est 5,37. Nous voyons ici un nouvel exemple de quantités qui semblent, au premier abord, n'avoir aucune relation, et qui se déterminent les unes par les autres. Ainsi, au moyen du son produit par une verge, on peut calculer la quantité de chaleur qu'elle exige pour se fondre. De même que, de cette dernière quantité, on pourrait déduire le son que rendrait une verge faite de la même matière.

1128. Formule générale de la chaleur de fusion. — Nous voyons qu'il y a entre les métaux et les corps non métalliques une différence essentielle : la chaleur de fusion des premiers est liée à l'élasticité, et celle des autres à la différence des capacités à l'état liquide et à l'état solide. Pour faire disparaître ce qu'il y a d'étrange dans cette ligne de démarcation, Person observe que la chaleur de fusion doit se composer, pour tous les corps, de deux termes, l'un relatif à la différence des capacités sous les deux états, l'autre à la ténacité. Pour les métaux, la différence des capacités est presque nulle; et comme elle entre en facteur dans le terme qui lui correspond, ce terme est négligeable, et la chaleur de fusion des métaux est donnée par la relation

$$l : l' :: K \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}} \right) : K' \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d'}} \right); \text{ d'où } l = 0,001669 K \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}} \right)$$

quand on remplace K , l et d par les valeurs qui correspondent au zinc pris pour terme de comparaison. Dans le cas, au contraire, des corps non métalliques, la différence $C - c$ est très-marquée, mais la ténacité est très-faible comparativement à celle des métaux; de sorte qu'en négligeant le terme qui lui correspond on a, à très-peu près :

$$l : l' = (a + l) (C - c) : (a + l') (C' - c'); \text{ d'où } l = (160 + l) (C - c),$$

en prenant pour l , l' , $C' - c'$ les valeurs qui correspondent à l'eau.

Une substance pour laquelle la différence $C - c$ serait prononcée, et dont le coefficient d'élasticité serait assez fort, aurait pour chaleur de fusion

$$[2] \quad l = (160 + t) (C - c) + 0,001669 K \left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}}\right).$$

On ne connaît pas de substance dans ce cas pour laquelle on ait mesuré les valeurs de l , C , c et K . Le brome solide ayant une grande densité, $d = 3,4$ d'après M. I. Pierre, pourrait servir à vérifier la formule [2], si son coefficient d'élasticité était connu. En adoptant pour ce coefficient celui du cristal, $K = 4000$, on trouve $l = 16,5$, en prenant, d'après M. Regnault, $t = -7^{\circ},3$ et $C - c = 0,106 - 0,084$. Or, l'expérience directe a conduit M. Regnault à la valeur $l = 16,2$. L'accord est donc remarquable; mais malheureusement on n'est pas sûr de la valeur de K .

Des expériences précises de M. Alluard¹ ont donné pour la *naphtaline*, dont le point de fusion est $79^{\circ},91$, $C = 0,4176$ entre 80° et 130° , $c = 0,3207$ entre 0° et 20° , et $l = 35,6792$. La première formule de Person donne $l = 23,247$. La différence, moins prononcée que dans le cas du brome, pourrait s'expliquer en admettant dans la *naphtaline* une certaine ténacité.

Pour expliquer la relation générale [2], Person fait remarquer que le second terme représente le travail nécessaire pour séparer les molécules. Le premier s'applique aux corps à faible cohésion; ces corps peuvent conserver l'état liquide bien au-dessous du point de congélation. Or, si le corps restait liquide, la quantité de chaleur qu'il contiendrait à la température de congélation serait, en appelant x la distance du zéro absolu, $(x + t) C$. A la même température et à l'état solide, cette quantité de chaleur serait $(x + t) c$; et la chaleur de fusion sera la différence entre ces deux quantités, c'est-à-dire $l = (x + t) (C - c)$, ou $l = (160 + t) (C - c)$. On peut donc admettre que la chaleur de fusion se compose de deux parties, l'une destinée à fournir le travail nécessaire à la séparation des molécules pour produire l'espèce de liquidité que nous présentent les métaux, et qui est sensiblement proportionnelle au coefficient d'élasticité; l'autre employée à donner aux molécules la nouvelle capacité qui correspond à l'état liquide, et cette quantité, $l = (160 + t) (C - c)$ est proportionnelle au changement $C - c$, et varie avec la température t à laquelle se fait le passage d'un état à l'autre.

La nouvelle théorie de Person séduit par la nouveauté et l'imprévu des conséquences auxquelles elle conduit; elle montre la liaison qui existe entre les phénomènes de la chaleur dans les corps, et leurs propriétés physiques; mais elle aurait besoin d'être confirmée par un plus grand nombre d'expériences. Du reste, elle est bien en harmonie avec la théorie mécanique de la chaleur.

L'influence de la cohésion ressort aussi des nombres calculés par Cantoni en rapportant les chaleurs de fusion aux volumes et non aux poids, comme il l'avait

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LVII, p. 438.

fait pour les capacités calorifiques (1078). Ces nombres montrent que les chaleurs de fusion rapportées à l'unité de volume, sont d'autant plus fortes que la ténacité est plus grande.

1129. Remarques sur les alliages. — En poursuivant les recherches que nous venons de faire connaître, Person a remarqué, sur les alliages, différentes particularités curieuses. D'abord, il a constaté que *la chaleur spécifique d'un alliage à l'état liquide, est la moyenne entre les capacités des métaux liquides qui le composent*; la loi est donc la même qu'à l'état solide (1075). De plus, ayant mesuré, entre 0° et 50°, les capacités de divers alliages solides qui fondent vers 100°, il a trouvé qu'elles satisfont à la loi.

Mais il n'en est pas ainsi pour les capacités prises dans le voisinage du point de fusion. Celles-ci sont trop grandes, par suite d'une décomposition qui se fait dans l'alliage quand il approche du point de fusion, et qui est accompagnée d'un dégagement de chaleur. Ce phénomène singulier est surtout prononcé pour l'alliage de Darcey : la marche de son refroidissement est uniforme jusqu'au moment où il se solidifie. Après le dégagement de sa chaleur de solidification, la température de l'alliage solide baisse régulièrement jusqu'à 57°, puis tout à coup le thermomètre remonte de 1° ou 2°, il y a une expansion qui persiste après le refroidissement et qui brise l'ampoule qui contient l'alliage, et le dégagement de chaleur continue encore pendant longtemps. — Quand l'alliage est solidifié brusquement dans l'eau, il descend au-dessous de 57° sans que la décomposition se fasse, jusqu'à 36° par exemple; alors la décomposition commence, et la température remonte jusqu'à 70°, si bien que l'alliage devient brûlant. En même temps, comme l'a remarqué M. Warrington, la cassure qui était brillante, est devenue terne.

§ 2. — PASSAGE A L'ÉTAT GAZEUX, ET LIQUÉFACTION DES GAZ

I. Phénomènes généraux.

1130. Modes de formation des vapeurs. — Le passage d'un liquide à l'état de *vapeur* ou de *gaz* peut se faire de deux manières : 1° par *évaporation*, c'est-à-dire spontanément, par la surface seulement et à des températures très-diverses; 2° par *vaporisation*, sous forme de bulles qui partent de l'intérieur de la masse liquide, et à une température déterminée qui dépend de la pression à laquelle le liquide est soumis; on dit qu'il est en *ébullition*.

1131. Vaporisation. — Quand on élève la température d'un liquide, sa viscosité diminue généralement, il devient plus fluide, et, arrivé à une certaine température, il entre en *ébullition*, et l'on voit des bulles de vapeur partir des parois échauffées du vase, monter à travers le liquide et venir crever à sa surface. Le phénomène de la *vaporisation* est soumis aux lois suivantes :

1° La température d'un même liquide en ébullition est toujours la même sous la même pression, et dans un vase de même matière;

2° La température du liquide reste constante pendant tout le temps de l'ébullition; si l'on fournit une plus grande quantité de chaleur au vase, on ne fait qu'activer la production de la vapeur, mais la température du liquide ne s'élève pas davantage;

3° Le passage d'un état à l'autre se fait toujours brusquement et avec une grande expansion, et le volume de la vapeur est beaucoup plus grand que celui de la masse de liquide qui l'a fournie; par exemple, l'eau donne un volume de vapeur 1700 fois environ plus grand que le sien.

Voici les points d'ébullition de quelques liquides, sous la pression moyenne, 760^{mm}, de l'atmosphère :

Acide sulfureux.....	— 10°	Eau	100°
Éther sulfurique.....	37	Essence de térébenthine..	157
Carbure de soufre.....	47	Phosphore.....	290
Brome.....	63	Huile de lin.....	316
Chloroforme.....	63	Acide sulfurique concentré.....	325
Alcool.....	79	Mercure.....	360
Huile des Hollandais.....	85	Soufre	440
Acide nitrique concentré.....	86		

On voit que ces points d'ébullition sont très-différents. Les corps très-réfractaires peuvent être réduits en vapeur au moyen de températures très-élevées. En se servant de verres ardents ou du chalumeau à hydrogène et oxygène, on fait bouillir l'argent, l'or, le platine. M. H. Sainte-Claire Deville a trouvé des globules de platine déposés sous le couvercle d'un creuset de chaux plein de ce métal en fusion (1096), et qui y étaient parvenus à l'état de vapeur.

1132. Évaporation. — L'évaporation, qui n'a lieu que par la surface, est d'autant plus rapide que la température est plus rapprochée du point d'ébullition. C'est par évaporation, que l'eau finit par disparaître d'un vase ouvert; que la mince couche liquide qui mouille les corps disparaît quand ils séchent.

Hooke, Halley, Leroy, Monge..... pensaient que l'évaporation n'était autre chose que la dissolution du liquide dans l'air. Mais Dalton a prouvé que la vapeur existe par elle-même; car elle se produit *dans le vide*; et l'air, loin d'être le véhicule de la vapeur, est au contraire un obstacle qui ralentit l'évaporation. Cela se voit dans l'expérience suivante due à Fontana, qui du reste n'en connaissait

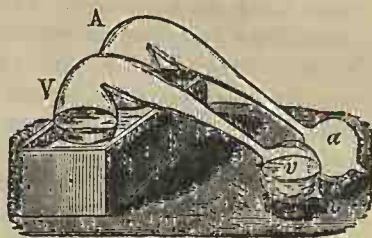


Fig. 790.

pas l'explication. On met une même quantité d'alcool dans deux cornues égales A, V (fig. 790) terminées par deux boules égales *a*, *v*; l'une des cornues Aa est remplie d'air, tandis que ce gaz a été chassé de l'autre par l'ébullition, après quoi on a fermé la pointe *n*. Les deux cornues étant chauffées dans le même bain, la vapeur se forme abondamment en V, et vient se condenser en grande quantité, en *v*, tandis qu'il n'y a, au bout du même temps, que très-peu de liquide dans la boule *a* de l'appareil qui contient de l'air.

Le mercure s'évapore à la température ordinaire, comme l'a prouvé Faraday : ayant suspendu horizontalement une lame d'or au bouchon d'un flacon contenant du mercure, il trouva, au bout de six semaines de séjour dans un lieu froid et obscur, la feuille d'or blanchie par le mercure, qui n'avait pu l'atteindre qu'à l'état de vapeur. — M. Karsten a fait apparaître, au bout de 24 heures, des images daguerriennes sur une plaque iodée ayant reçu l'action de la lumière, au moyen de vapeurs de mercure dégagées spontanément à une température inférieure à zéro. M. Regnault a fait une expérience semblable à -14° . M. A. Merget a constaté la présence de vapeurs de mercure dans tous les points de locaux très-vastes et très-élevés, cette vapeur provenant d'une surface de mercure de peu d'étendue. Quelques expériences faites à -30° et même à -44° , ont montré que le mercure congelé émet encore des vapeurs. La présence de cette vapeur était décelée au moyen de papier enduit de sels de métaux précieux, particulièrement d'azotate d'argent ammoniacal, qui noircit plus ou moins au contact des vapeurs mercurielles. Comme ce sel noircit un peu par la lumière, quand celle-ci était trop vive, on employait les chlorures de palladium ou de platine. — On conclut de là que, dans le vide le plus parfait que nous puissions faire, dans le vide du baromètre, il existe encore des traces de matière pondérable, puisqu'il y a de la vapeur de mercure; et quelquefois quand la chambre barométrique a été frappée par le soleil, on y voit tout en haut une multitude de fines gouttelettes de mercure qui s'y sont condensées après l'évaporation.

Il y a des corps qui ne paraissent pas s'évaporer à la température ordinaire, par exemple l'acide sulfurique concentré. Si l'on met de cet acide sous le récipient de la machine pneumatique, à côté d'une dissolution de baryte, et que l'on fasse le vide, ce qui favorise l'évaporation, comme nous venons de le voir, l'eau de baryte reste limpide, et cependant il suffit de la moindre trace d'acide sulfurique pour la troubler. Remarquons que l'acide sulfurique est très-visqueux, ce qui montre que la figure de ses molécules exerce une influence marquée sur leur position d'équilibre; il ne constitue donc pas un liquide parfait. Cependant, les huiles fixes, qui sont tout aussi visqueuses, donnent des vapeurs sensibles, comme l'atteste l'odeur qu'elles exhalent.

Sublimation. — Il y a des corps qui se subliment, c'est-à-dire qui passent à l'état gazeux sans passer par l'état liquide; par exemple, le camphre, l'arsenic, l'iode; ces corps peuvent cependant se liquéfier sous une pression convenable. La neige peut aussi s'évaporer sans passer par l'état liquide, ce qui explique sa disparition de la surface de la terre, par un froid sec et sans qu'elle ait fondu,

surtout quand il fait du vent, ce qui fait dire vulgairement que la bise mange la neige. De Mairan a vu, par un temps sec et très-froid, un bloc de glace perdre $\frac{1}{6}$ de son poids en 24 heures; ce qui dépend du volume, de la forme et de la surface du bloc.

1133. Chaleur d'élasticité. — La constance de la température de l'eau pendant l'ébullition a été remarquée, à peu près à la même époque, par Amontons, Rinaldini et Hooke. Pour expliquer ce phénomène, Black a admis que la chaleur fournie au liquide devient *latente*, en le transformant en fluide élastique. La *chaleur latente d'élasticité* reparaît à l'état de chaleur sensible, quand on fait passer la vapeur à l'état liquide; ce que l'on obtient en la refroidissant ou en la comprimant suffisamment. — Dans la théorie mécanique de la chaleur, on explique la disparition de la chaleur pendant la vaporisation, par sa transformation en travail nécessaire pour séparer les molécules; et sa réapparition lors du retour à l'état liquide, par la transformation en mouvement calorifique, du travail de rapprochement des molécules.

Quand le liquide s'évapore spontanément sans qu'on lui fournisse de chaleur, il se refroidit, ce qui montre qu'il faut une certaine dépense de chaleur pour le faire passer à l'état gazeux, par *évaporation* comme par *vaporisation*. Vient-on, par exemple, à plonger la main dans de l'eau tiède, dès qu'on la retire on éprouve une impression de froid produite par l'évaporation. L'*alcool*, et surtout l'*éther*, liquides beaucoup plus volatils que l'eau, produisent, comme on sait, une forte impression de froid. En agitant l'air, on favorise l'évaporation comme nous le verrons, et la sensation devient encore plus vive. On peut faire geler de l'eau dans un petit matras, en l'enveloppant de coton continuellement mouillé avec de l'éther, dont on favorise l'évaporation par un courant d'air. On obtient le même résultat en plongeant le matras dans de l'éther que l'on fait rapidement évaporer sous le récipient de la machine pneumatique, ou simplement en soufflant de l'air qui passe par bulles à travers le liquide.

Si l'on projette de l'acide sulfureux liquide sur de l'eau, il se forme immédiatement de la glace. On peut même solidifier le mercure au moyen du même acide liquéfié, en mettant les deux liquides dans le même vase, autour duquel on fait le vide, et auprès duquel on place de l'oxyde de plomb pour absorber les vapeurs d'acide sulfureux. Par ce procédé, M. Bussy a pu obtenir un froid de -68° , et a pu faire descendre la température jusqu'à -57° à l'air libre.

1134. Congélation de l'eau par son évaporation. — Leslie a fait, en 1810, une expérience remarquable, au moyen de laquelle on congèle l'eau par le froid que produit sa propre évaporation. On met sous le récipient de la machine pneumatique (*fig.* 791) une petite capsule peu profonde, contenant un peu d'eau. Au-dessous de cette capsule est un vase rempli d'acide sulfurique concentré. On fait le vide, l'eau s'évapore et tend à saturer l'espace; mais comme l'acide sulfurique absorbe la vapeur, l'évaporation continue et l'eau perd assez de chaleur pour se congeler. Comme il faut enlever 80 calories à 1^{er} d'eau pour le faire passer à l'état de glace; et que 1^{er} d'eau, en s'évaporant à 0° , en

absorbe 606, comme nous le verrons plus tard, l'évaporation d'une certaine masse de ce liquide suffirait à en congeler un poids 7 fois plus grand.

M. A. Deleuil a eu l'idée de faire la capsule en liège. Alors la réussite est bien plus facile; le liège ne laissant pas passer la chaleur rayonnée par la surface de l'acide sulfurique, qui devient très-chaude en absorbant la vapeur d'eau.

Au lieu d'acide sulfurique pour absorber la vapeur, Leslie s'est aussi servi de trapp porphyrique en décomposition, pulvérisé et bien desséché, qui peut absorber plus de $\frac{4}{10}$ de son poids d'eau; ou bien encore de farine d'avoine légèrement torrifiée, avec laquelle on peut faire congeler en quelques minutes le tiers de son poids d'eau.

Cryophore. — Wollaston a imaginé de se débarrasser de la vapeur, en la condensant par le froid. L'eau à congeler est alors placée dans un gros tube de verre, auquel on donne diverses formes, *ac* (fig. 792), dont on a chassé l'air par l'ébullition avant de fermer l'extrémité *c* à la lampe. On entoure une des extrémités de ce tube, d'un vase *n*, contenant un mélange réfrigérant, qui fait condenser la vapeur dans le haut du tube, sous forme de glace.

Il se fait alors une évaporation continuelle en *a*, où l'eau ne tarde pas à se congeler. Sous cette forme, l'expérience est moins frappante que celle de Leslie, parce qu'on se sert d'un mélange réfrigérant.



Fig. 791.

1135. Applications. — C'est au froid produit par l'évaporation qu'est due la fraîcheur des chambres dont on mouille le plancher. Au Bengale, on garnit les fenêtres, de rameaux mouillés munis de leurs feuilles; l'air qui entre se refroidit



Fig. 792.

en traversant le feuillage, sur lequel il active l'évaporation. On peut ainsi abaisser la température de 10° à 15° ; car l'évaporation est très-active, l'air étant très-sec.

La fraîcheur des bois touffus, pendant l'été, est due à l'évaporation qui se fait à la surface des feuilles et sur le sol ordinairement humide.

Si la température du corps de l'homme s'élève à peine quand il fait très-chaud, c'est que, comme l'a remarqué Franklin, la surface de la peau est refroidie par la transpiration insensible, qui est activée par la chaleur, dont elle neutralise ainsi les effets. — Divers observateurs ont pu même séjourner pendant 10 à 15 minutes dans des étuves à 100° , 110° , 128° , remplies d'air très-sec dans lequel l'évaporation cutanée, rendue très-active par la sécheresse de l'air et par la chaleur, enlevait rapidement la chaleur du corps.

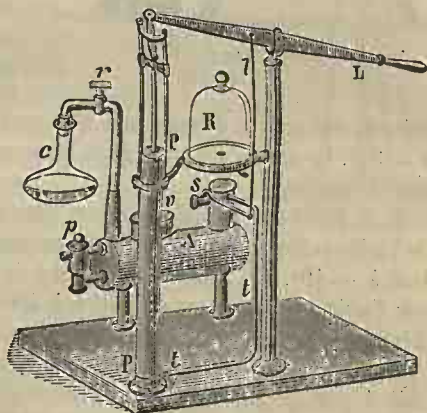
Alcarazas. — Le froid produit par l'évaporation est utilisé pour rafraîchir l'eau. On emploie pour cela des vases nommés *alcarazas*, en terre demi-cuite laissant suinter l'eau (fig. 793). On les expose à un faible courant d'air, et l'évaporation continue qui a lieu à leur surface extérieure toujours mouillée,

peut les refroidir de 15° à 20°. Des sceaux en toile serrée capable de retenir l'eau tout en s'en imbibant, produisent un effet semblable. Les alcarazas, connus de temps immémorial en Égypte, Perse, Inde, Chine, ont été importés en Espagne par les Arabes. Les meilleurs viennent d'Andujar, dans l'Andalousie. Les fabricants mêlent à l'argile un peu de sel en grains, qui, en se dissolvant, laisse une multitude de pores. M. Fourmy a, le premier, fabriqué de ces vases en France, sous le nom d'*hydrocérames*. — On refroidit les liquides autres que l'eau dans des vases de métal revêtus d'un linge qu'on maintient mouillé.



Fig. 793.

Appareils à fabriquer de la glace. — La méthode de congélation de l'eau par sa propre évaporation a été appliquée dans l'industrie à la fabrication de la glace. MM. Taylor et Martineau, en Angleterre, font le vide au moyen de vapeur d'eau bouillante qu'ils lancent à travers un vaste récipient, de manière à entraîner tout l'air, et qu'ils condensent ensuite en refroidissant les parois par un courant d'eau. Ils font ensuite communiquer ce récipient avec le vase contenant l'eau à faire congeler, vase qui communique en outre avec un réservoir d'acide sulfurique concentré. L'acide qui a servi est de nouveau concentré au moyen de la chaleur perdue du foyer qui produit la vapeur. Le trapp porphyrique, qui peut se dessécher au soleil, formerait le corps absorbant le plus économique, dans les pays chauds.

Fig. 794. $\frac{1}{20}$.

Appareil de M. Ed. Carré. — M. E. Carré a rendu pratique le procédé de Leslie au moyen de l'appareil (fig. 794). *c* est le vase dans lequel on veut congeler l'eau; il est ajusté, au moyen d'un bouchon de caoutchouc, à un tube à robinet, *r*, communiquant avec un réservoir *A* en plomb antimonié contenant de l'acide sulfurique concentré, que l'on y introduit par une tubulure *p* fermée par un bouchon de plomb garni de cire. Le vase *c* et le réservoir *A* communiquent, au moyen du tube *tt*, avec la pompe pneumatique à double épuisement *P* (I, 401). Le levier

L, au moyen duquel on fait mouvoir le piston, fait osciller, par l'intermédiaire de la tige *l* et d'un axe qui passe à travers une boîte à étoupes, une règle intérieure horizontale destinée à agiter la surface de l'acide. Au bout de quelques minutes, l'air s'échappe de l'eau, puis elle dégage de nombreuses bulles de vapeur, et bientôt la congélation commence à sa surface. — En R est une platine sur laquelle on peut poser un récipient, quand on veut faire servir la pompe P aux usages ordinaires de la machine pneumatique.

1136. Froid obtenu par l'évaporation de divers liquides. — M. Rizet emploie, pour fabriquer de la glace sur une grande échelle, le froid produit par l'évaporation de l'éther sulfurique. Ce liquide est introduit dans un système de tubes plongés dans de l'eau salée, qui est refroidie sans se congeler, et dans laquelle il n'y a qu'à plonger les vases dans lesquels on veut produire la congélation, par exemple des moules de cuivre contenant de l'eau. Le vide est fait

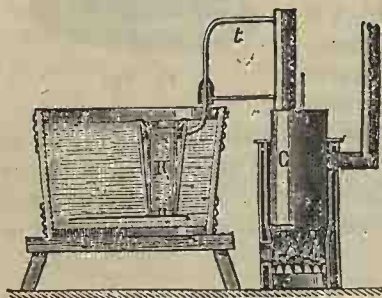


Fig. 795.

dans ces tubes au moyen d'une pompe aspirante et foulante mue par une machine à vapeur de la force de 10 chevaux. Cette pompe aspire la vapeur d'éther, ce qui détermine dans les tubes une évaporation active accompagnée d'un froid intense, et la condense ensuite dans des récipients entourés d'eau froide, d'où l'éther revient aux tubes d'évaporation.

M. Ch. Tellier a substitué à l'éther sulfurique l'éther méthylique, qui bout à -31° , et par conséquent présente une activité d'évaporation bien supérieure à celle du premier, qui bout à $+37^{\circ}$. Ce moyen d'obtenir de la glace en grande quantité est très-employé dans divers pays.

M. R. Pictet obtient également de la glace en grande quantité, par l'évaporation de l'acide sulfureux liquéfié par une compression de 3 ou 4 atmosphères, et qui bout à -10° . Cet acide lui est expédié de Suisse, où il est fabriqué en grand par l'action de la vapeur de soufre à 400° sur l'acide sulfurique. Les tubes d'évaporation sont plongés dans une solution de glycérine qui reçoit les vases remplis d'eau à congeler. D'après M. Pictet, la glace ainsi formée ne revient qu'à 1 centime par kilogramme. Remarquons que l'acide sulfureux, comme l'éther dans les autres systèmes, sert indéfiniment; il n'y a qu'à remplacer la très-petite quantité de liquide qui se perd accidentellement.

Congélateur Carré aîné. — M. Carré aîné, qui a aussi construit une machine à éther sulfurique, a imaginé un autre appareil au moyen duquel on obtient de la glace sans pompe ni moteur, en utilisant le froid intense que produit l'évaporation du gaz ammoniac liquéfié par la compression. L'appareil, tout en fer

forgé et hermétiquement clos, consiste en une chaudière C (fig. 795), contenant de l'eau saturée de gaz ammoniac. On chauffe la chaudière jusqu'à 130 ou 140°, températures indiquées par un thermomètre plongé dans un tube rempli d'huile, qui pénètre dans la chaudière. Le gaz est chassé de la dissolution par la chaleur, et il vient, par le tube *t*, se liquéfier par compression dans le récipient annulaire R plongé dans un bain d'eau froide. On refroidit ensuite la chaudière dans ce bain, et l'eau qu'elle contient redissout le gaz ammoniac, dont elle peut absorber 650 fois son volume à la température de 20°, ou 0,31 de son poids. Une volatilisation rapide du gaz liquéfié se produit alors en R, et le froid, de — 35 à 40°, qui en résulte, congèle le liquide contenu dans un cylindre de fer-blanc introduit dans l'espace R avec interposition d'eau salée ou d'alcool, pour établir le contact. La glace obtenue ainsi au moyen du feu, est à très-bas prix, car il suffit de 1 kil. de charbon de bois pour congeler 3 kil. d'eau. — M. Carré construit aussi, au lieu de cet appareil intermittent, des appareils continus pouvant donner de 25 à 200 kil. de glace par heure.

II. Formation des vapeurs à la surface.

1137. Lois de la formation des vapeurs dans le vide. — Pour étudier les vapeurs *dans le vide*, on prend un tube de baromètre rempli de mercure purgé par l'ébullition, et renversé sur une cuvette profonde (fig. 796), et l'on fait passer un peu de liquide dans la chambre vide, soit au moyen d'une petite éprouvette remplie de liquide bouillant, qu'on renverse au-dessous de l'ouverture du tube, soit au moyen d'une pipette à bec recourbé contenant du liquide qu'on fait bouillir et dont on chasse, en soufflant, une partie dans le tube barométrique. On peut encore retourner ce tube, après l'avoir incliné pour qu'il soit totalement rempli, on ôte un peu de mercure, que l'on remplace par du liquide bouillant, on ferme avec le doigt, et l'on redresse le tube dans la cuvette. Dans tous les cas, le liquide introduit monte à travers le mercure, qui descend et s'arrête presque aussitôt, en conservant une partie de sa hauteur primitive. C'est que le liquide a produit dans le vide, de la vapeur dont la tension s'ajoute à la colonne de mercure qui reste, pour faire équilibre à la pression atmosphérique. La force élastique de cette vapeur est donc égale à la différence *ab* entre la hauteur d'un baromètre, *aB*, et celle du mercure dans le tube à vapeur *V*.

Si l'on soulève rapidement le tube à vapeur, de manière à augmenter l'espace occupé par la vapeur, le niveau *b* ne se déplace pas, *s'il y a du liquide en excès*. Il faut donc qu'il se soit formé de nouvelle vapeur, pour remplir l'espace *mn*



Fig. 796.

ajouté, de manière que la tension reste la même. — Si, au contraire, on enfonce le tube dans la cuvette, pour diminuer l'espace qu'occupe la vapeur, la colonne de mercure conserve encore sa même hauteur; la vapeur qui occupait l'espace qui a été supprimé se liquéfiant et perdant toute force de ressort; de sorte que la vapeur répandue dans l'espace qui subsiste conserve la même tension. De ces expériences, Dalton a déduit les lois suivantes :

1^o Un liquide en quantité suffisante, introduit dans le vide, fournit de la vapeur qui atteint instantanément une tension maximum. Si l'on augmente l'espace qu'occupe cette vapeur, le liquide en produit d'autre instantanément, qui remplit le nouvel espace.

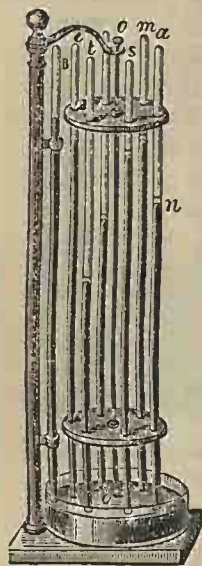


Fig. 797.

2^o La tension maximum ne peut être augmentée par une diminution de volume ou par la compression; celle-ci ayant pour effet de détruire la vapeur qui occupait l'espace supprimé, en la faisant repasser à l'état liquide. — L'espace ainsi rempli de vapeur au maximum de tension est dit saturé.

Si l'espace n'était pas saturé, s'il n'y avait pas un excès de liquide, les variations de volume et de pression suivraient sensiblement la loi de Mariotte.

1138. Circonstances dont dépend la tension maximum. — La tension maximum d'une vapeur dans le vide dépend : 1^o de la nature du liquide. Pour le démontrer, on se sert du faisceau barométrique (fig. 797), composé de plusieurs tubes de baromètre fixés à deux plateaux circulaires mobiles autour d'un axe vertical *oo*. Ces tubes contiennent différents liquides, comme de l'eau, *e*, de l'alcool, *a*, de l'éther sulfurique, *s*, de l'essence de térébenthine, *t*, du muse, *m*....; ils plongent tous dans une même cuvette, et en faisant tourner l'appareil

autour de l'axe *oo*, on les approche successivement d'un baromètre sec *B*, pour comparer les hauteurs des colonnes de mercure.

2^o La tension maximum augmente rapidement par la chaleur, et à chaque température correspond une tension maximum particulière, que nous apprendrons plus tard à mesurer.

1139. Tension des liquides. — Les lois qui précèdent montrent qu'un liquide parfait ne peut subsister qu'autant qu'une pression suffisante, exercée à sa surface, s'oppose à son expansion. Cette pression limite augmente rapidement avec la température : ainsi, à 0°, la tension maximum de la vapeur d'eau est de 4^{mm},6 de mercure; à 50°, de 91^{mm}; à 100°, de 760^{mm} ou d'une atmosphère; à 150°, de 4,5 atmosphères; et à 200°, de 15 atmosphères. On voit que, pour une température double, la tension est 15 fois plus grande. La tension maximum indique, pour la température à laquelle elle a lieu, la limite de distance des molécules de la vapeur, à partir de laquelle la cohésion agirait pour produire

l'état liquide, et s'il n'y a pas une pression suffisante de vapeur au-dessus du liquide, il continue de se volatiliser.

La tendance à prendre l'état gazeux est d'autant plus prononcée que la température est plus élevée; on la nomme la *tension* du liquide. Cette tension prouve qu'il y a équilibre instable entre les molécules, pour les déplacements qui tendent à les écarter, et nous avons vu comment on peut concevoir cet état particulier d'équilibre (I, 173).

Nous voyons aussi que les fluides élastiques présentent des propriétés spéciales quand ils sont dans le voisinage du point de liquéfaction, et quand ils sont en contact avec un excès de liquide. C'est dans cette situation particulière que les *vapeurs* se distinguent réellement des gaz proprement dits; elles présentent alors des propriétés distinctes dont nous allons poursuivre l'étude.

Si l'on offre à une vapeur *non saturée* un espace plus grand à occuper, sa densité et sa force élastique diminuent en suivant à peu près la loi de Mariotte; et si on l'échauffe, elle se dilate, et son coefficient de dilatation ne diffère de celui des gaz ordinaires, que de quantités comparables à celles dont les coefficients de ces gaz diffèrent entre eux. Si le volume est invariable, la pression augmente et peut se calculer comme on calcule celle des gaz qui s'échauffent. C'est en mesurant les densités des vapeurs à différentes températures et sous différentes pressions, par des moyens que nous indiquerons, que l'on a constaté ces résultats. Il n'y a donc pas de distinction à faire entre les gaz et les vapeurs quand celles-ci ne sont pas à saturation, et en effet la plupart des gaz ont pu être liquéfiés, comme nous le verrons bientôt (1465).

1440. FORMATION DES VAPEURS DANS LES GAZ. — La vapeur se forme encore spontanément à la surface d'un liquide quand il est plongé dans un gaz, dans l'air par exemple; et, quand l'espace est limité, la vapeur finit par y atteindre une *tension maximum*, et l'on dit alors que le gaz est *saturé* de vapeur; seulement cet état de saturation n'est atteint qu'au bout d'un temps plus ou moins long, tandis que *dans le vide* il s'établit instantanément.

Nous avons vu qu'un liquide cesse de produire de la vapeur quand celle qui s'est d'abord formée exerce une pression suffisante à sa surface. Or, l'air exerçant une pression bien supérieure à la tension maximum pour les températures ordinaires, on doit se demander comment l'évaporation peut cependant avoir lieu dans l'atmosphère. Pour expliquer ce résultat, rappelons que les gaz tendent à se mélanger, même à travers des ouvertures imperceptibles (I, 448). Or l'air qui presse sur un liquide étant poreux, la vapeur se forme dans les points de la surface qui correspondent aux intervalles des molécules de ce gaz, et la vapeur produite se mêle peu à peu à l'air, et se répand dans ses pores jusqu'à ce que les espaces intermoléculaires soient saturés comme le serait un espace vide. Si l'espace est illimité et l'air en repos, l'évaporation se fera de plus en plus lentement, à mesure que les couches qui reposent sur le liquide approcheront du point de saturation. Si, au contraire, l'air se renouvelle, l'évaporation sera plus rapide, l'air mêlé de vapeur étant remplacé par d'autre air beaucoup plus sec,

ce qui explique pourquoi le vent a la propriété de faire sécher si rapidement les corps mouillés. C'est à une cause semblable qu'est dû le froid que produisent les *pulvérisateurs*, systèmes de tubes au moyen desquels un courant d'air lance un liquide en fines gouttelettes en provoquant une évaporation rapide sur la surface relativement énorme que présente l'ensemble de ces gouttelettes.

1141. Loi du mélange des gaz et des vapeurs. — Il résulte de ce qui précède que l'évaporation, dans un espace limité rempli de gaz, ne devra s'arrêter qu'au moment où la vapeur aura atteint le même maximum de tension que dans le vide. C'est, en effet, ce qui a lieu, car Dalton a reconnu que la force élastique de la vapeur qui sature un espace plein de gaz, est la même que dans le vide à la même température. Pour vérifier cette loi, Gay-Lussac a imaginé l'appareil (fig. 798).

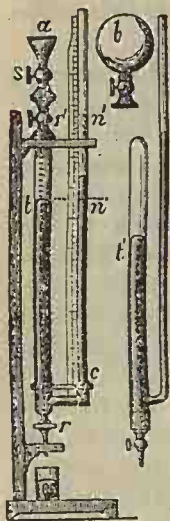


Fig. 798.

Un gros tube *t*, muni de deux robinets de fer *r*, *r'*, communique avec un tube vertical *en*. Le tube *t* étant rempli de mercure bien sec, on enlève la pièce *sa*, et l'on visse en *r'* le ballon *b* rempli d'un gaz bien desséché; puis on ouvre les robinets *r'*, *r*, et celui du ballon. Le mercure s'écoule en *r*, et le gaz pénètre dans le tube *t*. On ferme ensuite les robinets, et l'on déduit la force élastique du gaz de la différence des niveaux, en *t* et *n* et de la hauteur du baromètre. On remplace alors le ballon par la pièce *sa*, qui n'est autre chose qu'un robinet à cuvette (I, 564), on verse du liquide dans l'entonnoir *a*, et en faisant tourner plusieurs fois le robinet *s*, on introduit du liquide goutte à goutte dans le tube *t*. Ce liquide produit de la vapeur, dont la tension s'ajoute à celle du gaz, et le niveau baisse en *t* et monte en *n*. On attend qu'il y ait saturation, ce qui a lieu quand les niveaux ne changent plus de position, et que la surface du mercure en *t* reste mouillée. On verse ensuite du mercure jusqu'en *n'*, de manière à ramener le niveau *t* à sa position première, et le gaz à son volume primitif. Alors l'excès de la pression actuelle sur celle qui existait avant l'introduction du liquide, représente la tension *h* de la vapeur qui sature le gaz à la température de l'expérience. Si l'on introduit de ce même liquide dans la chambre d'un baromètre à la même température, on trouve que la dépression produite est égale à *h*.

On peut se dispenser de ramener le volume du gaz à sa valeur primitive; mais alors il faut mesurer l'espace qu'il occupe au commencement et à la fin de l'expérience, ce que l'on fait au moyen d'une division en parties d'égale capacité tracée sur le tube *t*. Si *P* est la pression du gaz sec sous le volume *v*, *P'* la pression du mélange sous le volume *v'*, la pression du gaz seul sera alors $P \frac{v}{v'}$, et la force élastique de la vapeur, $P' - P \frac{v}{v'}$.

Dans le cas où le liquide, comme par exemple l'éther, dissout les corps gras qui garnissent les robinets, l'air extérieur ou le gaz intérieur peuvent passer par les joints. Dans ce cas, Gay-Lussac modifie son appareil comme on le voit en *t'* (fig. 798); le robinet supérieur est supprimé, et l'on introduit du gaz dans le tube *t'*, par le bas, en le plaçant sur une cuve à mercure. On verse ensuite le liquide dans le tube latéral, et l'on fait en sorte, en faisant écouler du mercure par le robinet inférieur, que la partie inférieure de la colonne liquide arrive à la jonction des deux tubes, de manière qu'une partie pénètre en *t'*. On verse ensuite du mercure dans le tube latéral, et l'on achève l'expérience comme ci-dessus.

L'expérience peut aussi se faire au moyen du simple tube barométrique gradué qui sert à vérifier la loi de Mariotte pour les faibles pressions (I, 376) et dans lequel on introduit un gaz et quelques gouttes de liquide.

1142. Expériences à différentes températures. — M. Regnault, dans ses études sur l'hygrométrie, a vérifié la loi qui précède par une méthode plus précise, et avec laquelle il a pu opérer à des températures comprises entre 0° et 38°¹. Son appareil est construit comme un thermomètre à air, semblable à celui de la figure 747, (1041), seulement le ballon contient une petite ampoule de verre pleine d'eau et fermée à la lampe, et les parties supérieures des deux branches du manomètre sont plongées, ainsi que le ballon, dans une caisse garnie d'une glace et dans laquelle on verse de l'eau dont on peut faire varier la température. Après avoir rempli le ballon d'air sec, par la méthode décrite plus haut (1031), et avoir amené le mercure au repère marqué sur la branche du manomètre qui communique avec le ballon, pendant que celui-ci est entouré de glace et que l'intérieur est soumis à la pression atmosphérique, on ferme l'appareil en fondant à la lampe l'appendice latéral. On entoure ensuite le ballon, d'eau que l'on porte successivement à différentes températures; on ramène, à chaque température, le niveau au repère, afin que le volume du gaz soit toujours le même, et l'on mesure la pression.

On enlève ensuite l'eau du bain, on approche quelques charbons du fond du ballon, et le liquide qui remplit l'ampoule se dilate et la fait éclater. On recommence alors la série des observations qu'on a faites sur l'air sec, en attendant à chaque température que la pression soit bien stationnaire. L'excès de la pression sur celle qu'on a obtenue dans la première série à la même température, donne alors la tension de la vapeur à saturation. Pour plus de sûreté, M. Regnault a opéré d'abord en élevant successivement la température, et ensuite en l'abaissant de manière que la vapeur se condensât en partie, d'une observation à la suivante.

Des expériences faites dans l'air et dans l'azote ont constamment donné, pour la tension de la vapeur d'eau dans le gaz, une valeur plus faible de quelques dixièmes de millimètres que la tension dans le vide. La différence est irrégulière, ne paraît pas liée à la température, et varie autrement dans l'air que dans l'azote. Si elle n'est pas due à quelque cause d'erreur constante restée inaperçue, on

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XV, p. 429.

pourrait l'expliquer par l'inertie des molécules du gaz et de la vapeur, qui arrêterait l'évaporation avant que la saturation fût complète, lorsque l'excès de la tension du liquide sur celle de la vapeur déjà formée serait devenue extrêmement faible.

Au reste, la différence étant très-petite, on peut admettre la loi d'égalité, dans les applications et les calculs, quelle que soit, même, la pression primitive du gaz.

Cette loi est encore vraie quand il y a plusieurs vapeurs mélangées provenant de différents liquides n'ayant pas d'actions chimiques les uns sur les autres; chacun se comporte comme s'il était seul.

L'eau n'ayant qu'une faible tension dans les basses températures, M. Regnault a aussi expérimenté sur l'éther, le sulfure de carbone et la benzine, substances beaucoup plus volatiles¹. La tension de la vapeur s'est toujours trouvée plus faible que dans le vide et d'autant plus que le liquide est plus volatil. Ainsi, vers 13°, la différence est de 5^{mm}, 2^{mm} et 1^{mm},4 pour l'éther, le sulfure de carbone et la benzine, et elle augmente avec la pression et la température.

La tension maximum dans les gaz diffère moins de celle qu'on trouve dans le vide, quand on condense brusquement la vapeur par refroidissement, puis qu'on rétablit rapidement la température stationnaire. Si alors on observe la pression de quart d'heure en quart d'heure, on la voit diminuer lentement pendant plusieurs heures. Si, au contraire, on opère en échauffant le bain jusqu'à la température stationnaire, une fois celle-ci atteinte, la tension augmente lentement, sans cependant jamais atteindre celle qui aurait lieu dans le vide. M. Regnault explique ces résultats en admettant que la vapeur est condensée par la surface du verre en vertu de sa cohésion pour le liquide, de manière qu'il n'y ait pas saturation. Le liquide invisible condensé descendant par son poids, l'affinité hygroscopique de la surface n'est pas satisfaite, et de nouvelles vapeurs se condensent. Dans le vide, la vapeur condensée est immédiatement remplacée, mais dans un gaz, elle se forme trop lentement pour qu'il en soit ainsi. Après un refroidissement, comme la vapeur condensée ne descend sur les parois que lentement, la tension diffère moins de celle qui a lieu dans le vide, et elle va ensuite en diminuant.

M. Regnault conclut de ses expériences que la loi de Dalton sur le mélange des gaz et des vapeurs est exacte en principe, et que si elle ne se vérifie pas rigoureusement, cela tient à l'influence des parois des vases dans lesquels on opère. D'autres expériences faites dans le gaz hydrogène et dans l'acide carbonique, ont conduit l'éminent physicien à la même conclusion.

1143. Précipitation de la vapeur. — La quantité de vapeur nécessaire pour saturer un espace vide ou plein de gaz est d'autant plus petite que la température est plus basse. Il en résulte que, si l'on vient à refroidir un espace saturé, une partie de la vapeur se précipitera à l'état liquide. Il n'est même pas

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XXXIX, p. 345.

nécessaire que l'espace soit saturé, si on le refroidit assez pour qu'il le devienne avec la quantité de vapeur qu'il contient. C'est ainsi que l'air humide, refroidi au contact des corps très-froids, laisse déposer des gouttelettes d'eau à leur surface. Si le refroidissement se fait dans toute la masse gazeuse, comme cela a lieu quand on raréfie rapidement de l'air humide contenu dans un récipient, la précipitation se fait, dans tous les points de la masse, et l'on voit apparaître une espèce de brouillard formé de gouttelettes d'eau très-fines, qui restent en suspension dans l'air. Ce brouillard disparaît en peu d'instants, chaque gouttelette s'évaporant dans le gaz, qui a bientôt repris la température ambiante. De même, la vapeur pure ou mêlée d'air, chassée dans un espace plus froid, forme un brouillard, parce qu'il y en a plus qu'il n'est nécessaire pour saturer cet espace. S'il est indéfini et non saturé d'avance, les gouttelettes disparaissent bientôt en s'évaporant dans les portions d'air plus éloignées. C'est ce qui a lieu, par exemple, quand, par un temps froid ou humide, on distingue son haleine. Les légers nuages qui s'exhalent de l'eau chaude sont dûs à la même cause; ils se dissipent presque aussitôt en s'évaporant dans des couches d'air plus élevées. Il faut remarquer que ces nuages, que l'on désigne improprement sous le nom de vapeur, sont composés de gouttelettes d'eau; *la vapeur proprement dite est transparente et invisible comme l'air*, et l'on ne la voit que lorsqu'elle est colorée, comme celle de l'acide hypoazotique, ou de l'iode.

1144. Tension maximum dans une enceinte à température inégale.

— Considérons une enceinte vide, de forme quelconque et contenant un liquide qui ne soit pas dans l'endroit le plus froid. Ce liquide fournira de la vapeur avec la tension maximum qui correspond à sa température, et cette vapeur, se répandant dans tout l'espace, tendra à y établir partout la même pression. Or, cette pression est trop grande pour la température de la partie la plus froide; une portion de la vapeur se condensera donc en ce point de l'enceinte. Mais alors la tension dans tout l'espace étant diminuée, il n'y aura pas saturation près du liquide; de nouvelles vapeurs se produiront donc, puis une nouvelle condensation se fera dans la partie froide, et ainsi de suite jusqu'à ce que tout le liquide s'y soit ainsi transporté par *distillation*. Alors la pression dans l'enceinte sera partout égale à la tension maximum qui correspond à la température la plus basse. — Si l'enceinte contient du gaz, cet état final s'établit de même, seulement au bout d'un temps beaucoup plus long. L'appareil de Fontana (*fig.* 790) montre bien le passage du liquide dans la partie la plus froide d'une enceinte vide ou remplie d'air.

1145. Problèmes sur les vapeurs. — La loi du mélange des gaz et des vapeurs permet de résoudre divers problèmes importants :

1^o Étant donné le volume V d'un gaz sec, trouver son volume V' quand il est saturé de vapeur, sous la même pression P et à la même température t . Soit F la force élastique de la vapeur à saturation à cette température t ; la pression du gaz seul dans le mélange dont la pression est P , sera $P - F$; alors on aura, d'après la loi de Mariotte, $V' : V = P : (P - F)$.

2° Étant donné un volume V de gaz saturé à t° et sous la pression P , trouver son volume V' , aussi saturé, à t'° et sous la pression P' . Soit F et F' les tensions de la vapeur aux températures t et t' . Les pressions dues au gaz seul, à ces deux températures, seront $P - F$ et $P' - F'$. Alors, d'après les lois de la compression et de la dilatation des gaz¹, on aura

$$[1] \quad \frac{V'}{V} = \frac{P - F}{P' - F'} \frac{273 + t'}{273 + t}.$$

Si le gaz n'est pas en contact avec un excès de liquide, et si l'on a $t' > t$, il pourra se faire que l'espace ne soit plus saturé, et alors la formule ne pourra s'appliquer. Pour savoir quand il en sera ainsi, soient D et D' les densités de la vapeur à saturation aux températures t et t' , sous les pressions F et F' . En appliquant à la vapeur les formules des dilatations des gaz, et la loi de Mariotte, on aura

$$[2] \quad \frac{D'}{D} = \frac{F'}{F} \frac{273 + t}{273 + t'}; \quad \text{d'où} \quad \frac{VD'}{VD} = \frac{PF' - FF'}{P'F - FF'}, \quad [3]$$

en multipliant l'équation [2] terme à terme par la précédente [1]. La formule [3] donne le rapport des masses de vapeur qui satureront les volumes V et V' aux températures t et t' . Pour que la masse de vapeur VD soit capable de saturer le volume V' à la température t' , il faut que PF' soit plus petit que $P'F$; car alors VD' sera moindre que VD , et un excès de vapeur se condensera. La formule [1] sera alors applicable. Il en sera de même si l'on a $PF' = P'F$; mais il n'y aura pas de précipitation. Enfin, si PF' est plus grand que $P'F$, on aura $VD < VD'$, et le volume V' à la température t' n'étant pas saturé, la formule [1] ne pourra plus s'appliquer.



Fig. 799.

Manomètre de Berthollet. — Comme application, supposons qu'on veuille savoir s'il y a eu absorption ou dégagement de gaz dans un vase fermé muni d'un thermomètre et d'un manomètre, et contenant de l'eau et diverses substances organiques (fig. 799). Soient P et t la pression et la température au commencement de l'expérience, X et t' leurs valeurs à la fin, et F et F' les tensions de la vapeur à saturation, aux températures t et t' . S'il n'y a eu ni dégagement ni absorption de gaz, la pression, après l'expérience, sera, d'après la formule [1],

$$P' = (P - F) \frac{273 + t'}{273 + t} + F',$$

car on a $V = V'$, en négligeant la dilatation du vase. Si X est plus grand

¹ Ces lois ne s'appliquent pas rigoureusement dans le voisinage du point de liquéfaction, comme nous l'avons vu. Ce calcul n'est donc qu'une approximation.

que P' , c'est qu'il y a eu dégagement de gaz, et s'il est moindre, il y a eu absorption. L'appareil (fig. 799) se nomme *manomètre de Berthollet*.

III. De l'ébullition.

11-16. Description du phénomène. — Quand on chauffe un liquide dans un vase ouvert, il se produit d'abord à sa surface, une évaporation qui va en augmentant avec la température. Bientôt les couches en contact avec les parois chauffées sont assez chaudes pour que la vapeur qu'elles tendent à produire puisse vaincre la pression de l'eau supérieure, et celle de l'atmosphère. On voit alors des bulles de vapeur se détacher des parois du vase, monter à travers le liquide en diminuant de volume, puis se condenser et disparaître, en arrivant dans les couches supérieures qui sont moins chaudes. Les mouvements de ces bulles et leur succession rapide produisent des apparences de cônes irréguliers,



Fig. 800.



Fig. 801.

faciles à distinguer dans un vase de verre A (fig. 800). Le liquide, en se précipitant dans les espaces abandonnés par les bulles qui se condensent, produit de petites secousses, d'où résulte ce bruissement particulier qui précède l'ébullition, et que l'on indique en disant que l'eau *chante*. La chaleur abandonnée par les bulles qui se condensent; et l'agitation produite par leur ascension, donnent bientôt aux couches supérieures une température égale à celle des couches inférieures; alors les bulles de vapeur arrivent jusqu'au niveau, en augmentant de volume par l'évaporation qui se fait par toute leur surface interne, et à cause de la diminution de la pression due au liquide, à mesure qu'elles s'élèvent. Elles présentent alors l'apparence de troncs de cônes irréguliers renversés, B (fig. 800). L'ébullition est alors en pleine activité.

Éolipyle. — Autrefois, on se faisait une idée fautive du phénomène de l'ébullition. On confondait alors tous les gaz sous le nom d'air; et en partant de là on regardait la vaporisation comme la transformation de l'eau en air. Vitruve partageait cette opinion, qui persista jusque dans le dix-septième siècle. Un petit instrument, nommé *éolipyle*, servait à montrer cette prétendue transformation;

il consiste en un vase en métal terminé par un tube très-étroit *o* (fig. 801); on y introduit de l'eau, en chassant d'abord une partie de l'air par la chaleur, et plongeant ensuite l'orifice *o* dans l'eau, pendant le refroidissement. On met ensuite le vase sur le feu, et la vapeur s'échappe en *o* avec plus ou moins de force. Héron d'Alexandrie connaissait l'éolipyle, mais ne le désignait pas par ce nom, il semble avoir eu des idées plus exactes que ses successeurs sur la nature de la vapeur qui s'échappe de ces sortes de récipients, et il connaissait la manière de les remplir.

La température de l'ébullition en pleine activité dépend : 1^o de la nature du liquide ; 2^o de la pression extérieure ; 3^o de la surface intérieure du vase ; 4^o des substances dissoutes dans le liquide.

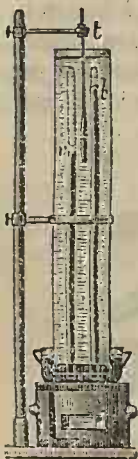


Fig. 802.

1147. EFFETS DE LA PRESSION. — Dalton a reconnu par l'expérience que *la force élastique de la vapeur pendant l'ébullition est égale à la pression extérieure*. Ce résultat est facile à concevoir ; car la vapeur, pour subsister sous forme de bulles dans le liquide, doit pouvoir résister à la pression à laquelle elle est soumise. Cette loi, connue sous le nom de *loi de Dalton*, se prouve au moyen de l'appareil (fig. 802) : Un tube barométrique *v*, dans lequel on a introduit du liquide, plonge dans une petite chaudière de fer pleine de mercure. Ce tube est enveloppé d'un manchon de verre contenant de l'eau, qui déprime le mercure d'une quantité égale à $\frac{1}{14}$ environ de la hauteur de cette eau, que l'on chauffe par l'intermédiaire du mercure. On voit alors le niveau descendre en *v* et s'éloigner de celui du baromètre de comparaison *b* ; et quand la température a atteint celle de l'ébullition en vase ouvert, du liquide qui est en *v*, le niveau est le même dans le tube et dans la cuvette. — Cette égalité entre la tension de la vapeur et la

pression extérieure sert de caractère et de définition au phénomène de l'ébullition ; elle explique pourquoi un siphon, une pompe aspirante ne peuvent fonctionner avec de l'eau bouillante, dont les vapeurs remplacent la pression atmosphérique ; ni avec de l'eau chaude quand la tension de la vapeur à la température qu'elle possède, dépasse la différence entre la pression atmosphérique et celle que représente la colonne soulevée.

Il résulte aussi de là, que la température de l'eau ne peut être portée au-dessus de 100° à l'air libre sous la pression de 760^{mm} ; si l'on fournit plus de chaleur, la vapeur se produit plus rapidement, mais la température ne s'élève pas, à cause de la chaleur de vaporisation enlevée. Si l'on veut échauffer de l'eau au-dessus de 100°, il faut exercer une grande pression sur sa surface, ce que l'on peut faire au moyen de la vapeur elle-même.

1148. Marmite de Papin. — Cet appareil, nommé aussi *digesteur de Papin*, consiste en un vase très-résistant *R* (fig. 803), dont le couvercle est

fortement maintenu par une vis *vv* qui prend son écrou dans un arc métallique très-fort fixé au vase par des clavettes *c, c*. Des bandes de carton mouillé sont interposées entre le bord du vase et le couvercle. Un levier *L*, chargé d'un poids *P*, ferme un ajutage *o* adapté au couvercle. On met de l'eau dans le vase *R*, et on le porte sur le feu; la vapeur s'accumule au-dessus du liquide et y exerce une pression croissante, de manière que l'ébullition est empêchée et que la température s'élève de plus en plus. Le levier *L*, qui ferme l'orifice *o*, est destiné à limiter la tension intérieure, qui pourrait faire éclater l'appareil, si elle devenait trop forte. Quand la vapeur atteint une certaine pression, elle soulève le levier, en *o*, et s'échappe. Cette disposition constitue la *soupape de sûreté*, adaptée à toutes les chaudières à vapeur, et l'une des plus utiles inventions de Papin.

La température que peut recevoir l'eau dans la marmite de Papin est assez élevée pour que Musschenbroeck ait pu y fondre du plomb, ce qui suppose une température de 325°. La force dissolvante de cette eau est considérable; les os s'y ramollissent, la gélatine qu'ils contiennent est dissoute, et l'on prépare ainsi du bouillon de gélatine. On a pu même extraire de la gélatine d'os fossiles, et il y a une cinquantaine d'années, on a servi sur la table du préfet du Nord, de la gélatine extraite d'os de mastodontes et d'autres grands mammifères fossiles, c'est-à-dire d'animaux morts depuis plus de 6000 ans.

Le bois soumis à l'action de l'eau surchauffée dans le digesteur de Papin, prend l'aspect du bois décomposé par une longue exposition à l'air et à la pluie; les matières résineuses, les huiles, les gommés, ont été dissoutes.

La marmite de Papin a été décrite en Angleterre en 1681, sous le nom de *Nouveau digesteur*, dans un ouvrage qui fut traduit en français sous le titre : *Manière d'amollir les os*, etc. Papin la destinait particulièrement à la cuisson rapide des légumes, de la viande. Depuis, on a fait usage pendant quelque temps, dans les ménages, d'appareils analogues, que leur mode de fermeture a fait nommer *marmites autoclaves*. L'ouverture avait une forme ovale, ainsi que le couvercle. Ce dernier, un peu plus grand, s'introduisait en le présentant par son petit diamètre; on le retournait ensuite et on l'appliquait contre le bord de l'orifice, de dedans en dehors; la pression de la vapeur le maintenait alors d'autant plus fortement que sa tension était plus grande. Malgré l'adjonction d'une soupape de sûreté, ces appareils, entre des mains inexpérimentées, ont occasionné des accidents qui les ont fait généralement abandonner.

1149. Ébullition sous de faibles pressions. — Si, l'on diminue la

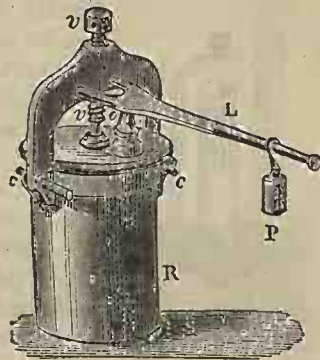


Fig. 803.

pression au-dessus d'un liquide, l'ébullition devra se faire à une température plus basse que sous la pression atmosphérique; c'est en effet ce qui a lieu. Par exemple, sur une montagne élevée, l'ébullition de l'eau se fait bien au-dessous de 100°, comme Amontons l'a vu le premier, puis Cassini sur le Canigou et Montesquieu sur le pic du Midi. Fahrenheit et Graffat avaient remarqué que la température d'ébullition diminue quand le baromètre baisse.

On peut mettre le fait en évidence par diverses expériences. On place sous le récipient de la machine pneumatique, un vase rempli d'eau à une température t inférieure à 100° (fig. 804), on a raréfié l'air, et dès que sa force élastique est devenue égale à la tension de la vapeur à t , l'ébullition se produit. Les bulles de vapeur prennent naissance dans les parties supérieures du liquide; c'est-à-dire là où la pression est la plus faible. — Dans l'appareil de M. E. Carré (1135) l'ébullition se fait avec activité même quand l'eau de la carafe est à zéro.

On peut encore faire l'expérience suivante due à Franklin: on fait bouillir de l'eau dans un ballon, assez longtemps pour que tout l'air soit entraîné par la vapeur; on le bouche hermétiquement et on le renverse (fig. 805). Si, au bout de quelque temps, on verse de l'eau froide sur ce ballon, on voit l'ébullition se reproduire; la vapeur qui remplit le ballon se condensant par le contact des parois refroidies, d'où résulte



Fig. 804.

une diminution de pression. On peut produire ce phénomène pendant plusieurs heures.

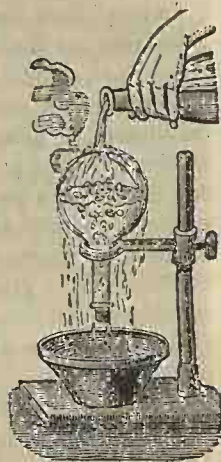


Fig. 805.

1150. Thermo-baromètre. — L'égalité entre les pressions de l'atmosphère et de la vapeur pendant l'ébullition, permet de déduire la première de la seconde supposée connue. Or celle-ci est donnée par des tables, que nous apprendrons à construire, qui donnent les tensions de la vapeur pour les diverses températures. Il suffit donc de les consulter pour connaître la pression, quand on a observé la température d'ébullition. En procédant ainsi sur une montagne, on peut en calculer la hauteur par la formule connue (I, 472), en substituant à l'observation du baromètre, celle d'un thermomètre. Fahrenheit et Cavallo ont les premiers indiqué cette méthode, mais il faut des précautions nombreuses pour qu'elle donne une précision comparable à celle du baromètre. En effet, le baromètre baisse de 1^{mm}, au niveau de la mer, quand on s'élève de 10^m environ. Dans les mêmes circonstances, le point d'ébullition de l'eau ne varie que de $\frac{1}{27}$ de degré; il faut donc que les degrés du thermomètre occupent une longueur de 27^{mm} pour que la longueur à mesurer soit la même que celle

qu'on observe sur le baromètre. J. Wollaston a fait construire, pour cet usage, des thermomètres dont les degrés avaient 5^{cm} de longueur. On conçoit que l'instrument serait d'une longueur incommode si l'on ne se contentait de la portion de l'échelle, voisine de 100°. Wollaston ne conserve que 3°, et, pour expérimenter sous différentes pressions, comme il suffit d'avoir la différence de température d'ébullition aux deux stations, il applique le principe du thermomètre métastatique (836), en ajoutant à la colonne thermométrique, et en quantité d'autant plus grande que la température d'ébullition doit être plus basse, une partie du mercure tenu en réserve dans le renflement ménagé à l'extrémité du tube. L'instrument se règle dans l'eau bouillante, à la station inférieure. — Les thermomètres à réservoir intermédiaire, portant les deux points fixes (831), sont souvent préférés, à cause de la facilité de vérifier le zéro, et de la faible longueur qu'on peut aussi leur donner.

Ainsi perfectionnée, la méthode thermo-barométrique est très-commode dans les voyages, l'appareil qu'elle exige étant moins embarrassant, moins pesant et moins fragile que le baromètre.

Hypsomètre. — M. Regnault a imaginé un petit appareil très-portatif, destiné à ces sortes d'expériences : il consiste en une petite chaudière de cuivre *c* (fig. 806), enveloppée par un cylindre de laiton *oo'*, qui soutient une lampe à alcool *l*, destinée à faire bouillir l'eau que l'on met en *c*. Des tubes *t*, *t*, *t*, vissés en *v*, et pouvant rentrer les uns dans les autres comme les tuyaux d'une lunette, soutiennent le thermomètre. La vapeur s'échappe par une ouverture latérale ménagée dans le tube supérieur, et l'air nécessaire à la combustion de la lampe s'introduit par les ouvertures *o*, et sort en *o'*. Un écran annulaire *e*, présentant diverses échancrures, sert à fermer celles de ces ouvertures qui sont du côté du vent. Cet instrument, avec les tubes rentrés, n'a que 15^{cm} de hauteur. Pour l'usage de cet appareil, M. Regnault a construit, par les méthodes que nous indiquerons plus tard, des tables donnant les tensions de la vapeur d'eau pour des températures variant par dixièmes de degré entre 85° et 101°.

Formule de M. Forbes. — Quand on a obtenu la pression de l'air au moyen de l'hypsomètre, on calcule l'altitude du lieu en se servant de la formule de Laplace (I, 472). Pour simplifier, on a cherché une relation directe entre l'altitude et la température d'ébullition. M. Forbes¹, après de nombreuses expériences faites à des altitudes calculées au moyen du baromètre, a proposé, pour exprimer la différence de niveau *h* de deux stations où les points d'ébullition sont *t* et *t'*, la formule $h = m(t' - t)$. M. Soret a comparé les résultats donnés par cette formule à ceux de la formule de Laplace et en se servant des

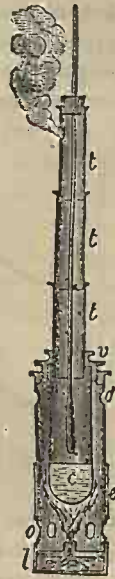


Fig. 806.

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sciences, 1855), t. XXX, p. 290.

tables de tensions des vapeurs de M. Regnault. Il a d'abord calculé la constante m au moyen d'observations faites sur des valeurs de h connues, et l'a trouvée égale à 294^m . Il a constaté ensuite que lorsque les températures sont comprises entre 90° et 100° , l'erreur peut aller à 24^m dans le cas le plus défavorable, et peut n'être que de 1^m . La formule $h = 294^m (t' - t)$ pourra donc être employée quand on ne tiendra pas à une très-grande précision.

1151. ROLE ESSENTIEL DES GAZ DISSOUS, DANS L'ÉBULLITION. — De même qu'on peut porter un liquide au-dessous de son point de solidification sans qu'il se congèle, de même on peut l'élever au-dessus de son point d'ébullition sans qu'il bouille. Il faut pour cela le débarrasser autant que possible des gaz qu'il tient en dissolution. Il résulte même des nombreuses recherches que nous allons exposer que chaque bulle de vapeur formée au sein d'un liquide a toujours pour origine une petite bulle de gaz que la chaleur sépare du liquide ou de la surface des solides qu'il mouille. L'ébullition n'est alors autre chose que l'évaporation

qui se fait à la surface interne de chaque bulle de gaz, qui grossit par le dégagement de cette vapeur dès que la température est assez élevée pour que sa tension puisse vaincre la pression extérieure. Si l'ébullition continue dans un liquide en vase ouvert, dont l'air est chassé peu à peu par la chaleur, c'est que cet air se renouvelle sans cesse par la surface; et quand cela n'a pas lieu, quand le vase est surmonté d'un long col,

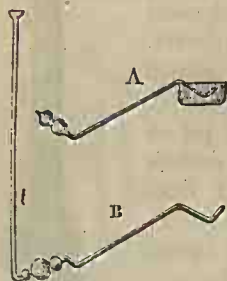


Fig. 807.

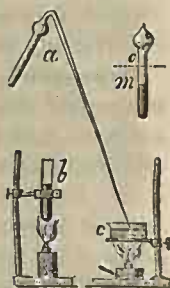


Fig. 808.

l'ébullition, d'abord régulière, se fait ensuite péniblement et par soubresauts.

C'est à Deluc que sont dues les premières observations à ce sujet; il put porter à près de 140° , dans un matras à long col, de l'eau privée d'air, sans qu'il y eût ébullition. Il constata aussi que l'alcool des thermomètres ne bout que très-difficilement quand on l'a purgé d'air. Il attribua ces résultats à la cohésion propre du liquide, qui empêcherait les molécules de se séparer pour se mettre à l'état de vapeur. Si, au contraire, il y a de l'air dissous, ce gaz se dégage à l'état de petites bulles qui produisent autant de solutions de continuité, c'est-à-dire de surfaces libres sur lesquelles la vapeur se produit comme à la surface du niveau du liquide¹.

Expériences de M. Donny. — Cette explication de Deluc, qui n'avait pas été adoptée malgré les expériences sur lesquelles il l'appuyait, a été reprise et confirmée, en 1846, par M. Donny². Ayant préparé avec soin une espèce de marteau

¹ Introduction à la physique terrestre, par Deluc (1803).

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XVI, p. 167.

d'eau A (fig. 807), il en plongeait l'extrémité contenant le liquide, dans de l'eau salée portée à plus de 130°, et il n'y eut pas d'ébullition, quoique la pression intérieure fût extrêmement faible. Vers 138°, il y eut vaporisation brusque, et l'eau fut lancée violemment dans les boules, qui d'autres fois furent brisées. La cohésion du liquide est donc capable de résister à un effort de tension de 3 atmosphères, qui correspond à celle de la vapeur à 135°. — Si l'eau est aérée, et si même on ajoute, comme en B, un tube *t* de 30^{cm} de hauteur rempli de mercure, la vapeur se forme à la température qui dépend de la pression exercée sur le liquide, qu'elle repousse paisiblement dans les boules.

Dans une autre expérience, M. Donny prit un tube portant une boule *a* (fig. 808) suivie d'une partie effilée *ac* de plus de 1^m de longueur, et remplit ce tube d'eau distillée bouillante, en le chauffant, le laissant refroidir pendant que la pointe plongeait en *c* dans l'eau bouillante¹, puis le faisant bouillir en plongeant la pointe dans le mercure. Quand l'appareil était refroidi, le mercure s'élevait dans le tube effilé, comme dans un baromètre. On faisait alors chauffer peu à peu le tube *a*, la pointe plongeant toujours dans du mercure; et il se produisait des soubresauts de plus en plus violents, qui finissaient par faire éclater la boule. — M. Donny porta encore à 100°, dans l'eau bouillante, un marteau d'eau bien purgé d'air *m* (fig. 808), le coupa en *o*, et le chauffa rapidement au moyen d'une lampe à alcool, *b*; il se produisit bientôt une forte explosion qui lança toute l'eau hors du tube. — M. Krebs a répété les expériences de M. Donny sur un mélange d'eau et de $\frac{1}{3}$ d'alcool, soumis préalablement à une ébullition prolongée. Il a pu, soit dans un marteau d'eau fermé, soit après avoir brisé la pointe pendant qu'il était porté à 100°, élever ce liquide à 150 et même 200°. L'ébullition finissait par se produire, avec une violente explosion.

Citons encore l'expérience suivante : M. Galy-Cazalat purgea d'air, en la faisant bouillir dans un ballon, de l'eau recouverte d'une couche d'huile. Cette eau ayant été refroidie, il l'échauffa peu à peu jusqu'à 123°; il se fit alors une explosion de vapeur qui lança presque tout le liquide hors du ballon, qui d'autres fois fut brisé.

Expériences de M. L. Dufour². — M. L. Dufour a opéré sur des liquides n'ayant aucun contact avec des corps solides (1101). Il mit en suspension dans un mélange d'huile de lin et d'essence de girofle, des globules d'eau *non privés d'air*, qui n'éprouvèrent l'ébullition que de 110° à 115°, et le plus souvent quand ils rencontraient les parois. Les globules de 10 à 12^{mm} de diamètre pouvaient être portés à 130° et 140°; ceux de 5 à 6^{mm}, à 165°; et ceux de 1 à 3^{mm}, à 175° et même 178°, auquel cas la tension de la vapeur est de 8 à 9 atmosphères. Si l'on touchait avec une baguette de métal, ou de bois, un globule

¹ C'est par ce moyen que le tube A (fig. 807) a été purgé d'air, seulement on terminait l'opération en le scellant à la lampe au-dessus de la boule.

² *Bibl. univ. de Gen.* (arch. des sc.), t. XXI et XXIV; et *Ann. de ch. et de physique*, 3^e sér., t. LXVIII, p. 378.

à 140°, une bulle s'en dégagait subitement et le repoussait vivement par la réaction produite par la vapeur. La baguette agit en apportant de l'air adhérent à sa surface, et quand elle a servi plusieurs fois elle devient inactive.

Des résultats analogues ont été obtenus sur le *chloroforme*, l'*acide sulfureux*, diverses *solutions salines*, en suspension dans des milieux convenables.

Pour éviter l'influence des mouvements que la chaleur engendre dans les liquides, M. Dufour a procédé aussi en laissant la température fixe, et diminuant la pression de manière à abaisser le point d'ébullition normal. L'eau était renfermée dans une cornue à tubulure laissant passer la tige d'un thermomètre, et plongée dans un bain d'huile; son col communiquait par un tube à robinet, avec un réservoir de tôle en rapport avec une pompe pneumatique et avec un manomètre. — Après avoir fait bouillir l'eau sous la pression atmosphérique, on laissait un peu refroidir, puis on rétablissait l'ébullition en raréfiant l'air. Quand on avait produit ainsi plusieurs ébullitions préalables, on pouvait abaisser la pression au-dessous de la tension de la vapeur correspondant à la température conservée, et d'autant plus que le nombre d'ébullitions préalables avait été plus grand, et que la pression d'où l'on partait était plus faible. L'ébullition était alors provoquée par une secousse, une vibration, un simple bruit.

Des fils de platine ou autres substances, rendaient l'ébullition régulière et normale; mais après deux ou trois ébullitions préalables ces fils devenaient *inefficaces*, l'air adhérent à leur surface ayant été entièrement épuisé.

M. Dufour montre directement l'influence des gaz dégagés au sein du liquide, en introduisant par la tubulure de la cornue deux fils de platine qui pénètrent dans l'eau surchauffée et privée d'air, et à travers lesquels il fait passer une décharge électrique ou un courant électrique. L'eau est décomposée, et il se dégage de fines bulles d'hydrogène sur l'un des fils, et d'oxygène, sur l'autre. Aussitôt l'ébullition se fait avec violence et les bulles de vapeur prennent naissance autour des deux fils.

1152. Expériences de M. Gernez. — Tous les faits qui précèdent confirment la théorie de Deluc. M. D. Gernez en a complété la démonstration par des expériences ingénieuses et plus directes¹. Ces expériences ont été faites dans des tubes ou des ballons de verre scrupuleusement lavés au moyen de potasse, d'eau bouillante et d'alcool absolu, et qui étaient chauffés au bain-marie ou dans la paraffine.

1° Voici d'abord comment il montre l'influence du contact d'un gaz sur l'ébullition : on introduit dans le tube ou le ballon contenant le liquide surchauffé, une petite cloche ménagée à l'extrémité d'un tube étroit, comme on le voit en B (*fig.* 809) et contenant un gaz; dès que ce gaz touche le liquide, on voit des bulles de vapeur se dégager de la surface libre du liquide dans la cloche. Une expérience semblable avait été faite antérieurement par M. F. Marco. M. Gernez, après avoir montré que la présence d'une toile métallique ou végétale

¹ *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. IV, p. 335.

n'empêche pas l'effet de se produire, a montré combien est faible la quantité de gaz enlevée par chaque bulle de vapeur, en inclinant l'appareil (*fig. 809*) de manière que, la vapeur se condensant sur ses parois, la perte de liquide soit très-faible. Au bout de 24 heures d'ébullition, on trouve encore après le refroidissement, une petite bulle de gaz dans la cloche. Si l'on chauffe de nouveau avant qu'elle ne soit dissoute, l'ébullition se reproduit; mais si on la fait sortir en retournant la cloche, comme en A, l'ébullition n'a lieu que si l'on chauffe vivement.

Pour montrer qu'une bulle de vapeur d'origine quelconque contient toujours un peu d'air, on renverse la cloche, remplie de liquide, de manière à recueillir une des bulles de vapeur; on laisse refroidir, la vapeur se condense, et il reste toujours un petit globe d'air au fond de la cloche.

2° Pour prouver que les solides n'agissent sur l'eau surchauffée que par l'air adhérent, M. Gernez fait rougir des fils dans une flamme de gaz ou d'alcool, et les trouve inefficaces. En plongeant dans l'eau surchauffée, un fil dont il avait chauffé seulement quelques parties, il a vu les bulles de vapeur naître seulement sur celles qui n'avaient pas été chauffées. Enfin, il a introduit dans l'eau un fil de platine replié capable de provoquer l'ébullition, et l'a vu perdre cette propriété après le passage d'un courant électrique qui l'avait fait rougir.

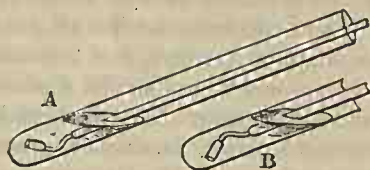


Fig. 809.

Les corps poreux, comme l'éponge de platine, le charbon et les cristaux facilement éliminables, contiennent de l'air. Si on l'expulse par l'incandescence ou par plusieurs immersions prolongées dans l'eau bouillante, ces corps deviennent inactifs.

Des poudres qui n'ont pas eu le contact de l'air au moment de leur formation, comme les précipités chimiques, les débris d'une lame batavique brisée sous l'eau dans un vase très-résistant, ne peuvent provoquer l'ébullition de l'eau surchauffée; mais si on les expose plus ou moins longtemps, dans l'air ou tout autre gaz, ces matières deviennent actives, et il en est de même des fils métalliques qu'on avait fait rougir.

Les corps non mouillés par le liquide, même débarrassés de toute couche gazeuse adhérente peuvent provoquer l'ébullition. Cela tient au dégagement, dans l'espace capillaire qui les sépare du liquide, de gaz provenant de ce dernier, qu'on n'en peut priver entièrement. Aussi, après plusieurs ébullitions, ces corps finissent-ils, comme tous les autres, par devenir inefficaces.

3° Le frottement d'un corps dur sur les parois baignées par le liquide surchauffé, suffit pour provoquer l'ébullition aux points frottés, comme l'a remarqué M. L. Dufour. M. Gernez a montré que le frottement agit en faisant sortir du liquide de petites bulles de gaz dissous : en appuyant la petite cloche

renversée et pleine de liquide, sur l'extrémité conique d'un tube de verre recourbé en crochet et bien purgé d'air, on voit les bulles de vapeur se détacher des surfaces en contact dès qu'on fait tourner la cloche sur elle-même; et après le refroidissement, on trouve une petite bulle de gaz dans la cloche.

1153. Conclusion. — Il résulte de tout ce qui précède que l'ébullition, qui ne peut se faire qu'à la température qui donne à la vapeur une tension égale à la pression extérieure, n'a lieu en réalité qu'à des températures supérieures et très-variables. La vapeur ne semble pouvoir se former qu'aux surfaces libres du liquide, soit au niveau, soit à l'intérieur des bulles de gaz qui se séparent de sa masse ou des corps solides qu'elle baigne. Ces gaz finissent par s'épuiser presque entièrement et alors le liquide peut être fortement surchauffé. Comme l'a remarqué M. Dove, personne n'a vu bouillir de l'eau complètement privée d'air, ce qui paraît impossible à obtenir. Morren a fait beaucoup de tentatives à ce sujet, sur des liquides soumis à une ébullition prolongée puis introduits bouillants dans la chambre d'un baromètre. Le vide fait autour de la cuvette ne pouvait faire descendre la colonne, mais quand on était parvenu à opérer une disjonction difficile, on voyait aussitôt apparaître une inévitable bulle de gaz. — Le mercure lui-même contient des gaz dissous : Morren ayant conservé pendant longtemps des gaz purs, dans la chambre de baromètres construits avec soin, les a toujours trouvés souillés d'autres gaz dégagés par le mercure. Si l'on pouvait débarrasser entièrement un liquide de gaz, il est probable qu'il se réduirait en vapeur dans toute sa masse en même temps, quand la température serait suffisante, comme dans certaines expériences de M. Cagniard de la Tour dont nous parlerons plus loin (1170).

Ces faits donnent l'explication de certaines explosions de chaudières à vapeur, dont l'eau finit par être privée de presque tout l'air dissous, quand l'alimentation, qui amène de l'eau aérée, est suspendue. M. L. Dufour propose, pour les éviter, de faire dégager du gaz hydrogène dans l'eau, au moyen d'un courant électrique (1151). On a proposé aussi de déposer dans la chaudière des fragments de zinc sur lesquels il se produit un dégagement lent d'hydrogène, qui suffit pour que l'ébullition se fasse régulièrement.

1154. Comparaison au dégagement des gaz dissous. — Gay-Lussac avait remarqué que les dissolutions gazeuses sursaturées par diminution de pression, et qui avaient cessé de dégager du gaz, en dégagent de nouveau au contact d'un corps solide. Comme dans le cas de l'ébullition, il attribuait cet effet aux aspérités. Schœnbein puis Gmelin l'ont attribué, au moins en partie, à l'air apporté par le corps plongé, mais sans comprendre le véritable rôle de cet air.

M. Gernez a fait de nombreuses expériences sur ce sujet¹. Il commence par prouver que les dissolutions sursaturées, obtenues, soit par réchauffement, soit par diminution de pression, ne laissent pas dégager de bulles de gaz dans un

¹ *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 2^e série, t. IV, p. 311.

vase bien débarrassé d'air adhérent. Il prouve ensuite que les solides qui provoquent le dégagement des bulles gazeuses agissent par l'air qu'ils apportent. Si on les en a débarrassés par la chaleur, ou le séjour dans un liquide, ils perdent leur efficacité, et ils la reprennent après avoir eu plus ou moins longtemps le contact d'un gaz. Les corps qui n'ont jamais subi ce contact sont inactifs. Par exemple, un cristal formé dans une dissolution d'alun, au moyen d'un fil inactif apportant une parcelle de sel, n'excite pas le dégagement de l'acide carbonique dans une couche d'eau de seltz superposée; et l'effet d'une larme batavique brisée est tout aussi nul dans l'eau de seltz que dans l'eau pure surchauffée (1152).

Voici comment M. Gernez rend compte du rôle des gaz apportés par les surfaces solides, et surtout par les corps poreux. Le gaz superficiel forme au contact du liquide une mince atmosphère dans laquelle le gaz dissous tend à se répandre, comme dans le vide (I, 459), et il forme de petites bulles qui adhèrent d'abord au corps solide et finissent par être détachées par la poussée du liquide quand leur volume est assez grand. Avec une petite cloche pleine de gaz, cet effet devient évident. Il a encore lieu quand le gaz qu'elle contient est le même que celui qui est dissous, si la pression dans la cloche est moindre que celle sous laquelle a été faite la dissolution; seulement, le dégagement des bulles est plus lent.

Il résulte de là que le dégagement du gaz ne peut se faire que par la surface libre, comme M. Gernez l'a en effet constaté, même dans le vide le plus parfait, sur une dissolution d'acide carbonique à 3 atmosphères. On voit aussi pourquoi, dans les expériences de M. L. Dufour (1151), les gouttes liquides enveloppées d'un autre liquide n'ont pas besoin d'être privées d'air, ce gaz ne pouvant s'en séparer que par le contact d'un corps solide.

1155. INFLUENCE DU VASE. — Gay-Lussac a reconnu que l'eau bout à une température plus élevée, quelquefois de 1°, dans un vase de verre que dans un vase de métal; la différence dépendant de la nature du verre et de l'état de sa surface. Gay-Lussac expliquait ce résultat par l'adhérence des molécules liquides au verre, adhérence qui les empêcherait de quitter sa surface pour prendre l'état gazeux. L'ébullition se fait péniblement dans un vase de verre; les bulles grosses, peu nombreuses, ne partent que d'un petit nombre de points; tandis que dans un vase de métal, elles sont plus petites, partent d'un grand nombre de points, et le thermomètre n'éprouve plus de fluctuations sensibles. Si l'on jette dans de l'eau dont l'ébullition vient de s'arrêter dans un vase de verre, un peu de limaille métallique, l'ébullition reprend aussitôt, mais elle cesse un instant après, à cause de l'abaissement de température résultant de la chaleur emportée par la vapeur qui s'est formée. Du verre en poudre produit un effet semblable, mais moins prononcé; ce qu'on attribuait à l'adhérence de l'eau aux parois vitreuses.

Ces effets sont bien plus prononcés avec l'acide sulfurique. La température de ce liquide s'élève au-dessus du point d'ébullition, puis une bulle se détache, grossit énormément, à cause de la chaleur qu'elle trouve accumulée, et vient crever à la surface, en soulevant la masse liquide qui, en retombant, imprime

une secousse qui peut briser le vase. Ces *soubresauts* sont surtout à redouter dans les fabriques où l'on concentre l'acide sulfurique dans de grandes cornues de verre. On peut les éviter en mettant au fond des cornues, suivant le précepte de Gay-Lussac, de petits fragments de fil de platine, sur lesquels les bulles de vapeur prennent naissance avec régularité; mais leur efficacité ne dure qu'un certain temps. On évite encore les *soubresauts* en chauffant les cornues par le pourtour, au lieu de les chauffer par le fond.

Expériences de M. Marcet¹. — M. Marcet, qui a fait une étude suivie de ces phénomènes, a vu la température d'ébullition descendre à 99°,7 dans un vase enduit intérieurement d'une mince couche de soufre ou de gomme laque. Dans des vases de verre en apparence identiques, il peut y avoir une différence de 8°,85 dans la température d'ébullition de l'eau. A 100°,4, il n'y a pas de *soubresauts*, tandis qu'à 101°,25 il s'en produit, et la température oscille de 0°,1 à 0°,25, et d'autant plus que les *soubresauts* sont plus violents.

Quand on a laissé séjourner de l'acide sulfurique ou de la potasse caustique dans un ballon neuf dans lequel l'eau bout à 101°, la température d'ébullition s'élève à 105°, et même à 106°, après qu'on a lavé le ballon avec le soin le plus scrupuleux. Les bulles de vapeur ne partent que de quelques points, et à chaque bouffée le thermomètre descend de quelques dixièmes de degré, pour remonter aussitôt. Le ballon était chauffé dans un bain d'huile; une parcelle de limaille de fer rendait l'ébullition régulière, et la température redescendait à 100°. L'alcool donne les mêmes résultats que l'eau.

M. Marcet expliquait ces phénomènes par l'existence dans les ballons neufs de poussières adhérentes que l'acide sulfurique et la potasse détruiraient. Les ballons de verre vert en sont tellement recouverts que l'ébullition s'y fait presque aussi facilement que dans un vase métallique, mais vient-on à détruire ces poussières, soit en frottant l'intérieur avec du papier mouillé, soit en portant le ballon à la chaleur rouge, l'ébullition ne se fait plus que de 103 à 105 degrés.

Aujourd'hui que l'on connaît le rôle des bulles gazeuses dans l'ébullition, tous ces faits s'expliquent facilement. Les fils métalliques apportent de l'air, le soufre, la gomme laque se comportent comme des corps non mouillés; les lavages, la chaleur rouge chassent l'air adhérent de la surface des ballons, etc.

1156. Liquides sur les surfaces très-chaudes. — Quand on projette de l'eau goutte à goutte dans un vase incandescent, ce liquide s'arrondit sur son contour, comme une masse de mercure sur du verre, reste limpide sans aucune apparence d'ébullition, et s'évapore plus ou moins rapidement pour ne disparaître qu'au bout d'un temps assez long. L'expérience se fait dans des capsules de métal, porcelaine, verre. De l'eau sur le cuivre en fusion, sur la loupe de fer, s'arrondit de même sans bouillir et ne mouille plus le solide sur lequel elle s'appuie.

Eller paraît avoir le premier observé ces phénomènes curieux, vers 1746. Leidenfrost les étudia dix ans après, ce qui a fait désigner l'expérience sous le

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. V, p. 449.

nom d'expérience de *Leidenfrost*. Deslandes, à Saint-Gobain, vit 2 décilitres d'eau s'arrondir sur le verre en fusion, et ne s'évaporer qu'avec lenteur; d'où il avait conclu, à tort, que l'air était nécessaire à la vaporisation, et prêtait, pour ainsi dire, des ailes à la vapeur. Les verriers portent la masse de verre incandescente qu'ils tiennent au bout d'un tube de fer, dans une auge de bois remplie d'eau, où ils l'arrondissent en la faisant tourner sur le fond; l'eau ne mouille pas le verre, et il n'y a pas de vaporisation violente.

Klaproth a aussi étudié ce phénomène. Rumfort a reconnu qu'il pouvait se produire à une température beaucoup plus basse qu'on ne l'avait cru jusqu'alors; car il a vu l'eau s'arrondir à la température ordinaire dans une cuiller couverte de noir de fumée. Ayant chauffé la cuiller jusqu'à la rendre brûlante, il reconnut que la température de l'eau s'était à peine élevée.

Pour évaluer la température du liquide, M. Baudrimont a employé la méthode des mélanges, en le versant dans l'eau du calorimètre¹. Il constata que si l'on met de l'eau bouillante dans le vase incandescent, elle retombe à la température qu'elle eût prise si elle y eût été versée froide. Du reste, l'évaporation est d'autant plus rapide que la température du vase est plus élevée, contrairement à l'opinion de Klaproth.

M. Baudrimont a aussi opéré sur l'acide sulfurique, l'alcool, l'esprit de bois, l'éther, l'essence de térébenthine, le sulfure de carbone; il a reconnu que la limite inférieure de température du vase, pour laquelle le liquide s'arrondit est d'autant plus basse que le point d'ébullition est lui-même plus bas. Ayant projeté de l'acide sulfurique étendu, dans une capsule de platine maintenue à une température peu supérieure à la limite qui convient à ce liquide, il vit bientôt l'ébullition se produire, parce que, le liquide se concentrant, son point d'ébullition s'éleva assez pour qu'il pût mouiller le platine. La limite est au-dessous du rouge pour l'eau et les liquides plus volatils. Les liquides inflammables donnent souvent une flamme à l'ouverture du creuset, sans que la forme globulaire disparaisse; seulement l'évaporation est plus rapide.

Ce qui précède montre pourquoi les dissolutions salines sont plus efficaces que l'eau pure pour tremper l'acier: au premier moment, l'acier n'est pas mouillé, et le liquide en est séparé par une enveloppe de vapeur. Ce n'est qu'après que l'acier s'est refroidi suffisamment que le contact s'établit et que la trempe s'opère; et cela se fait à une température plus élevée dans l'eau salée que dans l'eau pure.

Dans ces expériences, on peut remplacer le corps solide par un liquide très-chaud, comme Bellani l'a prouvé, dès 1808. Une goutte d'eau reste sur de l'essence de térébenthine très-chaude, quoique plus dense qu'elle. M. Boutigny a maintenu de l'eau, de l'alcool, de l'éther sur de l'acide sulfurique presque bouillant. Avec certaines précautions, il a pu empiler ainsi plusieurs liquides les uns sur les autres. M. Choron a vu prendre la forme globulaire à de l'éther projeté sur l'eau, l'huile, l'acide nitrique fumant, portés à 54° au moins.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXI, p. 349.

Cas de grandes masses liquides. — Pouillet a pu remplir un grand creuset de platine rouge-blanc entièrement d'eau, et l'y conserver pendant des heures sans que son poids diminuât notablement. En 1827, J. Perkins vit l'eau, dans des cylindres de bronze portés au rouge, refuser de passer à travers une fente accidentelle de la partie inférieure, malgré la pression du liquide, qui était assez grande; le cylindre avait 20 centimètres de diamètre. La vapeur agissant de tous les côtés sur la masse d'eau séparée des parois qu'elle ne mouillait pas, ne produisait pas de pression. Perkins ayant adapté un tube de fer muni d'un robinet, à une petite chaudière à vapeur, la fit rougir et y introduisit de l'eau; la vapeur s'échappa avec violence par une soupape de sûreté chargée à 50 atmos-

phères, et pas une goutte d'eau ne pénétra dans le tube, dont le robinet restait ouvert. L'appareil s'étant ensuite refroidi, la vapeur se produisit tout à coup avec un mugissement épouvantable.

On produit une sorte d'explosion au moyen de l'appareil de M. Boutigny (fig. 810). Un ballon de cuivre à parois épaisses, dont l'ouverture *t* est fermée par un bouchon, est chauffé au moyen d'une lampe à alcool. On y introduit de l'eau avec une pipette, par l'orifice *o* que l'on ferme ensuite au moyen du levier *l* sur lequel on appuie. On éteint la flamme, et dès que la température est descendue à 140° environ, la vapeur se forme subitement, et le bouchon est lancé avec explosion.

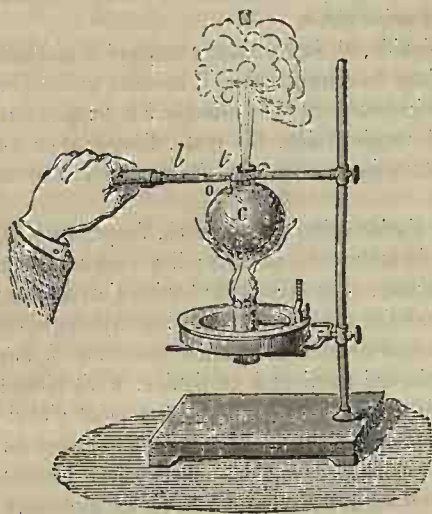


Fig. 810. — 1/10.

1157. Mouvements du globule. — Le globule formé sur une surface chaude, tantôt reste en repos, tantôt éprouve des mouvements, étudiés particulièrement par Laurent¹, et présente, en oscillant dans ses différentes parties, la forme d'une étoile ayant toujours un nombre pair de dents (fig. 811), et tournant rapidement sur elle-même. Cette apparence est due aux oscillations du globule, qui est refoulé par la vapeur qui s'échappe en dessous et vibre par son élasticité de cohésion, en prenant alternativement les formes A et B. Le nombre des dents dépend du nombre de points refoulés, et la symétrie de forme du globule amène naturellement les mouvements à se faire suivant des subdivisions régulières. Comme ces mouvements se font alternativement en sens opposé en chaque point,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXXIV, p. 19.

on croit voir un nombre pair de dents. Quand le globule est large, les dents sont nombreuses, en plusieurs rangs, et forment une rosace, C (fig. 811), dont toutes les parties oscillent vivement.

1158. Expériences de M. Boutigny. — M. Boutigny a publié, en 1842, une série d'expériences ingénieuses, dans lesquelles il a varié de toutes façons les circonstances des phénomènes, qu'il a désignés sous le nom de *phénomènes de caléfaction*¹. Il a trouvé la limite inférieure de température d'un vase métallique, pour que le liquide s'arrange en globule, à 142°, 134°, 61°, pour l'eau, l'alcool absolu et l'éther. La limite est donc d'autant plus basse que le liquide est plus volatil, comme M. Baudrimont l'avait déjà constaté. M. Boutigny a trouvé

que la température du liquide est sensiblement indépendante de celle du vase, et il a confirmé le fait de l'accroissement de l'évaporation avec la température.

Les expériences se font facilement en mettant une capsule de cuivre dans la flamme d'un éolipyle à jet vertical (fig. 812) : une lampe à alcool fait bouillir de l'alcool contenu dans un vase annulaire aa.

La vapeur sortant par le

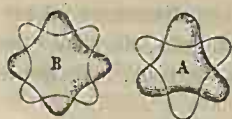


Fig. 811.

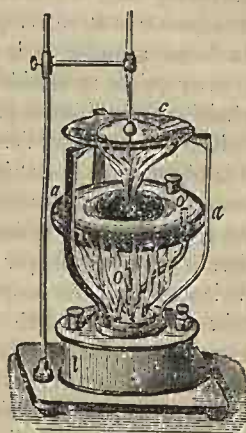


Fig. 812. — 1/10.

tube recourbé o'o s'enflamme et vient frapper la capsule c, qui ne tarde pas à rougir.

Voici une des expériences les plus remarquables de M. Boutigny. On verse de l'acide sulfureux anhydre, qui bout à -10° , dans un creuset incandescent; il y prend la forme globulaire en restant au-dessous de son point d'ébullition; et, si l'on y plonge un petit matras rempli d'eau; l'eau se congèle. Quelques gouttes d'eau versées sur l'acide sulfureux se congèlent de même. On forme donc de la glace au fond d'un vase, quoiqu'il soit incandescent.

Faraday a congelé le mercure au milieu d'un mélange d'éther et d'acide carbonique solide qui avait pris la forme globulaire dans un creuset ardent. Il versa d'abord l'éther, puis l'acide solide, et y plongea ensuite une petite capsule de métal, contenant 31 grammes de mercure, qui furent congelés au bout de 2 à 3 secondes. Ici, nous avons un globule qui est probablement à une température de 100° au-dessous de zéro.

¹ Nouvelle branche de physique, ou Étude sur les corps à l'état sphéroïdal, etc.

1159. Théorie de ces phénomènes. — Pour expliquer ces phénomènes, on commence par prouver qu'il y a absence de contact entre le liquide et la surface chaude. M. Boutigny ayant préparé un globule d'eau rendu opaque par du noir de fumée, sur une plaque horizontale d'argent portée au rouge, a pu apercevoir la flamme d'une bougie entre la surface inférieure du globule et la plaque. MM. Warkmann, Poggendorff,..... ont, en outre, reconnu qu'un *courant électrique* ne peut passer du globule dans le métal, ce qui montre qu'il y a séparation. — M. Buff a contesté ce fait et a trouvé que le courant traverse quand le globule liquide est assez gros, et il explique le passage de la lumière sous ce globule, par des oscillations qu'il éprouverait sous l'influence de la vapeur interposée. Mais la transmission du courant peut très-bien avoir lieu à travers un espace très-étroit rempli de vapeur, si ce courant est suffisamment intense. La forme arrondie de la masse liquide sur ses angles suffit, du reste, pour prouver qu'elle ne mouille pas le vase. Quand celui-ci se refroidit, le contact se rétablit et l'ébullition se produit tumultueusement.

Il reste à expliquer l'absence de contact. Déjà Musschenbroeck avait invoqué « la répulsion de la matière du feu qui s'échappe des parois du vase. » Nous savons qu'un liquide cesse de mouiller une surface, quand sa cohésion propre est plus grande que le double de sa cohésion pour le solide (I, 300). Or, cette dernière est diminuée par la chaleur; un liquide qui mouille le verre cesse même de le mouiller à une température suffisamment élevée, et est déprimé dans un tube capillaire (I, 325). Alors, non-seulement il n'y a plus contact, mais encore il y a répulsion. M. Boutigny démontre l'existence de cette répulsion par des expériences curieuses : 1° On plonge dans l'eau une grosse balle de cuivre incandescente, et l'on voit facilement que le liquide ne la touche pas; 2° On verse quelques gouttes d'eau dans un panier en fils de platine incandescent, ou dans une capsule criblée de trous très-fins et très-serrés, et l'eau ne tombe pas par les ouvertures; 3° On imprime un mouvement rapide de rotation, comme à une fronde, à une capsule incandescente contenant un liquide; la force centrifuge ne peut produire le contact, et ce n'est qu'après que la capsule s'est refroidie, que la vaporisation a lieu, et que l'on voit apparaître une couronne de vapeur.

Une fois le contact détruit, la vapeur qui se forme à la surface inférieure du liquide concourt à l'écarter des parois du vase, et, en s'échappant inégalement sur le pourtour, produit les mouvements cités plus haut (1157). Si le fond de la capsule est convexe, les bulles de vapeur s'échappent à travers le globule. Cette vapeur peut même soutenir sur l'eau une coupe d'argent incandescente, assez lourde pour aller au fond quand elle est froide. La tension de la vapeur entre la surface chaude et le liquide est égale à la pression atmosphérique augmentée d'une colonne du même liquide ayant pour hauteur l'épaisseur du globule. En effet, Person ayant introduit, à travers le liquide jusqu'au fond du vase, la pointe effilée d'un tube recourbé en S, dont la courbure inférieure contenait de ce liquide, la vapeur entrant par l'extrémité effilée produisit une différence de niveau égale à l'épaisseur du globule.

Nous ajouterons que la vapeur interposée semble elle-même éprouver une répulsion de la part de la surface rouge : en effet, M. Boutigny a reconnu qu'une capsule d'argent ou de cuivre incandescente n'est pas attaquée par l'acide azotique; une capsule de fer, de zinc, par l'acide sulfurique; l'acide sulfurique bouillant, par l'eau superposée. Il est facile de concevoir que le liquide, qui ne touche pas la surface, ne l'attaque pas; mais la vapeur qui les sépare exercerait son action chimique, si elle n'éprouvait pas elle-même une répulsion qui empêche le contact.

Mode d'échauffement du globule. — Une fois l'absence de contact établie, il reste à montrer pourquoi le globule ne peut bouillir. D'abord, la chaleur ne lui arrive que sous forme de rayons émis par la surface chaude; une portion de ces rayons est réfléchi, l'autre pénètre; mais, comme le liquide est diathermane, elle le traverse en partie sans être absorbée, et en proportion d'autant plus grande que la température est plus élevée (875). Le liquide s'échauffe donc difficilement, et comme la chaleur lui est enlevée rapidement par l'évaporation, surtout s'il est très-volatil, sa température s'élève d'autant moins que son point d'ébullition est plus bas. Pouillet et Laurent ayant mêlé à l'eau, de l'encre ou des parcelles de charbon, les rayons furent rapidement absorbés par les matières en suspension, et l'évaporation fut beaucoup plus rapide. Si le mercure bout dans un vase de verre, qu'il ne mouille pas, c'est qu'il est *athermane* et très-peu volatil. — Remarquons, enfin, avec M. Armstrong, que la chaleur rayonnée sur la surface inférieure du liquide est employée presque totalement à y produire une évaporation abondante. Si l'on plonge un lingot de platine incandescent dans de l'eau froide, il n'y a pas de dégagement de vapeur, celle qui se produit se condensant au contact du liquide. Si l'eau est à 100°, l'ébullition continue.

Nous voyons donc que les phénomènes qui se passent dans les vases incandescents s'expliquent naturellement et ne mettent nullement en défaut les théories actuelles de la chaleur. Cependant, M. Boutigny a cru devoir, pour les expliquer, admettre un quatrième état des corps, qu'il nomme *état sphéroïdal*, et sous lequel ils manifesteraient des propriétés particulières. Alors, le mercure serait à l'état sphéroïdal à la température ordinaire dans des vases de verre, de fer...; l'eau, dans des vases revêtus de noir de fumée, sur les surfaces grasses, sur les feuilles de certaines plantes. Tous ces phénomènes dépendent simplement du rapport entre la cohésion propre du liquide et sa cohésion pour la matière du vase; la chaleur modifie ce rapport en diminuant la dernière, et quand celle-ci est moindre que le double de la cohésion propre du liquide, il n'y a plus contact (I, 300), et la chaleur ne pénètre plus que lentement dans le liquide. Le seul fait qui semble difficile à expliquer, c'est que, dans les vases incandescents, l'ébullition ne se fait pas dans le vide. M. Boutigny l'a constaté sur l'acide sulfureux même, en prenant la précaution d'entourer la capsule, de bioxyde de plomb sec, pour absorber les vapeurs produites. Mais il faut remarquer que dans le vide l'évaporation est très-rapide (1137), et enlève par conséquent beaucoup de chaleur au liquide. Nous avons vu, en outre (1153), que l'ébullition

ne peut se faire même sous une pression très-faible et à une haute température, dans un liquide dont on a chassé l'air. Or, un liquide contenu dans un vase incandescent doit perdre très-rapidement l'air dissous, surtout dans le vide.

1160. Incombustibilité momentanée des tissus vivants. — Les phénomènes qui viennent de nous occuper donnent la clef de certains faits merveilleux qui paraissent d'abord inexplicables. Ainsi, il est constant qu'on peut impunément plonger, pendant un temps très-court, la main dans du plomb, du cuivre, de la fonte en fusion; soulever un fer rouge, passer la langue sur sa surface sans se brûler, pourvu qu'il soit bien incandescent. On peut encore malaxer avec les mains une masse de verre en fusion plongée dans l'eau. Ces faits, bien connus des fondeurs, étaient généralement contestés, lorsque M. Boutigny est venu les vérifier sur lui-même. On voit dans une lettre écrite en 1808 à M. Tilloch¹, le détail de faits de cette nature, et, à la suite, l'explication tirée de la comparaison avec ce qui se passe dans un globule d'eau sur un corps chaud, explication développée ainsi par M. Boutigny : la surface de la peau est toujours humide, surtout sous l'influence de l'appréhension qu'on éprouve au moment de tenter l'expérience, et il n'y a pas contact entre la peau et le corps chaud. Il vaut mieux, du reste, mouiller la main avec de l'eau ou de l'éther. Si le métal en fusion est incandescent, on peut ressentir, par l'effet du rayonnement, une vive impression dans les parties non immergées voisines de la surface du liquide. Il est évident qu'il ne faut prolonger l'épreuve que pendant un temps très-court; il ne faudrait pas cependant, comme le remarque M. Boutigny, aller trop vite, car alors le choc de la main contre le métal en fusion pourrait déterminer le contact.

Nous avons vu que l'éther prend la forme globulaire sur l'eau à 100°; M. Légal en a conclu qu'en mouillant sa main avec de l'éther, il pourrait impunément la plonger dans l'eau bouillante; ce que l'expérience a confirmé.

1161. INFLUENCE DES SELS DISSOUS, SUR L'ÉBULLITION. — La température d'ébullition n'est pas modifiée par les substances en suspension dans les liquides; mais elle l'est par celles qui sont combinées ou en dissolution. Si l'on dissout dans un liquide un autre liquide plus volatil, par exemple de l'alcool dans l'eau, le point d'ébullition est abaissé, et d'autant plus qu'il y a plus de liquide volatil. Le contraire a lieu quand le liquide combiné est moins volatil; par exemple, quand on mêle de l'acide sulfurique à l'eau. La vapeur produite est tantôt un mélange des vapeurs des deux liquides, tantôt une combinaison définie. Nous reviendrons sur ce sujet (1163).

Dissolutions salines. — Les sels dissous élèvent toujours le point d'ébullition de l'eau, et d'autant plus qu'il y a plus de sel. Par exemple, de l'eau contenant 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 de sel marin, bout à 101°,5; 103°,5; 105°,5 et 108°. M. Legrand, qui a étudié cette question en détail, a vu la température des dissolutions non saturées s'élever peu à peu à mesure qu'elles se concentraient par l'évaporation, pour devenir fixes quand elles arrivaient à saturation. En

¹ Bibliothèque britannique (Sciences et arts), t. XLI, p. 392.

représentant les retards de l'ébullition par les ordonnées d'une courbe dont les abscisses représentaient les quantités de sel dissoutes dans 100 parties d'eau, il a trouvé deux classes générales de courbes : les unes n'ayant qu'un sens de courbure, tantôt convexe, tantôt concave vers l'axe des abscisses, et les autres ayant un point d'inflexion ; les ordonnées allant toujours en croissant. Du reste, la faculté de retarder le point d'ébullition ne dépend pas seulement de la solubilité, mais elle paraît due surtout à une affinité spéciale du sel pour l'eau.

On ne doit pas prendre pour point d'ébullition d'une dissolution saturée, la température au moment où le sel commence à se déposer, mais celle qui a lieu pendant qu'il se dépose. En effet, malgré l'agitation du liquide pendant l'ébullition, le point de saturation est dépassé et la température s'élève de plus en plus ; mais, dès que le dépôt du sel a commencé, cette température descend et ne varie plus. Par exemple, M. Legrand a vu une dissolution de carbonate de potasse atteindre 140°, sans déposer de sel ; puis, tout à coup, une grande effervescence se manifesta, accompagnée d'un dépôt abondant, la température descendit à 135°, et ne changea plus.

M. Legrand a encore remarqué que l'ébullition d'une dissolution saline dans des vases de verre est d'abord régulière, mais qu'elle se fait ensuite par soubresauts quand l'air dissous a été chassé. Des parcelles de métal, par exemple de zinc, lui rendent sa régularité. Il y a des sels qui, ajoutés, même en petite quantité, à l'eau, déterminent la production des soubresauts ; tel est le tartrate neutre de potasse. D'autres, au contraire, les empêchent.

Voici le tableau des principaux résultats trouvés par M. Legrand :

SELS EN DISSOLUTION	POIDS DE SEL dans 100 d'eau.	POINT d'ébullition.
Chlorure de sodium.....	41,2	108 ^o 4
— de potassium.....	59,4	108,3
— de barium.....	60,1	104,4
Carbonate de soude.....	48,5	104,63
Phosphate de soude.....	112,6	106,6
Chlorate de potasse.....	61,5	104,2.
Nitrate de soude.....	224,8	121,0
Nitrate d'ammoniaque.....	infini	180,0
Sel ammoniac.....	88,9	114,2
Chlorure de strontium.....	117,5	117,85
Chlorure de calcium.....	325,0	179,5
Tartrate neutre de potasse.....	296,2	114,67
Carbonate de potasse.....	205	135
Nitrate de chaux.....	362	151
Acétate de soude.....	209	124,37
Acétate de potasse.....	798,2	169

1162. Température de la vapeur des dissolutions. — Rudberg, à la suite d'expériences nombreuses, a trouvé que la vapeur fournie par une dissolution saline en ébullition possède la même température que si elle se dégagait de l'eau pure bouillant sous la même pression. Il semble cependant que la vapeur devrait, en quittant le liquide, en partager la température. M. Regnault, qui a fait une étude suivie de ce phénomène, a d'abord constaté, entre $0^m,057$ et $3^m,124$, que le résultat annoncé par Rudberg est vrai pour des pressions différentes de celle de l'atmosphère. La température de la vapeur a bien été un peu supérieure à celle qu'aurait donnée l'eau pure; mais les excès étaient si faibles qu'on pouvait les attribuer au rayonnement de la surface du liquide salé, et aux gouttelettes qu'il projetait en bouillant.

M. Regnault a ensuite expérimenté sur des dissolutions d'acide sulfurique assez faibles pour ne donner que de la vapeur d'eau. Le liquide était placé dans un ballon à large col surmonté de tubes rentrant les uns dans les autres comme dans l'hypsomètre (fig. 806), et soutenant un thermomètre qu'on pouvait ainsi placer à différentes distances du liquide. Il vit le thermomètre se recouvrir constamment d'une couche d'eau, et ne donner, par conséquent, que la température d'ébullition de l'eau pure qui l'enveloppait. Il a alors adapté au-dessus du réservoir, un disque mince de cuivre, pour recueillir l'eau qui ruisselle principalement de la tige, et un autre au-dessous de ce réservoir, pour le préserver du rayonnement du liquide et des gouttelettes qu'il projette. Quand alors l'instrument est placé à plus de 4^m de la surface du liquide, le réservoir est mouillé et le thermomètre indique la température d'ébullition de l'eau pure. Quand on abaisse le réservoir, il se dessèche, et la température monte, jusqu'à ce qu'il touche le liquide. M. Regnault conclut de là que la vapeur est en équilibre de température avec la dissolution bouillante, mais qu'elle se refroidit promptement par le rayonnement extérieur et surtout par l'évaporation des gouttelettes lancées par le liquide. Quant au thermomètre, il ne peut qu'indiquer la température d'ébullition de l'eau pure, à cause du liquide qui le mouille. Les résultats observés par Rudberg sont donc exacts, mais il fallait les interpréter.

Magnus est arrivé aux mêmes conclusions en opérant dans une étuve à double enveloppe, afin d'éviter le refroidissement du thermomètre, comme l'avait fait Faraday, en 1823, lorsqu'il voulut vérifier l'opinion identique de Gay-Lussac. Magnus, avec son appareil, a constamment trouvé la température de la vapeur supérieure à 100° ; cependant, elle a toujours été inférieure de quelques degrés à celle de la dissolution saline. La différence était d'autant plus grande que la température d'ébullition de celle-ci était plus élevée. Par exemple, pour une dissolution d'azotate de soude bouillant à 107° et 118° , les différences ont atteint $1^{\circ},4$ et $8^{\circ},5$.

1163. Point d'ébullition des mélanges liquides. — Quand on mélange deux liquides inégalement volatils, leurs points d'ébullition sont modifiés d'une manière qui dépend de l'action qu'ils peuvent exercer l'un sur l'autre. M. Regnault divise, à cet égard, les mélanges binaires en trois classes : 1^o Les

deux liquides ne se dissolvent pas mutuellement (eau avec le sulfure de carbone ou la benzine, le chlorure de carbone, l'essence de térébenthine); 2° les deux liquides se dissolvent mutuellement, mais sont employés en quantités telles qu'après la saturation réciproque il reste deux liquides séparés (eau et éther); 3° les deux liquides se dissolvent en quantité indéfinie, en formant un composé unique (*sulfure de carbone et éther* ou *chlorure de carbone, benzine et alcool*).

Dans les mélanges de la première classe, les résultats dépendent de l'activité avec laquelle on pousse l'ébullition, dont la température est généralement inférieure au point d'ébullition du liquide le plus volatil. Ce fait, constaté d'abord par Magnus, a été confirmé par M. Kundt sur le mélange d'eau et de sulfure de carbone qui, isolé, bout à 46°,6 : si, après avoir porté ce liquide à 45°, on le verse dans de l'eau à 46°, l'ébullition se fait et continue quand on agite, jusqu'à ce que la température soit descendue à 43°.

MM. I. Pierre et E. Puchot ont opéré sur 7 mélanges binaires formés d'eau et de divers alcools ou autres composés organiques¹. Ils ont toujours vu la température d'ébullition, inférieure à celle du liquide le plus volatil, rester constante, et les deux liquides recueillis être toujours dans un rapport constant (qui est autre que celui du mélange initial), jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un seul des deux liquides, lequel dépend de leur proportion initiale et de leur volatilité relative.

Les mélanges binaires de la troisième classe présentent le plus souvent une température d'ébullition aussi fixe que celle d'un liquide pur, quand leur composition ne change pas, les vapeurs condensées retournant au mélange. M. Regnault a constaté ce résultat sur des mélanges en poids égaux de divers liquides avec l'eau, et sous différentes pressions. M. Alluard est arrivé aux mêmes conclusions sur des mélanges de sulfure de carbone et d'éther ou d'alcool, et d'eau avec l'alcool; il opérât à la pression atmosphérique en faisant beaucoup varier les proportions des mélanges. Il a constaté que le point d'ébullition s'élève avec la proportion du liquide le moins volatil, et qu'un liquide qui contient quelques centièmes et même 0,1 d'un autre liquide plus ou moins volatil, bout à la même température que s'il était pur; il est donc impossible de les séparer, et le point d'ébullition ne peut servir de preuve de la pureté d'un liquide².

M. Berthelot a confirmé ce résultat sur des mélanges d'eau et d'alcool ou sulfure de carbone en diverses proportions, et il a trouvé que deux liquides neutres dont les points d'ébullition diffèrent de 20 à 30° étant mélangés de manière que le plus volatil ne soit que les 8 à 10 centièmes de l'autre, non-seulement ne se séparent pas, mais encore qu'il existe des proportions pour lesquelles la composition de la vapeur formée est la même que celle du mélange liquide.

1164. Applications des lois de l'ébullition. — On fait, dans l'industrie, des applications fréquentes des principes de l'ébullition, pour distiller les liquides, ou pour concentrer les dissolutions.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXVI, p. 145.

² *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. I, pp. 243 et 384.

Alambic. — Pour séparer l'eau des matières solides qu'elle tient en dissolution, ou plus généralement pour séparer d'un liquide les parties les plus volatiles, on emploie l'*alambic*. Cet appareil, dont l'invention est attribuée aux Arabes, a reçu depuis un demi-siècle de nombreux perfectionnements ayant pour objet d'accélérer l'opération et d'économiser le combustible. Sous sa forme la plus simple, il se compose de trois parties (fig. 813), la *cucurbite* *oC*, dans laquelle on introduit, par l'orifice *o*, le liquide que l'on veut *distiller*. Ce liquide est porté à l'ébullition, et la vapeur s'élève dans le *chapiteau* *nc*, et passe dans le serpentín, *S*, plongé dans l'eau froide du *réfrigérant* *RSr*. Là, cette vapeur se liquéfie, sa tension étant plus grande que le maximum qui correspond à la température du serpentín. Le liquide, ainsi régénéré, sort en *r*. — Comme l'eau du réfrigérant s'échauffe rapidement par la chaleur qu'abandonne la vapeur qui se condense, on la renouvelle en la faisant arriver d'une manière continue par

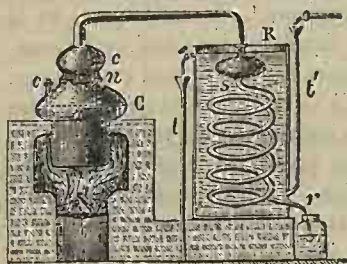


Fig. 813.

un tube *t'*, qui la conduit au fond du réfrigérant, pendant que l'eau chaude soulevée sort par un trop-plein qui la verse dans le tube *t*.

C'est avec l'*alambic* qu'on distille le vin pour en séparer l'alcool, qui, étant plus volatil que l'eau, distille en plus grande proportion. L'eau-de-vie, ainsi obtenue, étant distillée de nouveau, donne l'alcool du commerce.

Au moyen d'*alambics* spéciaux, on obtient sur les navires, de l'eau douce, en distillant l'eau de mer. Il résulte d'expériences de MM. Clément et de Freycinet, que l'eau ainsi obtenue ne coûte pas plus de 1 centime le litre, et que le charbon nécessaire à sa production n'occupe que $\frac{1}{3}$ de l'espace qu'elle occuperait, et ne pèse que $\frac{1}{2}$ de son poids. Un grand nombre de sujets, soumis au régime exclusif de cette eau, s'en sont trouvés aussi bien que de l'eau douce naturelle.

Concentrations. — Quand on ne veut pas recueillir le liquide réduit en vapeur, par exemple quand on veut concentrer une dissolution, on emploie divers moyens. On peut opérer à la température ordinaire en accélérant l'évaporation par un courant d'air, comme dans les *bâtiments de graduation* des salines : on fait tomber l'eau salée à la partie supérieure d'une espèce de mur construit avec des fagots, et perpendiculaire à la direction habituelle du vent. Le liquide, disséminé à travers le menu branchage, présente à l'air une grande surface par laquelle il s'évapore rapidement.

Quand on emploie la chaleur et qu'on ne veut pas dépasser une certaine température, on fait le vide au-dessus des chaudières de concentration, tantôt en chassant l'air par la vapeur même et fermant ensuite toutes les ouvertures, tantôt au moyen de machines pneumatiques. L'ébullition se fait alors à une température inférieure à 100°. La vapeur est condensée dans des réfrigérants,

et le liquide régénéré se rend dans un vase fermé, d'où on l'extrait de temps en temps. Cette méthode est appliquée en grand dans les raffineries de sucre, pour concentrer les sirops.

IV. Liquéfaction des vapeurs et des gaz.

1165. Quand une vapeur sature un espace, on peut, pour la liquéfier, employer deux moyens : le refroidissement ou la compression. Les corps qui se présentent habituellement à l'état gazeux doivent être considérés comme des vapeurs très-éloignées du point de saturation. On pourra donc les liquéfier en les amenant d'abord à ce point, par un refroidissement suffisant, ou par une grande compression, ou enfin par ces deux moyens réunis. Il y a des gaz qui se liquéfient facilement, comme l'acide sulfureux, qu'il suffit de porter à -10° , sous la pression de 760^{mm}. L'acide hypoazotique peut être considéré comme à la limite des gaz et des liquides ; car il se liquéfie à $+28$ degrés.

Le premier gaz qui ait été liquéfié est le gaz ammoniac. Van-Marum ayant comprimé de l'air autour d'une éprouvette remplie de ce gaz et reposant sur le mercure, vit ce liquide monter peu à peu, puis tout à coup remplir complètement l'éprouvette. Le même gaz a été condensé en quantité notable, par Guyton de Morveau, en 1799, au moyen d'un froid de -50° . L'acide sulfureux a été liquéfié par Monge et Clouet, en le faisant arriver sec dans un vase à -10° .

En 1823, Davy et Faraday ont liquéfié le chlore et quelques autres gaz, par une méthode très-simple¹ : on introduit dans un tube de verre épais courbé en forme d'U, les matières qui, mélangées et chauffées, doivent produire les gaz. Ces matières étant rassemblées à l'une des extrémités, qui est bouchée, on ferme l'autre à la lampe et on la plonge dans un mélange réfrigérant. On chauffe ensuite l'extrémité opposée, le gaz se dégage, sa pression augmente, et il se condense à l'état liquide à l'extrémité refroidie.

Quand les matières mélangées réagissent à la température ordinaire, comme on ne pourrait fermer le tube, à cause de l'expansion du gaz qui écarterait les parties ramollies du verre, on met une des substances dans une petite nacelle de platine, qui repose sur l'autre, et qu'on renverse par des secousses quand on veut faire dégager le gaz. On peut encore employer un tube recourbé comme en *abcd* (fig. 814) ; les matières sont séparées en *b* et *c*, et après avoir fermé les extrémités *a* et *d*, on renverse le tube, *a'd'*, en faisant tout passer dans la même

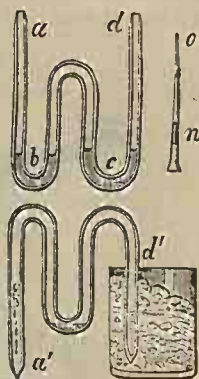


Fig. 814.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXII, p. 323.

extrémité. Pour mesurer la pression du gaz, Faraday introduisait dans le tube, un petit manomètre à air formé d'un tube effilé *no*, dans la partie moyenne duquel était engagée une bulle de mercure, dont la position, indiquait la pression.

Pour obtenir approximativement le poids spécifique du liquide formé, M. Davis Guilbert renferme dans le tube, de petites ampoules de verre, de densités différentes; le liquide a la densité de celle qui flotte au milieu de sa masse.

Dans les cours, on montre la liquéfaction du gaz ammoniac au moyen d'un tube courbe de Faraday préparé d'avance, et contenant une grande quantité de ce gaz condensé dans du chlorure d'argent, dont on l'expulse par la chaleur. Après le refroidissement, le chlorure absorbe de nouveau l'ammoniaque, qui se volatilise spontanément.

M. Melsens fait absorber les gaz qu'il veut liquéfier, par du charbon introduit rapidement dans un tube de Faraday, *bn* (fig. 815), effilé aux deux bouts et à travers lequel on fait passer le gaz sec, après quoi on ferme les deux extrémités à la lampe. On enveloppe ensuite la branche qui contient le charbon, d'un manchon *m* dans lequel on fait bouillir de l'eau, et le gaz chassé du charbon va se liquéfier en *b*, qui est entouré d'un mélange réfrigérant. Après l'expérience, quand tout l'appareil est revenu à la température ambiante, le liquide formé entre en ébullition, et le gaz est de nouveau absorbé par le charbon.

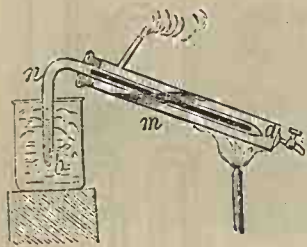


Fig. 815.

Pouillet a liquéfié plusieurs gaz au moyen de l'appareil qui lui a servi à comparer les compressibilités des gaz (I, 379). Il a pu ainsi connaître exactement la pression sous laquelle se fait la liquéfaction. L'acide carbonique s'est liquéfié sous 45 atmosphères, le protoxyde d'azote, l'ammoniaque, et l'acide sulfureux sous 43; 5 et 2,5 atmosphères, la température étant de 10° environ.

1166. Liquéfaction et solidification de l'acide carbonique. — On n'avait liquéfié les gaz qu'en petites quantités, et aucun n'avait pu être solidifié, lorsque Thilorier, en 1835, excita une admiration générale en liquéfiant et congelant de grandes quantités d'acide carbonique. L'appareil de Thilorier consiste en un vase de fonte *V*, de 6 à 7 litres (fig. 816), mobile autour d'un axe *oo'*; on introduit du bicarbonate de soude (1800gr), de l'eau à 35 ou 40° (4,5 litres), et l'on remplit d'acide sulfurique (1000gr) l'éprouvette de cuivre *c*, puis on ferme l'ouverture du réservoir au moyen d'un bouchon à vis garni de plomb. On fait ensuite tourner ce réservoir autour de *oo'*; l'acide sulfurique se répand sur le bicarbonate de soude, et l'acide carbonique se dégage. On reçoit ce gaz dans un second vase *R*, dans lequel il passe par un tube de cuivre, *t*, ajusté au moyen d'érous roulants. En *r* et en *r'* sont des fermetures qui doivent retenir le gaz

sous les plus fortes pressions : Une vis r' terminée par une pointe conique ou hémisphérique garnie de plomb, s'applique exactement quand on l'enfonce, sur l'orifice du conduit par lequel passe le gaz. L'acide carbonique se liquéfie dans le récipient R, qui est plus froid que le réservoir V, où la température est au moins de 30° . Si elle était de 15° en R, la tension du gaz y serait de 50 atmosphères. Quand le bicarbonate de soude a dégagé tout l'acide carbonique qu'il contenait, on ferme le robinet r , et l'on charge de nouvelles substances, le réservoir V. En répétant cette opération cinq ou six fois, on peut obtenir deux litres d'acide carbonique liquide.

L'appareil de Thilorier devant supporter des pressions énormes, la fonte avec laquelle on le construisait d'abord n'offre pas une sécurité suffisante. A l'École

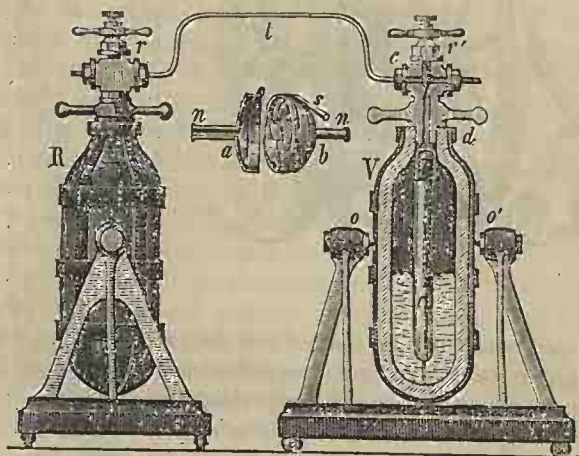


Fig. 816.

de pharmacie de Paris, un appareil éclata et emporta les jambes au préparateur, M. Hery. — MM. Mareska et Donny ont alors imaginé une disposition avec laquelle on obtient une résistance très-grande. Un vase de plomb est appliqué exactement dans l'intérieur d'un vase de cuivre, maintenu par des cercles de fer forgé juxtaposés. Les deux fonds sont soutenus par des plaques de fer reliées au moyen de barres de même métal. De semblables vases peuvent résister à des pressions de plus de 1000 atmosphères, et dans les expériences sur l'acide carbonique, on ne va pas au delà de 150.

M. Deleuil est parvenu à consolider les récipients de fonte, au moyen de cercles épais en fer forgé se croisant avec des bandes de même métal, qui enveloppent tout l'appareil d'une sorte de réseau capable d'une énorme résistance, R (fig. 816). Chaque récipient est monté sur des roues (fig. 817) au

moyen desquelles on le transporte facilement malgré son poids, après y avoir adapté un brancard que l'on dispose comme on le voit dans la figure 817.

Quand on veut recueillir l'acide carbonique liquide, on incline convenablement le récipient R, et l'on ouvre le robinet *r*; le liquide est projeté avec force dans le

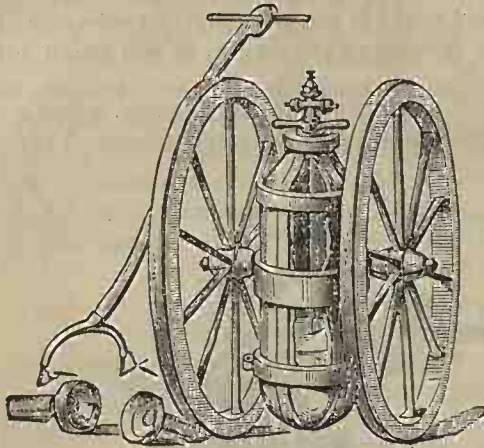


Fig. 817.

jet dans une boîte cylindrique composée de deux parties *a* et *b* (fig. 816), pouvant s'adapter l'une à l'autre. Le gaz arrive tangentiellement par un tube *s*, et rencontre, à son entrée, une petite lame oblique qui lui fait prendre un mouvement de rotation, de manière que les parcelles solides se rassemblent en une

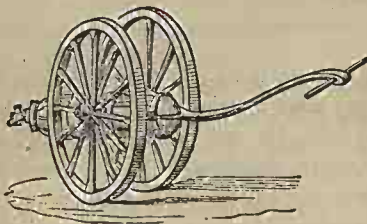


Fig. 818.

masse spongieuse. Des tubes *n*, *n* entourés d'étoffes pour poser les mains, font communiquer l'intérieur de la boîte avec l'atmosphère. Un thermomètre placé dans le jet d'acide carbonique descend jusqu'à -93° .

L'acide carbonique neigeux se volatilise lentement à l'air, ce qui tient à la chaleur latente enlevée par les parties qui passent à l'état gazeux, et à sa mauvaise conductibilité. Placé sur un corps poli, il fuit la main

qu'on en approche, à cause de la réaction du gaz dégagé du côté de la main qui lui fournit de la chaleur. Posé sur la peau, il ne produit pas de sensation bien vive de froid; c'est qu'il en est séparé par l'atmosphère de gaz qui se dégage. Mais si l'on établit le contact en appuyant dessus, on éprouve une

vase où on le reçoit. Là, ce liquide s'évapore, l'absorption de chaleur le refroidit jusqu'à -70° , et une partie peut se solidifier.

Un jet de gaz carbonique, sortant sous une pression de 30 ou 40 atmosphères, se refroidit tellement en arrivant à l'air libre, par la dilatation énorme qu'il éprouve, que, non-seulement il se liquéfie, mais encore il se solidifie en une sorte de fine neige voltigeant dans l'air. Pour rassembler les parcelles de cette espèce de neige, on fait arriver le

sensation douloureuse, semblable à celle d'une brûlure, et la peau est brunie comme si on l'avait touchée avec un fer rouge.

Si l'on mêle de l'acide carbonique neigeux avec de l'éther, qui le rend bon conducteur, l'évaporation est plus active, et la température s'abaisse à -90° . Dans le vide, elle va jusqu'à -100° . Ce mélange réfrigérant, nommé *mélange de Thilorier*, peut servir à congeler 1^{kil} de mercure en peu de temps. En y plongeant un tube rempli d'acide carbonique liquide, Faraday a obtenu une masse compacte et transparente comme de la glace.

1167. Méthode de M. Natterer. — M. Natterer a pu liquéfier, puis solidifier d'assez grandes quantités de gaz, en les comprimant dans un fusil à vent. Depuis, M. Bianchi a construit, sur les indications de M. Dumas, un appareil (*fig. 819 et 820*) destiné à condenser les gaz au moyen d'une pompe foulante. Le gaz, desséché, arrive par le tube *s* (*fig. 819*) dans la pompe *p* (*fig. 820*), qui le refoule dans un réservoir *os* en fer forgé, de 700^{cm} cubes de capacité, et capable de supporter des pressions de 6 à 7 cents atmosphères. Une soupape à tête sphérique, *s*, empêche le gaz comprimé de sortir de ce réservoir. Certains gaz liquéfiés attaquant le fer, l'intérieur est garni d'une lame de cuivre. Le mouvement est imprimé à la pompe foulante au moyen d'un arbre coudé muni d'un volant à manivelle *m* (*fig. 819*). Un gros tube *e*, dans lequel circule de l'eau, refroidit le corps de pompe qui s'échauffe rapidement, principalement par la chaleur dégagée par la compression du gaz. Enfin, un vase

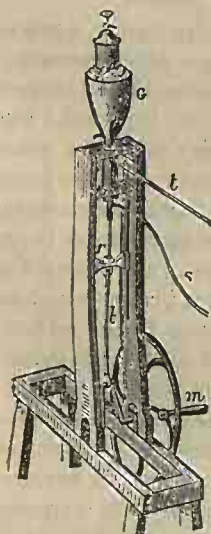


Fig. 819.



Fig. 820.

G (*fig. 819 et 820*) contient de la glace ou un mélange réfrigérant. Quand on veut recueillir le liquide obtenu, on sépare le réservoir, de la pompe foulante, et l'on fait sortir ce liquide par l'orifice *o*, en renversant l'appareil et retirant un bouchon à vis. Le liquide est reçu dans un tube de verre mince de 3 ou 4^{cm} de diamètre, ajusté au moyen d'un bouchon, au col d'un flacon contenant de la ponce sulfurique (*fig. 821*). Sans cette précaution, l'humidité se congèlerait sur le tube et empêcherait de voir dans l'intérieur¹.

¹ Dans le cas du protoxyde d'azote, le piston ne doit pas être graissé, mais seulement mouillé avec de l'eau; car le protoxyde d'azote brûlerait le corps gras, sous l'influence de la chaleur dégagée par la compression.

Le liquide obtenu produit, en s'évaporant, un froid tellement intense, qu'il se congèle sous le récipient de la machine pneumatique. Les métaux qu'on y plonge produisent le même bruit qu'un fer rouge dans l'eau, le mercure s'y congèle, et il produit sur la peau le même effet qu'une forte brûlure. Ce liquide est plus froid que l'acide carbonique solide mêlé d'éther, car plongé dans ce mélange, le protoxyde d'azote liquide entre en ébullition. Un charbon incandescent y brûle avec un très-vif éclat, comme dans le protoxyde gazeux (fig. 821), et l'on a, dans un même tube, une chaleur rouge-blanc, et au-dessous une température capable de congeler le mercure. Si l'on mêle le protoxyde liquide à l'acide carbonique solide et à l'éther, le froid produit est tellement intense que l'alcool devient pâteux; c'est le froid le plus intense qu'on puisse produire.

1168. M. Regnault, dans ses recherches sur la tension des vapeurs, a liquéfié divers gaz en les comprimant au moyen d'une pompe à piston mercuriel, permettant d'obtenir d'énormes pressions. Elle se compose de deux corps de pompe verticaux réunis largement à leur partie inférieure et dans l'un desquels s'enfonce un piston mis en mouvement par un puissant moteur. Quand ce piston est au bas de sa course, le reste de l'appareil est entièrement rempli de mercure. A l'extrémité supérieure de l'autre corps de pompe, sont deux soupapes, l'une s'ouvrant de haut en bas pour laisser pénétrer le gaz à comprimer quand le piston se retire; l'autre qui s'ouvre de bas en haut, par laquelle le gaz est refoulé quand s'enfonce le piston :



Fig. 821.

Au moyen de cet appareil, on peut comprimer directement un gaz dans un récipient, ou bien le renfermer dans un réservoir communiquant avec le récipient et refouler du mercure dans ce réservoir, au moyen d'air comprimé par la pompe à mercure.

M. Regnault a encore procédé en refoulant le mercure, au moyen de la pression produite par le gaz dégagé de l'acide carbonique liquéfié et renfermé dans un tube de fer plus ou moins chauffé; ou par la pression de l'hydrogène résultant de la décomposition de l'eau au contact du potassium.

1169. Nouvelles expériences de Faraday. — Faraday a repris, en 1845, ses expériences sur la liquéfaction des gaz, en profitant du froid intense que l'on peut obtenir avec l'acide carbonique solide¹. Le gaz était refoulé, par un long tuyau de cuivre, dans un tube en U, dont la partie courbe était plongée dans le mélange de Thilorier (1166). Pour comprimer ce gaz, il employait deux pompes foulantes de petit diamètre, dont la dernière recevait le gaz comprimé à 10 ou 20 atmosphères par la première, et le comprimait à son tour jusqu'à 50 atmosphères. Quand il voulait obtenir un froid très-intense, le mélange réfrigérant était placé sous un récipient tubulé, dont la tubulure était traversée par l'une des branches du tube en U; une boîte à étoupes permettait d'abaisser ou de

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XV, p. 257.

soulever ce tube pour voir dans l'intérieur de la partie courbe. Quand on faisait le vide sous le récipient, la température s'abaissait à -110° . Voici le tableau des gaz qui ont été liquéfiés et solidifiés par Faraday. Ceux dont les noms sont précédés d'un (*) se liquéfient, sans compression, par un froid de -80° .

LIQÉFIÉS SEULEMENT	ONT ÉTÉ CONGELÉS	
Acide chlorhydrique.	* Acide bromhydrique, à -8°	Ammoniaque à -75°
Acide fluoborique.	* Cyanogène, à -35°	* Acide sulfureux à -76°
Acide fluosilicique.	* Acide iodhydrique, à -51°	* Acide sulhydrique, à -86°
Hydrogène phosphoré.	* Acide carbonique, à -58°	Protoxyde d'azote à -100°
* Hydrogène arsénié.	Oxyde de chlore, à -60°	
* Chlore. — Gaz oléfiant.		

1170. Circonstances du passage d'un état à l'autre. — M. Andrews a étudié la liquéfaction des gaz au moyen de l'appareil (fig. 822). Un tube de verre *c*, représenté plus en grand en *T*, est rempli de gaz sec et pur, et ajusté sur un tube de métal très-fort *t*. Ce tube est rempli d'eau, séparée du gaz par une colonne de mercure *m*. On comprime l'eau en enfonçant une vis *v*. Quand le gaz a été resserré dans la partie capillaire supérieure, sa pression est donnée à peu près, par un appareil semblable, *c't'*, rempli d'air ou d'hydrogène.

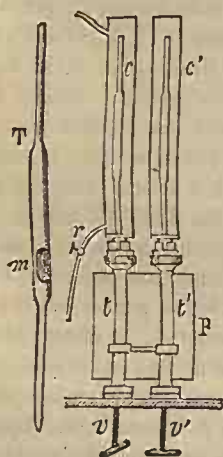


Fig. 822. — $\frac{1}{20}$.

M. Andrews a reconnu d'abord, sur l'acide carbonique, que : 1^o la pression nécessaire pour liquéfier un gaz est d'autant moins forte que sa température est plus basse ; 2^o les moindres traces d'un gaz plus difficile à liquéfier, retardent la liquéfaction ; 3^o il y a, pour chaque gaz, une température au-dessus de laquelle on ne peut le liquéfier par les plus fortes compressions.

M. Andrews a cherché à saisir le mode de passage d'un état à l'autre. En chauffant peu à peu jusqu'à 32° l'acide carbonique ou le protoxyde d'azote liquéfiés en *c*, il a vu la surface de niveau s'effacer peu à peu, et le tube se remplir d'un fluide homogène ; et, en refroidissant un peu, il voyait des stries ondoyantes précéder la liquéfaction. On peut rapprocher de ces faits les expériences inverses, dans lesquelles on a réduit des liquides totalement en vapeur en les chauffant fortement. Cagnard de Latour a fait à cet égard des expériences célèbres : dans un tube recourbé *ar* (fig. 823) contenant du mercure, il introduisit de l'alcool ou de l'éther. De l'air logé en *a* donnait une idée de la pression. Le réservoir ayant été fermé et



Fig. 823.

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. XXI, p. 208, et 5^e série, t. VIII, p. 555.

l'appareil plongé dans un alliage en fusion, le liquide se réduit totalement en vapeur, en ne prenant qu'un volume double environ. Avec l'eau, l'appareil a toujours éclaté avant que tout ne fût réduit en vapeur. — D'après M. Drion, l'éther chlorhydrique se transforme totalement en vapeur vers 170°. Dans un bain d'huile transparente, il voyait au niveau du gaz liquéfié, une couche nébuleuse indécise et privée de pouvoir réflecteur, qui augmentait d'épaisseur dans les deux sens, en s'effaçant peu à peu, et bientôt le tube parut vide. — Des apparences semblables ont été observées sur divers gaz liquéfiés par M. Aventarius.

1171. Liquéfaction des gaz dits permanents. — Six gaz n'avaient pu être liquéfiés, malgré de nombreux essais dans lesquels on avait poussé la pression jusqu'à plus de 500 atmosphères, et abaissé la température au-dessous de -100° . C'est qu'il fallait, d'après la loi de M. Andrews et de M. Raoul Pictet, faire agir simultanément la pression et le froid. Ces gaz sont l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, le bioxyde d'azote et le formène ou gaz des marais. Tout à la fin de l'année 1877, MM. Cailletet, en France, et R. Pictet, à Genève, ont excité une vive émotion en résolvant le problème chacun de leur côté et par des méthodes toutes différentes.

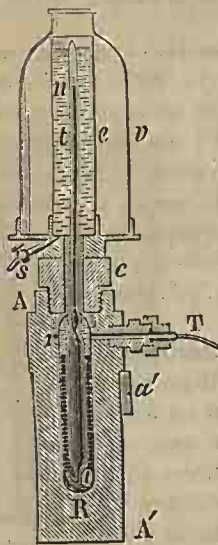


Fig. 824. — $\frac{1}{10}$.

M. Cailletet est parti du refroidissement intense, de 200° environ, que produit la détente brusque d'un gaz très-comprimé. AA' (fig. 824) est une pièce d'acier soutenue par trois pieds adaptés à l'anneau aa', et dans laquelle est creusée une cavité Rr. Un tube de verre *ot* contenant le gaz pur, et ouvert en *o*, est fixé par un écrou roulant C, et plonge dans du mercure. Le tube T amène de l'eau comprimée dans un réservoir d'acier, par un piston plongeur à vis, ou par une pompe de presse hydraulique, comme dans l'appareil que construit M. Ducretet.

Le mercure comprimé refoule le gaz jusqu'en *n*, où il est refroidi par le liquide que contient le manchon *e*. La pression est donnée par un manomètre adapté au réservoir, dans lequel est pratiqué un orifice fermé par une vis à volant. Quand on ouvre brusquement l'orifice, la détente se fait en *n*, et l'on y voit, pendant quelques secondes, un brouillard ou des gouttelettes déposées sur le verre, attestant la précipitation du gaz à l'état liquide. Les six gaz ci-dessus ont donné les mêmes résultats sous des pressions de 180 à 300 atmosphères et à des températures, avant détente, de -29° à $+13^{\circ}$.

Pendant que M. Cailletet liquéfiait l'oxygène, M. R. Pictet obtenait, de son côté, le même résultat au moyen d'appareils étudiés depuis plus de cinq ans. Le gaz, dégagé dans un vase de fer, s'accumule dans un tube allant en s'abaissant, et entouré d'un manchon qui contient de l'acide carbonique liquide. La portion

gazeuse de cet acide est aspirée par un système de pompes, ce qui produit un froid de 140° , dû à l'évaporation; puis refoulée dans le manchon, après avoir traversé un tube entouré d'acide sulfureux liquide refroidi par le même artifice, au moyen d'autres pompes.

Dans une expérience, la pression, après avoir atteint 560 atmosphères, baissa rapidement à 505 et s'y maintint. Un bouchon à vis ayant été alors ouvert, un jet violent de gaz se produisit, dans lequel une partie blanche, éclairée à la lumière électrique, donna de la lumière réfléchie polarisée, ce qui prouve qu'elle contenait des parcelles solidifiées. M. Pietet, grâce au froid de -140° , put recueillir et conserver de l'oxygène liquide assez longtemps pour en déterminer la densité approximative. — L'hydrogène, soumis aux mêmes expériences, et porté à 650 atmosphères, a donné un jet brumeux, qui, en frappant le sol, produisait une crépitation particulière autorisant à penser qu'il contenait des parcelles solidifiées.

Il résulte de ce qui précède que les mots de *gaz permanents* devront être abandonnés et remplacés par ceux de *gaz difficiles à liquéfier*.

§ 3. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES VAPEURS.

I. Mesure des tensions des vapeurs.

1172. Méthodes de Dalton. — La mesure des tensions des vapeurs a été l'objet des travaux d'un grand nombre de physiciens. Ces tensions se mesurent toujours quand la vapeur est à saturation. Dalton, un des premiers, a construit des tables de tension donnant, pour chaque température, la force élastique correspondante. Il se servait de l'appareil (fig. 802); il portait l'eau du manchon à une température donnée par plusieurs thermomètres plongés à différentes profondeurs, et la différence des hauteurs des colonnes de mercure dans les deux tubes barométriques, ramenée à 0° , donnait la tension de la vapeur.

Cette méthode ne peut servir, pour l'eau, que jusqu'à 100° . Au delà, le mercure descendant dans le tube à vapeur au-dessous du niveau de la chaudière. Dalton employait alors le petit appareil (fig. 824 bis); la tension était donnée par la différence de niveau *ab* dans les deux branches, augmentée de la hauteur du baromètre. Cette méthode n'est pas susceptible de précision, à cause de la difficulté de connaître la température moyenne de la colonne de mercure *ab*, pour la ramener à 0° . M. Regnault a reconnu aussi que la première, telle que l'employait Dalton, ne peut donner que des résultats approchés, à cause de la difficulté de rendre uniforme la température de l'eau du manchon.



Fig. 824 bis.

Dalton a imaginé une autre méthode, qui permet d'opérer sous les plus faibles pressions comme sous les plus fortes; elle est fondée sur ce principe, que la tension de la vapeur pendant l'ébullition est égale à la pression extérieure. Le

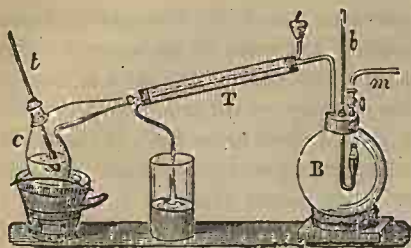


Fig. 825.

liquide est renfermé dans une cornue *c* (fig. 825) munie d'une tubulure, à laquelle est adapté un thermomètre *t*. Le col de la cornue est incliné et communique avec un ballon *B*, dans lequel on peut comprimer ou raréfier, par le tube *m*, de l'air, dont la pression est donnée par le manomètre *b*. *T* est un manchon, dans lequel on fait passer un courant d'eau froide. Après avoir établi une certaine pression

dans l'intérieur de l'appareil, on fait bouillir le liquide, dont la température est donnée par le thermomètre *t*. La force élastique de la vapeur reste alors constamment égale à la pression qui règne dans l'appareil, la vapeur produite étant condensée au fur et à mesure dans la partie du tube qu'enveloppe le manchon *T*. — Avec cette méthode, les observations se font à loisir, au moment que l'on choisit, et sans qu'on ait à se préoccuper de maintenir la température constante; c'est, sans contredit, la plus sûre et la plus commode. Elle a été appelée *méthode dynamique*, par opposition avec le nom de *méthode statique* donné à la précédente. Nous verrons (1178) à quelles conditions elle conduit aux mêmes résultats.



Fig. 826.

Cas des basses températures. — Gay-Lussac introduit le liquide dans un tube barométrique recourbé *na* (fig. 826), dont l'extrémité vide plonge dans un mélange réfrigérant. Le liquide se rend tout entier en *a* par distillation (1144), et la vapeur prend alors la tension qui correspond à la température du mélange, tension mesurée par la différence de niveau en *n* et dans le baromètre *B*. Gay-Lussac a reconnu ainsi que la glace produit de la vapeur dont la tension est égale à celle de l'eau à la même température, résultat confirmé depuis, comme nous le verrons, sur d'autres substances (1174).

1173. Expériences de Dulong et Arago. — L'emploi de la vapeur comme force motrice exige que l'on connaisse les températures qui correspondent à de fortes pressions. Au-dessus de 8 atmosphères, on n'avait, avant 1839, que les observations faites jusqu'à 20 atmosphères par M. Arzberger, qui mesurait la pression en évaluant l'effort qu'elle devait faire pour soulever une soupape de sûreté, moyen peu

précis. En outre, le thermomètre qui donnait la température, était plongé dans la vapeur, dont la pression faussait ses indications.

En 1829, Dulong et Arago, pour répondre à une demande du gouvernement adressée à l'Académie des Sciences de Paris, mesurèrent la force élastique de la vapeur d'eau jusqu'à 24 atmosphères, en se servant d'un manomètre à air¹. La figure 827 représente l'appareil, imaginé par Dulong : *c* est une chaudière en tôle, de 80 litres environ de capacité, formée d'une partie cylindrique et de deux parties hémisphériques réunies par des boulons comme on le voit en *b* (fig. 828), un couvercle plan, joint de la même manière, ferme la chaudière à sa partie supérieure. Des lames de plomb interposées empêchent les fuites. Cette chaudière avait été essayée à une pression de 60 atmosphères; elle était munie d'une soupape de sûreté, et disposée sur un fourneau, d'une masse assez grande pour que les variations de température y fussent très-lentes. Le couvercle de la chaudière communiquait par

un tube de fer avec un réservoir en fonte *r* (fig. 827), contenant du mercure, qui s'élevait d'autre part dans le manomètre à air *m*, et dont le niveau s'observait dans le tube latéral *n*. Cette partie de l'appareil avait déjà servi à Dulong et Arago dans leurs recherches sur la loi de Mariotte (I, 378), recherches entreprises à l'occasion de celles qui nous occupent. Le tube de communica-

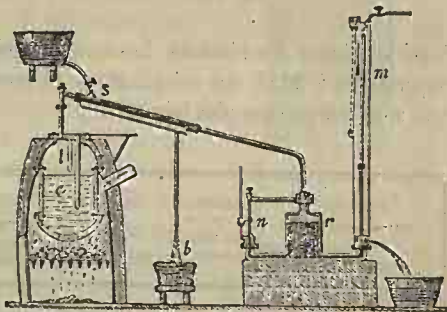


Fig. 827.

s'élève d'abord verticalement, puis descend obliquement jusqu'au réservoir *r*. La partie oblique contient de l'eau, et est refroidie par un courant d'eau qui sort en *b*, de manière que ce tube reste toujours plein, la vapeur s'y condensant lorsque le niveau vient à baisser. La température est donnée par deux thermomètres plongés dans deux tubes de fer *t*, *t'* (fig. 827 et 828) remplis de mercure, dont l'un s'enfonce dans l'eau, tandis que l'autre est seulement plongé dans la vapeur. Ces deux thermomètres ont toujours été sensiblement d'accord. La portion des tiges hors des tubes *t*, *t'* était courbée et entourée d'eau, pour faire la correction.

Après avoir mis l'eau de la chaudière en ébullition, et chassé l'air par la soupape momentanément soulevée, on réglait les robinets d'écoulement de l'eau en *m*, *s* et *T*; on chargeait le fourneau d'une quantité de combustible en rapport avec la température que l'on voulait obtenir, et l'on attendait que la marche ascendante des thermomètres fût très-lente. Quand elle avait atteint son maximum,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLIII, p. 74.

on observait simultanément le manomètre et les thermomètres. Des observations faites quelques instants auparavant préservaient des erreurs de lecture. La pression était mesurée par la force élastique de l'air dans le manomètre,

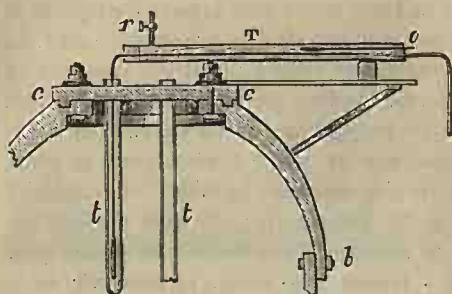


Fig. 828.

augmentée du poids de la colonne de mercure qui y était soulevée, comptée à partir du niveau dans le tube *n* (fig. 827) diminuée enfin du poids d'une colonne d'eau ayant pour hauteur la distance des niveaux *s* et *n*. La pression n'a pu être poussée que jusqu'à 24 atmosphères; au delà, la chaudière laissait perdre l'eau par les joints. A 24 atmosphères, sa température était de 224°.

Voici le tableau des résultats. Les tensions qui correspondent aux températures supérieures à 224°, ont été calculées au moyen d'une formule d'interpolation que nous indiquerons plus loin (1177).

PRESSION		TEMPÉ- TURE du therm. à mercure.	PRESSION en kilog. sur 1 c. car.	PRESSION		TEMPÉ- TURE du therm. à mercure.	PRESSION en kilog. sur 1 c. car.
en atmos- phères.	en mercure à 0°.			en atmos- phères.	en mercure à 0°.		
1	0,76	100°	1,033	13	9,88	193,70	13,429
1,5	1,14	112,2	1,549	14	10,64	197,19	14,462
2	1,52	121,4	2,066	15	11,40	200,48	15,495
2,5	1,90	128,8	2,582	16	12,16	203,60	16,528
3	2,28	135,1	3,099	17	12,92	206,57	17,561
3,5	2,66	140,5	3,615	18	13,68	209,40	18,594
4	3,04	145,4	4,132	19	14,44	212,10	19,627
4,5	3,42	149,06	4,648	20	15,20	214,70	20,660
5	3,80	153,08	5,165	21	15,96	217,20	21,693
5,5	4,18	156,80	5,681	22	16,72	219,60	22,726
6	4,56	160,20	6,198	23	17,48	221,90	23,759
6,5	4,94	163,48	6,714	24	18,24	224,20	24,792
7	5,32	166,50	7,231	—	—	—	—
7,5	5,70	169,37	7,747	25	19,00	226,30	25,825
8	6,08	172,10	8,264	30	22,80	236,20	30,990
9	6,84	177,10	9,297	35	26,60	244,85	36,155
10	7,60	181,60	10,330	40	30,40	252,55	41,320
11	8,36	186,03	11,363	45	34,20	259,52	46,485
12	9,12	190,00	12,396	50	38,00	265,89	51,650

1174. Expériences de M. Regnault. — Le travail le plus étendu que l'on ait fait sur les tensions des vapeurs dans les basses températures et dans les plus élevées, est celui de M. Regnault. C'est aussi le plus remarquable, tant par la perfection des appareils que par l'exactitude des méthodes.

Pour les températures inférieures à 0° , M. Regnault a employé la méthode de Gay-Lussac, en se servant, pour refroidir le tube à vapeur, d'un mélange de neige et de chlorure de calcium, qui étant liquide, peut être agité, de manière que la température soit obtenue avec plus de sûreté. M. Regnault a reconnu, comme l'avait fait Gay-Lussac, que la vapeur fournie par l'eau à l'état liquide ou solide présente les mêmes tensions aux mêmes températures. Il a constaté, de 0° à -32° , que la courbe représentant les expériences se continue parfaitement avec celle que donnent les tensions prises au-dessus de 0° . Des expériences faites sur l'hydrocarbure de brome, la benzine et surtout l'acide acétique monohydraté, ont conduit à la même conclusion. La dernière substance, qui fond à 16° , peut rester liquide au-dessous de ce terme, même quand on l'agite, ce qui permet d'opérer facilement sous les deux états aux mêmes températures. La courbe des tensions de l'acide solide a été d'abord un peu au-dessus de celle de l'acide liquide. Mais l'acide acétique ayant été distillé sur de l'acide phosphorique anhydre, pour lui enlever l'eau en excès, la première courbe s'est trouvée au contraire inférieure à l'autre; c'est qu'il se forme un peu d'acétone, dans la distillation. M. Regnault admet donc que les courbes coïncideraient, si l'acide était pur; à l'état liquide, l'eau en excès ou l'acétone disséminés dans la masse n'ont pas d'action sensible sur la tension; mais, à l'état solide, la matière étrangère se séparant en partie, a plus d'influence.

Pour les températures comprises entre 0° et 50° , M. Regnault a d'abord employé la méthode de Dalton, en la débarrassant des causes d'erreur qui la rendent inexacte¹. La figure 829 représente la disposition adoptée : le baromètre t' et le tube à vapeur t , aussi semblables que possible, sont plongés dans une même cuvette munie d'une vis à deux pointes, o , destinée à faciliter la vérification du baromètre t' . Ces tubes traversent des tubulures garnies de caoutchouc, placées au fond d'une caisse V en tôle galvanisée, portant antérieurement une glace verticale à travers laquelle on aperçoit le haut des tubes t , t' . La caisse est remplie d'eau continuellement agitée, dont on peut maintenir la température constante au moyen d'une lampe à alcool. On mesure au cathétomètre

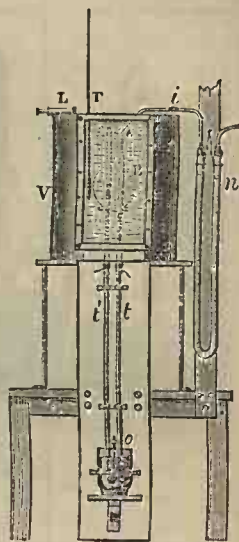


Fig. 829.

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XI, p. 273.

la différence de niveau dans les deux tubes, et on la ramène à 0°, le niveau du mercure dans le tube à vapeur se trouvant toujours dans l'intérieur de la caisse.

Dans une autre série d'expériences, M. Regnault s'est servi d'un ballon B, de 500^{cm} cubes environ (*fig. 829*), renfermant une petite ampoule remplie de liquide purgé d'air, et communiquant avec une tubulure de cuivre à trois branches *e*. La branche antérieure aboutit à l'extrémité du tube à vapeur *t*, et la tubulure supérieure met le ballon en communication avec une machine pneumatique, par l'intermédiaire de tubes desséchants *n*. Après avoir bien desséché l'appareil, en faisant le vide et laissant rentrer l'air un grand nombre de fois, on fait une dernière fois le vide aussi exactement que possible, puis on ferme à la lampe le tube *ei*. On enveloppe ensuite le ballon B de glace fondante, et l'on mesure la

tension de l'air sec qui est resté dans le ballon, en relevant au cathétomètre la différence des colonnes dans les tubes *t* et *t'*. On enlève ensuite la glace, et chauffant le ballon avec quelques charbons, on fait éclater l'ampoule. On remplit ensuite la caisse V, d'eau que l'on chauffe à diverses températures; la tension de la vapeur est donnée par la différence des colonnes, diminuée de la dépression due à l'air restant dans le ballon; et la température, par un thermomètre T plongé dans le bain, agit vivement.

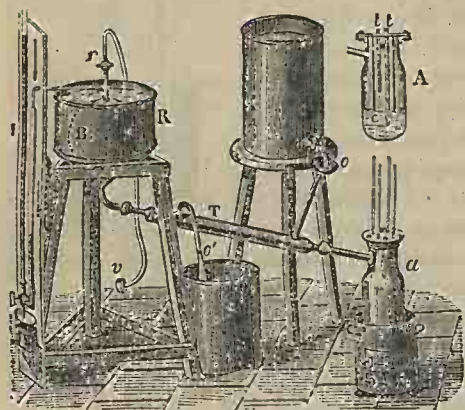


Fig. 830.

Pour les températures inférieures à 0°, la caisse V est remplacée par un vase de verre qui entoure le ballon seul, et dans lequel on met une dissolution de chlorure de calcium, dont on abaisse progressivement la température en y projetant de la glace. — Cette méthode peut servir aussi pour des liquides autres que l'eau : des expériences faites sur le mercure ont donné pour la tension de la vapeur de ce liquide à 50° et à 100°, un peu moins de 0^{mm},1 et 0^{mm},5, en admettant que le mercure ne donne pas de vapeurs appréciables à 0°.

Méthode par l'ébullition. — M. Regnault a aussi employé la méthode dynamique. Une chaudière de cuivre *a* (*fig. 830*), communique par un tube oblique, avec un ballon B de 24 litres de capacité, renfermé dans une cuve R qui contient de l'eau à la température ambiante. Le tube oblique est entouré d'un manchon T, dans lequel on fait circuler de l'eau froide, qui entre en *o* et sort en *o'*. Le ballon est surmonté d'un ajutage à deux branches, dans l'une desquelles on mastique le tube de l'appareil manométrique I, tandis que l'autre, *r*, est mise

en communication avec une machine pneumatique ou une pompe de compression, au moyen desquelles on peut établir dans tout l'appareil la pression que l'on veut. La température de la chaudière *a* est donnée par quatre thermomètres plongeant dans des tubes de fer contenant du mercure, comme on le voit dans la coupe A. Pour faire la correction relative à la partie non plongée, la température de cette partie était donnée par un petit thermomètre suspendu entre les tiges. — Cette méthode a donné les mêmes résultats que la précédente.

Voici le tableau des résultats obtenus par M. Regnault, jusqu'à 100° :

TEMPÉ- RATURE.	FORCE élastique.	TEMPÉ- RATURE.	FORCE élastique.	TEMPÉ- RATURE.	FORCE élastique.	TEMPÉ- RATURE.	FORCE élastique.
— 32°	0 ^{mm} 310	1°	4,940	34°	39,565	68°	213,596
— 31	0,336	2	5,302	35	41,827	69	223,165
— 30	0,365	3	5,687	36	44,201	70	233,093
— 29	0,397	4	6,097	37	46,691	71	243,393
— 28	0,431	5	6,534	38	49,302	72	254,073
— 27	0,468	6	6,998	39	52,039	73	265,147
— 26	0,509	7	7,492	40	54,906	74	276,624
— 25	0,553	8	8,017	41	57,910	75	288,517
— 24	0,602	9	8,574	42	61,055	76	300,838
— 23	0,654	10	9,165	43	64,346	77	313,600
— 22	0,711	11	9,792	44	67,790	78	326,811
— 21	0,774	12	10,457	45	71,391	79	340,488
— 20	0,841	13	11,162	46	75,158	80	354,643
— 19	0,916	14	11,908	47	79,093	81	369,287
— 18	0,996	15	12,699	48	83,204	82	384,435
— 17	1,084	16	13,536	49	87,499	83	400,101
— 16	1,179	17	14,421	50	91,982	84	416,298
— 15	1,284	18	15,357	51	96,661	85	433,044
— 14	1,398	19	16,346	52	101,543	86	450,344
— 13	1,521	20	17,391	53	106,636	87	468,221
— 12	1,656	21	18,495	54	111,945	88	486,687
— 11	1,803	22	19,659	55	117,478	89	505,759
— 10	1,963	23	20,888	56	123,244	90	525,450
— 9	2,137	24	22,184	57	129,251	91	545,778
— 8	2,327	25	23,550	58	135,505	92	566,757
— 7	2,533	26	24,988	59	142,015	93	588,406
— 6	2,758	27	26,505	60	148,791	94	610,740
— 5	3,004	28	28,101	61	155,839	95	633,778
— 4	3,271	29	29,782	62	163,170	96	657,535
— 3	3,553	30	31,548	63	170,791	97	682,029
— 2	3,879	31	33,406	64	178,714	98	707,280
— 1	4,224	32	35,359	65	186,945	99	733,305
0	4,600	33	37,411	66	195,496	100	760,000

1175. Expériences sous les hautes pressions. — Ces expériences ont été faites par le procédé qui précède, seulement l'appareil était plus grand et plus résistant¹. La chaudière était celle qui est figurée à la page 275, seulement elle n'avait pas encore été percée en R. Le couvercle porte trois tubes de fer remplis d'huile de lin, dont deux reçoivent des thermomètres à mercure, que l'on a soin d'enfoncer de manière que le mercure ne dépasse qu'à peine le couvercle, et le troisième, plus gros que les autres et plongé seulement dans la vapeur, contient le réservoir d'un thermomètre à air (1040). Le ballon B (fig. 830) est remplacé par un réservoir de cuivre très-fort, de 280 litres de capacité, communiquant par sa partie inférieure avec la chaudière, au moyen d'un tube entouré d'eau froide. A sa partie supérieure est une tubulure d'où partent deux tuyaux, dont l'un communique avec une machine à comprimer l'air, et l'autre avec le manomètre à air libre qui avait servi à M. Regnault dans ses recherches sur la loi de Mariotte, et que l'on voit à gauche de la figure 832, page 407.

Voici maintenant la marche de l'opération : l'eau de la chaudière étant près de bouillir, on comprimait de l'air dans le réservoir de cuivre, et au moyen de la pompe à eau du réservoir A (fig. 832), on poussait le mercure dans le tube M, de manière à faire arriver ce liquide, dans le tube *nn'*, près d'un repère marqué à sa partie inférieure. Plusieurs expérimentateurs observaient ensuite, avec une multitude de soins, les thermomètres et les positions des niveaux du mercure dans les tubes M et *nn'*. — M. Regnault a pu opérer ainsi jusqu'à 28 atmosphères. A 30 atmosphères, la chaudière était tellement distendue, que le boulon qui réunissait les barres de l'armature à la partie inférieure se rompit. Il eût été imprudent d'aller au delà. Nous donnons plus loin le tableau des principaux résultats.

1176. Expériences de Magnus. — Nous citerons enfin les expériences de Magnus, faites au moyen d'un appareil de petites dimensions². Cet appareil consiste en un tube en U, dont une des branches, terminée par une boule, est remplie d'eau bien purgée d'air, que du mercure sépare de l'autre branche. Celle-ci communique avec une machine à raréfier ou à comprimer l'air. Le tube en U est plongé dans un bain, dont on fait varier la température, qui est donnée par un thermomètre à air dont le réservoir bifurqué embrasse le tube en U. On commence, dans chaque expérience, par établir dans l'appareil une pression déterminée, mesurée par un manomètre, et l'on observe la température indiquée par le thermomètre à air. Magnus a opéré ainsi jusqu'à 111°.

1177. Constructions graphiques et formules d'interpolation. — La force élastique de la vapeur à saturation croît très-rapidement avec la température. On n'a pu saisir jusqu'à présent la loi théorique qui lie ces deux quantités. Dalton avait proposé la suivante : *les tensions des vapeurs croissent suivant une progression géométrique lorsque les températures croissent en progression arith-*

¹ Mémoires de l'Académie des sciences de Paris, t. XXI, p. 538.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XII, p. 69.

métique. Mais les expériences de M. Regnault montrent que cette loi n'est vraie qu'entre des limites de température assez rapprochées.

Il faut alors, pour saisir la marche du phénomène, employer la méthode graphique. C'est ce qu'a fait M. Regnault en représentant les températures par les abscisses, et en employant les précautions que nous avons déjà fait connaître (1009). La courbe une fois tracée sur la planche de cuivre, on s'en sert pour trouver la valeur de la tension correspondant à une température donnée.

Formules d'interpolation. — On a aussi employé des formules d'interpolation, dont on a proposé un grand nombre. De Prony a adopté une expression de la forme

$$F = ax^t + b\beta^t + c\gamma^{t^2} + \dots,$$

dont il a calculé les constantes au moyen des expériences de Bétancourt. Le Dr Yong a proposé la formule $F = (a + bt)^n$, et Dulong et Arago, $F = (1 + 0,7153 t)^5$, dans laquelle t représente la température comptée positivement ou négativement à partir de 100° . La constante unique que renferme cette formule, a été déterminée au moyen de l'observation faite sous la plus forte pression. M. Regnault a trouvé que cette formule, qui a servi à calculer les résultats qui dépassent 24 atmosphères, dans le tableau de la page 396, représente bien les données de l'observation à partir de 100° , mais au-dessous, elle se trouve en défaut. M. Roche a proposé la formule

$$F = ax^{\frac{t}{1+mt}},$$

à laquelle il a été conduit par le calcul, et à laquelle sont aussi arrivés, de leur côté, MM. Clapeyron, August, de Wrede, Holtzmann. M. Regnault, auquel nous empruntons ces citations, a trouvé que cette formule, qui ne contient que trois constantes, représente les résultats qu'il a trouvés, avec une exactitude remarquable, dans une grande étendue de l'échelle thermométrique, et qu'elle s'applique aussi à la vapeur d'éther et à celle d'alcool. De Prony a proposé une expression exponentielle, à laquelle Biot, en 1844, a substitué la suivante :

$$\log F = a + bx^t + c\beta^t,$$

qui donne le logarithme de la tension, et dont il a calculé les coefficients pour la vapeur d'eau. Cette formule, ainsi que celle de M. Roche, a été adoptée par M. Regnault pour calculer ses tables de tension; elle représente bien l'ensemble de toutes ses observations entre -30° et 232° . Pour calculer les cinq constantes, il a pris t égal à -20° , 40° , 100° , 160° , 220° , températures pour lesquelles F prend les valeurs 0,91; 54,91; 760; 465,6; 17,390 millimètres.

Le tableau suivant renferme une comparaison des nombres calculés par cette formule avec ceux que donne la construction graphique :

THERMOMÈTRE A AIR	FORCES ÉLASTIQUES		DIFFÉRENCES
	d'après la courbe,	par la formule.	
* — 20°	0mm,91	0mm,91	0mm,00
— 10	2,08	1,97	+ 0,11
0	4,60	4,48	+ 0,12
10	9,16	9,05	+ 0,11
20	17,39	17,30	+ 0,09
30	31,55	31,50	+ 0,05
* 40	54,91	54,91	0,00
50	91,98	92,02	— 0,04
60	148,79	148,83	— 0,04
70	233,09	233,11	— 0,02
80	354,64	354,64	0,00
90	525,45	525,45	0,00
* 100	760,00	760,00	0,00
110	1073,7	1073,36	— 1,66
120	1489	1491,28	— 2,28
130	2029	2030,28	— 1,28
140	2713	2717,63	— 4,63
150	3572	3581,23	— 9,23
* 160	4647	4651,62	— 4,62
170	5960	5961,66	— 1,66
180	7545	7546,39	— 1,39
190	9428	9442,70	— 14,70
200	11660	11689,00	— 29,00
210	14308	14324,80	— 16,80
* 220	17390	17390,36	— 0,36
230	20915	20926,38	— 11,38

Les formules empiriques ci-dessus, sont trop compliquées pour la pratique. M. G. Duperray a proposé la suivante $F = at^4$, dans laquelle t est exprimé en centaines de degrés¹. Suivant que F représente des millimètres, des atmosphères ou les pressions en kilogrammes par centimètre carré, on a

$$F^{\text{mm}} = 723,8205 \cdot t^4; F^{\text{at}} = 0,9523954 \cdot t^4; F^{\text{k}} = 0,984101 \cdot t^4.$$

Le coefficient de la dernière formule différant peu de l'unité, on a approximativement $F^{\text{k}} = t^4$, qui exprime que la tension est proportionnelle à la 4^e puissance de la température. Par exemple, si $t = 2$, c'est-à-dire si la température est de 200°, on a $F = 16^{\text{k}}$, valeur qui ne diffère que de $\frac{1}{100}$ du nombre 15^k,892 trouvé par M. Regnault.

1478. TENSION DES VAPEURS DE DIVERS LIQUIDES. — Dalton a proposé la loi

¹ Bibliothèque universelle de Genève (archives des sciences), t. XL (1871), p. 180.

suivante : les tensions des vapeurs des divers liquides sont égales, à des températures également distantes de leurs points d'ébullition respectifs. Si cette loi était vraie, elle permettrait de déduire les forces élastiques de la vapeur d'un liquide quelconque, de celles de la vapeur d'eau. Mais cette loi n'est pas exacte; Dalton reconnaissait lui-même qu'elle n'était suffisamment approchée que pour les températures peu éloignées du point d'ébullition; et Despretz a reconnu qu'elle est d'autant plus en défaut pour deux liquides qu'ils diffèrent plus par leur nature chimique, et que les écarts sont dans le même sens au-dessus et au-dessous du point d'ébullition.

Des expériences directes étaient donc nécessaires, surtout sur les vapeurs de certains liquides, comme le chloroforme et l'éther, qu'on a cherché à employer dans les machines à vapeur. M. Regnault a enrichi la science d'un très-grand nombre de résultats obtenus sur des liquides volatils à divers degrés, des dissolutions de différents sels, et des liquides fournis par des gaz liquéfiés comme nous l'avons dit plus haut (1168). Tantôt il a employé la méthode statique, au moyen de l'appareil (fig. 829), principalement pour les basses températures; tantôt la méthode de l'ébullition. Mais celle-ci ne donne plus de résultats suffisamment précis quand la cohésion moléculaire est trop grande; alors l'ébullition se fait avec des soubresauts, et la température oscille, ce qui rend le point d'ébullition incertain. Il est essentiel aussi que le liquide soit d'une pureté absolue, car il suffit de quelques millièmes de substance volatile pour rendre les résultats différents de ceux que donne la méthode statique; ce qui fournit un moyen très-délicat de reconnaître la pureté des liquides. C'est ainsi que M. Regnault a pu reconnaître dans l'alcool et le sulfure de carbone, la présence de $\frac{1}{1000}$ d'un liquide volatil qu'il y avait introduit.

Voici une partie des résultats trouvés par M. Regnault :

TEMPÉRA- TURE	ALCOOL	ÉTHER	SULFURE de CARBONE	CHLOROFORME	BENZINE	ESSENCE de TÉRÉBENTHINE
— 20°	3mm,3	67mm,5	43mm,5	»	4mm,9	»
— 10	6,6	113,3	81,0	»	13,4	»
0	12,8	183,3	132,0	»	26,6	2mm,1
+ 10	21,3	286,4	203,0	»	46,6	2,9
20	41,5	433,3	301,8	160mm,5	76,3	4,4
40	133,6	909,6	617,0	366,2	182,3	10,8
60	350,3	1728,5	1163,7	751,0	388,6	26,5
80	812,7	3024,4	2033,8	1404,6	756,6	61,3
100	1694,9	4950,8	3329,5	2426,5	1352,3	131,1
120	3219,7	7702,2	5145,4	3916,2	2256,3	257,2
140	5637,0	»	7556,9	5965,7	3537,0	464,0
150	7258,7	»	»	7226,49	4336,7	605,2

GAZ LIQUÉFIÉS				MERCURE			
TEMPÉRA- TURE	ACIDE sulfureux.	AMMONIA- QUE	ACIDE sulphuri- que.	TEMPÉRA- TURE	TENSION	TEMPÉRA- TURE	TENSION
-78,2	»	457mm,9	441mm,4	0°	0mm,0200	120°	4mm,534
-40	»	528,6	»	10	0,0268	150	4,266
-30	»	876,6	2808,6	20	0,0372	180	11,00
-20	479,5	1397,7	4273,0	30	0,0530	200	19,90
-10	762,5	2149,5	5945,0	40	0,0767	250	75,75
0	1165,1	3162,9	7709,3	50	0,1120	300	242,1
+10	1719,5	4612,2	»	60	0,1643	350	663,2
20	2462,0	6467,0	»	70	0,2410	400	1587,9
30	3431,8	8832,2	»	80	0,3528	450	3384,3
40	4670,2	11776,4	»	90	0,5142	500	6520,2
50	6220,0	»	»	100	0,7455	520	8264,9

Ces résultats sont représentés, comme pour la vapeur d'eau, par la formule $\log F = a + bx' + c\beta'^2$. Pour tous les liquides, en nombre considérable, étudiés par M. Regnault, les constantes α et β (sauf pour l'alcool vinique) approchent beaucoup de l'unité. La somme algébrique $bx' + c\beta'^2$ ne peut donc croître indéfiniment avec t , et la courbe qui a $\log F$ pour ordonnée, a une asymptote parallèle à l'axe des températures; d'où il résulte que la force élastique d'une vapeur quelconque converge vers une limite maximum qu'elle ne peut dépasser.

Il résulte en outre des expériences de MM. I. Pierre et E. Puchot, faites à la température d'ébullition, que, pour les mélanges d'eau et d'alcool butylique; d'eau et de valériane amylique; d'eau, d'alcool amylique et d'alcool butylique, qui bouillent à 90°, 100° et 95°, la somme des tensions des vapeurs des liquides mélangés, calculées comme s'ils étaient seuls, est beaucoup plus grande que la pression atmosphérique; par exemple, de plus de 43 pour cent, pour le dernier mélange.

1179. Vapeurs des liquides mélangés. — Dalton, qui a découvert la plupart des lois relatives aux vapeurs, avait admis que la tension donnée par des liquides mélangés, était égale à la somme des tensions que chacun d'eux produirait isolément à la même température. Cette loi, admise généralement, n'avait jamais été vérifiée sous l'état de saturation. M. Regnault a fait des expériences pour la contrôler, au moyen de l'appareil (fig. 829) en remplissant l'ampoule, de deux liquides différents¹. Voici les résultats auxquels il est arrivé, en groupant les mélanges binaires comme il l'avait fait pour déterminer leurs points d'ébullition (1163) :

¹ Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut, t. XXVI, p. 745.

1° Quand les deux liquides n'exercent pas d'action dissolvante l'un sur l'autre, comme l'eau et le *sulfure de carbone*, ou le *chlorure de carbone* C^2Cl^6 , ou la *benzine*, la loi est exacte, ou du moins les erreurs sont négligeables; résultat auquel Magnus était arrivé de son côté. — 2° Avec l'eau et l'éther, qui se dissolvent en proportions non illimitées, les tensions sont bien moindres que la somme des tensions des liquides isolés; la somme représente à peine celle de l'éther seul. — 3° Quand les deux substances se dissolvent mutuellement en toutes proportions, la loi n'est pas plus exacte. Des mélanges en plusieurs proportions d'éther et de sulfure de carbone, de benzine et d'alcool, ont donné des tensions intermédiaires entre celles des deux liquides isolés.

1180. Vapeurs des dissolutions salines. — M. Regnault et M. Wülner ont mesuré les tensions des vapeurs fournies par les dissolutions de divers sels dans l'eau : le premier employait l'appareil (fig. 829); M. Wülner a suivi la méthode de Magnus (1176), et a procédé en comparant les tensions fournies par la dissolution, avec celles de la vapeur d'eau pure aux mêmes températures. Il a constaté d'abord que *la diminution de la tension, produite par la présence du sel, est proportionnelle à la quantité dissoute dans un même poids d'eau*. Pour une même quantité de sel, la différence augmente avec la tension donnée par l'eau pure et par conséquent avec la température. Pour le *sel marin* et le *sulfate de soude*, la différence d est proportionnelle à la tension de la vapeur d'eau pure; de sorte qu'on a $d = af$. Pour l'*azotate de soude*, le *chlorure de potassium*, le *sulfate de potasse* et l'*azotate de potasse*, les résultats sont représentés par une expression de la forme $d = af + bf^2$.

II. Mesure de la chaleur de volatilisation.

1181. Vapeur d'eau. — Black, après avoir découvert la chaleur latente de vaporisation, fit quelques expériences pour la mesurer. Il plaça sur un poêle, dont la température était sensiblement constante, un vase plein d'eau, et compara le temps qu'il mettait à s'échauffer jusqu'à 100°, à celui qu'employait ensuite l'eau pour se transformer complètement en vapeur. Il porta aussi de l'eau au-dessus de 100° dans une espèce de marmite de Papin, puis il ouvrit subitement la soupape; la vapeur s'échappa avec force, et la température retomba à 100°. L'eau vaporisée avait enlevé, à l'état latent, toute la chaleur perdue par l'eau qui restait. Watt qui a employé le même moyen, a aussi procédé en faisant arriver la vapeur formée, dans une bouilloire, au milieu d'une masse connue d'eau, qui s'échauffait aux dépens de la chaleur abandonnée par la vapeur en se condensant, et de celle que cédait l'eau de condensation pour s'abaisser à la température finale du mélange. Le poids de vapeur condensée était égal à l'augmentation de poids du calorimètre.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXVI, p. 163.

Rumfort employait son calorimètre à serpentin. La figure 831 représente l'appareil tel qu'on l'a employé depuis; la vapeur se forme dans une cornue R, dont le col incliné communique avec le serpentin du calorimètre. Le liquide qui se condense dans le col retombe dans la cornue. Le calorimètre est soutenu sur trois pointes de bois, et muni d'un couvercle pour empêcher l'évaporation de l'eau, dont la température est donnée par le thermomètre t , pendant qu'on fait mouvoir l'agitateur a . L'eau produite par la vapeur condensée dans le serpentin, se rend dans un récipient métallique c complètement fermé, où elle prend la température du calorimètre. A la fin de l'expérience, on l'extrait par un robinet, et on la pèse; on a ainsi le poids de la vapeur liquéfiée. On peut opérer sous différentes pressions en comprimant ou raréfiant l'air par le robinet r .

Soit P , le poids de l'eau du calorimètre et de son équivalent en eau, t sa température initiale, T celle de la vapeur, déduite de la tension qui règne dans l'appareil; 0 la température finale, p le poids de la vapeur condensée, et enfin c la chaleur spécifique du liquide sur lequel on opère. On aura, pour déterminer la chaleur latente de la vapeur,

$$pt + pc(T - 0) = P(0 - t), \quad [1]$$

qui exprime que la quantité de chaleur pt cédée par le poids p de vapeur pour se liquéfier, plus la quantité $pc(T - 0)$ abandonnée par le liquide condensé, est égale à la quantité de chaleur gagnée par le calorimètre.

Pour éviter la perte de chaleur extérieure, on commence l'opération à quelques degrés au-dessous de la température ambiante, et on la termine quand le calorimètre arrive à un même nombre de degrés au-dessus.

Il y a toujours un peu d'eau entraînée par la vapeur à l'état de gouttelettes, qui, s'ajoutant au poids de la vapeur, rend le résultat trop faible, ce que l'on reconnaît en employant de l'eau salée; on trouve un peu de sel dans le récipient c . On atténue cette cause d'erreur en évitant de produire une ébullition trop vive. La seconde cause d'erreur est due à la chaleur communiquée au serpentin, en vertu de la conductibilité du col de la cornue.

Despretz a trouvé, par la méthode qui précède, qu'il faut 540 calories à 1 gramme d'eau pour passer à l'état de vapeur. Ce même nombre a été retrouvé par M. Brix, au moyen d'un appareil analogue, dans lequel le serpentin était remplacé par un vase annulaire. Ce nombre diffère peu de celui qu'a trouvé M. Regnault à 100°, au moyen des appareils que nous allons décrire.

1182. De la chaleur de vaporisation de l'eau sous différentes pressions. — Dans les expériences qui précèdent, la chaleur de volatilisation

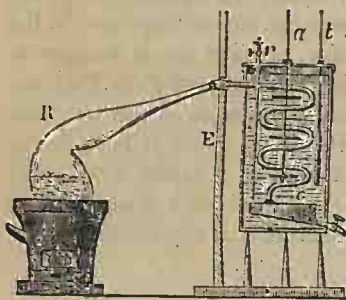


Fig. 831.

n'est mesurée que sous des pressions peu différentes de 760^{mm}. Il est important, pour l'emploi de la vapeur comme force motrice, de savoir si la chaleur enlevée reste la même à toutes les températures. Watt admettait qu'elle diminue à mesure que la température augmente, de manière que la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer et transformer en vapeur 1^{er} d'eau à partir de 0° serait toujours la même. Cette loi de Watt, n'a été établie que par une seule expérience assez imparfaite. En 1803, Southern et Creighton trouvèrent que la chaleur de vaporisation est la même sous toutes les pressions : c'est la loi de Southern. Clément et Désormes, en 1819, ont trouvé qu'un calorimètre dans lequel ils condensaient des poids égaux de vapeur, s'échauffait de la même quantité, quelle que fût la pression de la vapeur; ce qui est d'accord avec la loi de Watt. Mais dans ces expériences, la vapeur, à son entrée dans le calorimètre, se dilatait énormément en reprenant la pression atmosphérique, d'où résultait un refroidissement considérable. M. de Pambour avait aussi retrouvé la loi de Watt entre 2,7 et 4,4 atmosphères. Mais Despretz a prouvé que cette loi est inexacte ainsi que celle de Southern, et il a avancé le premier, que la chaleur totale croît avec la température¹.

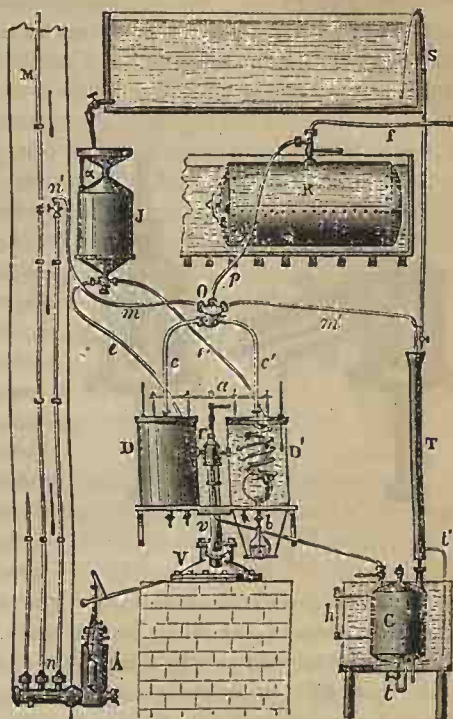


Fig. 832.

1183. Expériences de M. Regnault.— M. Regnault a repris la question en évitant les causes d'erreur des expériences antérieures. L'appareil employé est représenté dans la figure 832 : D, D' sont deux calorimètres identiques de cuivre rouge, contenant de l'eau qu'on agit régulièrement au moyen d'agitateurs, a, qui marchent ensemble. La vapeur arrive aux deux calorimètres par le robinet de distribution r et par le tuyau v, qui part de la chaudière V, de 300 litres de capacité. Chaque calorimètre contient deux ballons de cuivre dans lesquels la vapeur se

¹ *Traité élémentaire de physique*, par M. C. Despretz (1836), p. 212.

condense, et un serpentin qui part du ballon inférieur et communique, par les tubes c , c' , p , avec un réservoir de tôle R, de 600 litres de capacité, plongé dans l'eau. Une pompe foulante comprime dans ce réservoir, par le tube f , de l'air qui sert à établir une pression déterminée dans tout l'appareil. Cette pression est mesurée par le manomètre à air libre Mm' , que nous avons décrit à propos de la loi de Mariotte (I, 380). Une partie de la vapeur de la chaudière va se liquéfier dans le condenseur C, récipient de tôle de 60 litres de capacité, mis en communication par le tube Tm' avec le réservoir à air comprimé R. L'eau se renouvelle continuellement autour du condenseur; elle vient d'un bassin s , et passe d'abord dans un manchon T qui entoure le bas du tube m' , pour liquéfier la vapeur qui n'aurait pas été condensée en C. Cette eau va ensuite par le tube t' au fond de la cuve munie d'un trop-plein, qui contient le condenseur. Le tube à niveau, h , indique, la quantité d'eau condensée, que l'on extrait par le tube à robinet t .

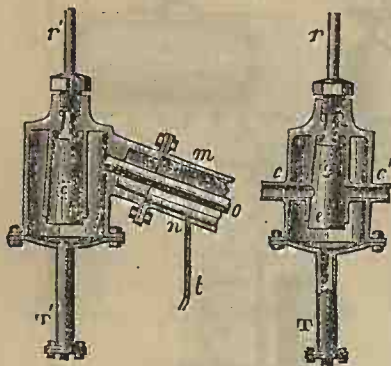


Fig. 833.

Le couvercle de la chaudière V porte des tubes de fer contenant des thermomètres. Cette chaudière est à moitié remplie d'eau, et la vapeur en sort par un tube qui, prenant naissance au-dessus du niveau, circule sous forme de serpentin dans l'intérieur de l'eau, et vient aboutir au robinet de distribution r . La partie de ce tuyau o (fig. 833) qui est hors de la chaudière, est entourée d'un manchon dont on voit la coupe en mn , et dans lequel circule de la vapeur, qui se rend directement par le tube t dans le condenseur C (fig. 832). De cette façon, la vapeur qui se rend aux calorimètres ne se refroidit pas dans son trajet et n'emporte pas de gouttelettes d'eau.

La figure 833 représente la coupe du robinet distributeur, en $r'T'$, par un plan vertical passant par l'axe du tube o , et en rT par un plan perpendiculaire au premier. Ce robinet se compose d'une boîte en bronze, coulée d'une seule pièce, dans laquelle est ménagée une enveloppe un peu conique. Cette enveloppe forme le boisseau d'un robinet creux, que l'on fait tourner au moyen de la tige r , r' , qui passe à travers un presse-étoupe. Les tubes c , c' aboutissent aux calorimètres D, D' (fig. 832), pénètrent jusqu'au robinet, qui présente une ouverture par laquelle la communication peut être établie entre le boisseau et l'un ou l'autre calorimètre.

La vapeur arrive, par le tube o (fig. 833), dans l'espace annulaire qui entoure

¹ Mémoires de l'Académie des sciences de Paris, t. XXI, p. 635.

le robinet, et se rend en partie par le tube T' dans le condenseur, et en partie dans un des calorimètres par l'un des tubes *c* ou *c'* (fig. 833). En réglant la position du robinet *r* et celle du robinet du condenseur C (fig. 832), on fait varier à volonté la proportion de vapeur qui entre dans le calorimètre.

Voici maintenant comment on opère : on commence par remplir les calorimètres d'un même poids d'eau. Cela se fait au moyen d'un vase jaugeur J (fig. 832), dans lequel on introduit un volume d'eau connu, en arrêtant le niveau à un repère tracé sur le tube latéral *a*. De ce volume, qui est de 66 litres environ, on déduit le poids de l'eau, en tenant compte de sa dilatation et de celle du vase J, dont la capacité à 0° est connue. Le liquide est ensuite introduit dans l'un ou l'autre des calorimètres, par le robinet inférieur du vase J, robinet dont le canal est coudé à angle droit.

Après avoir porté à l'ébullition l'eau de la chaudière, et avoir établi dans l'appareil la pression désirée, on fait passer la vapeur dans le condenseur C (fig. 832), et quand la distillation est régulière, on en dirige une partie dans l'un des calorimètres, D', où elle entre à une température que l'on déduit de sa tension donnée par le manomètre à air libre M. On observe ensuite, au moyen de lunettes glissant sur des supports fixes, la marche des thermomètres des deux calorimètres, pendant qu'on fait mouvoir les agitateurs *a*. Quand le thermomètre est devenu stationnaire en D', on recueille l'eau condensée par le serpentin, dans un ballon de verre, *b*, qui contient un petit thermomètre très-sensible, et l'on pèse cette eau. On opère ensuite avec l'autre calorimètre, de la même manière qu'avec le premier, et ainsi de suite alternativement, et l'on prend la moyenne des résultats obtenus.

La correction relative à l'action du milieu ambiant sur le calorimètre qui fonctionne, et à la chaleur qu'il reçoit par conductibilité, du robinet *r*, se calcule au moyen des observations faites en même temps sur l'autre calorimètre, qui ne reçoit pas de vapeur, et qui est soumis aux mêmes causes de perturbations extérieures.

M. Regnault a mesuré ainsi la chaleur de vaporisation de l'eau jusqu'à 14 atmosphères de pression. En raréfiant l'air dans le réservoir R, au lieu de le comprimer, il a pu aussi opérer au-dessous de la pression ordinaire, jusqu'à $\frac{1}{2}$ d'atmosphère; au-dessous, l'ébullition se faisait très-irrégulièrement dans la chaudière.

Cas des faibles pressions. — Pour les faibles pressions, M. Regnault a employé un autre procédé, qui consiste à mesurer la quantité de chaleur enlevée à un poids connu d'eau, par l'évaporation d'un poids aussi connu du même liquide. L'appareil destiné à ces expériences est formé d'un récipient annulaire dans lequel on met 5^{gr} d'eau distillée, et que l'on plonge ensuite dans un calorimètre. Ce récipient communique avec un flacon entouré d'un mélange réfrigérant, et dont on extrait une partie de l'air au moyen de la machine pneumatique. Après avoir établi la pression sous laquelle on veut opérer, pression mesurée par un manomètre barométrique (1048), on suit la marche du thermo-

mètre du calorimètre. L'eau du récipient distille et vient se condenser dans le flacon refroidi. Quand tout est évaporé, ce que l'on reconnaît au point d'arrêt qui se manifeste brusquement sur le thermomètre, on calcule, d'après l'abaissement de température du calorimètre, la quantité de chaleur enlevée par l'eau du récipient en s'évaporant.

Pouillet a aussi mesuré, de son côté, au moyen d'un appareil particulier, les chaleurs latentes de la vapeur d'eau sous de faibles pressions, et il existe un accord assez satisfaisant entre ses résultats et ceux de M. Regnault.

1181. Conclusions. — M. Regnault a conclu des nombreux résultats qu'il a obtenus, que la loi de Watt n'est pas exacte, et que celle de Southern l'est encore moins : les *chaleurs totales* vont en augmentant, et les chaleurs de vaporisation, en diminuant quand la température augmente. M. Regnault a représenté les résultats de ses expériences par la formule

$$[2] \quad \lambda = l + t = 606,5 + 0,305 t, \quad \text{ou} \quad \lambda = 0,305 (1988,5 + t),$$

dans laquelle λ est la *chaleur totale*, c'est-à-dire la chaleur de vaporisation l augmentée de la température t de la vapeur. Cette formule exprime que la *chaleur totale est égale à la chaleur de volatilisation à 0°, augmentée de la température d'ébullition multipliée par le nombre 0,305*. Ce nombre représente la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1^{er} de vapeur saturée, pour élever sa température de 1°, en la maintenant saturée au moyen de la compression. — On voit aussi que la chaleur de volatilisation l diminue quand la température t augmente, car la formule [2] donne

$$l = \lambda - t = 606,5 - 0,695 t.$$

D'après la formule [2], à 100°, on a $\lambda = 637$, et par conséquent $l = 537$, A 0°, la chaleur totale est égale à la chaleur de volatilisation et a pour valeur 606,5.

Conséquences. — M. Legrand a donné une interprétation simple des résultats obtenus par M. Regnault. Il fait remarquer d'abord qu'en écrivant la formule $pl + pc (T - 0) = P (0 - t)$, d'où l'on déduit la chaleur de volatilisation (1181), on suppose tacitement que la vapeur qui se condense possède la même capacité calorifique que le liquide produit. Or, la chaleur spécifique augmente au moment de la condensation. L'échauffement du calorimètre est donc trop faible, une partie de la chaleur abandonnée étant retenue par le liquide dont la capacité est plus grande que celle de la vapeur. Pour tenir compte de cette circonstance, M. Legrand procède de la manière suivante : $P, t, 0, c, T, p$, représentant les mêmes quantités que dans la formule [1] (1181), et v étant la capacité calorifique de la vapeur, que l'on suppose fournie par du liquide de l'espèce de celui qui remplit le calorimètre, ce liquide, après la condensation, aura pour masse $P + p$, et contiendra, en partant de 0°, une quantité de chaleur égale

à $(P + p) c_0$. Cette quantité se compose de celle qui existait d'abord, Pc_1 ; plus de la chaleur libre de la vapeur à partir du même point, pvT ; plus enfin de la chaleur lp abandonnée pendant la liquéfaction. On aura donc

$$[3] \quad pvT + pl + Pc_1 = (P + p) c_0; \quad \text{d'où} \quad l = \frac{Pc_1}{p}(0 - t) - vT + c_0.$$

En ajoutant vT , on aura la chaleur totale $l + vT$. Dans la formule donnée ordinairement, vT serait remplacé par cT , et les formules qui donnent les chaleurs totales coïncideraient.

M. Legendre a appliqué la formule [3] aux résultats trouvés par M. Regnault, ou à la formule $\lambda = 606,5 + 0,305 t$, qui les représente. Pour avoir la chaleur latente, il faut retrancher de la chaleur totale λ , la quantité vT , ou $0,305 t$, ce qui donne $l = \lambda - vT = 606,5$; et l'on voit que la *chaleur latente, calculée comme il vient d'être dit, est constante*. C'est l'énoncé de la loi de Southern; mais au fond la loi est différente, la chaleur spécifique de la vapeur étant prise en considération. Ce résultat est d'une grande simplicité; reste à savoir s'il s'applique aux autres liquides. M. Legendre remarque enfin que le chiffre de la chaleur latente ainsi évalué dépend du point de départ adopté pour compter les températures.

Voici les résultats trouvés par M. Regnault :

TEMPÉ- RATURE.	TENSION en millimètres.	CHALEUR totale.	TEMPÉ- RATURE.	TENSION en atmosphères.	CHALEUR totale.
0°	4 ^{mm} ,60	606,5	120°	1 atm., 962	643,1
10	9,16	609,5	130	2,671	646,1
20	17,39	612,6	140	3,576	649,2
30	31,55	615,7	150	4,712	652,2
40	54,91	618,7	160	6,120	655,3
50	91,98	621,7	170	7,644	658,3
60	148,79	624,8	180	9,929	661,4
70	233,09	627,8	190	12,425	664,4
80	354,64	630,9	200	15,380	667,5
90	525,15	633,9	210	18,848	670,5
100	760,00	637,0	220	22,882	673,6
110	1075,37	640,0	230	27,535	676,6

1185. Applications de la chaleur de vaporisation de l'eau. — Un gramme d'eau exige 537 calories pour se vaporiser à 100°, et la vapeur formée cède cette même quantité de chaleur pour se condenser. Il résulte de là qu'en transportant la vapeur par des tuyaux, dans des vases où on la condense, on

transporte en même temps la chaleur qu'on a fournie pour la produire. C'est sur ce principe qu'est fondé le chauffage par la vapeur.

Le système d'appareils destiné à chauffer les différentes parties d'un édifice, par ce moyen, se compose : 1° d'une chaudière à vapeur, disposée comme celle des machines à vapeur ; 2° des tuyaux dans lesquels doit circuler la vapeur ; 3° de récipients à grande surface destinés à la condenser, et à transmettre au dehors la chaleur qu'elle abandonne. On donne aux tuyaux une pente convenable pour que l'eau qui s'y condense revienne à la chaudière. Il faut éviter surtout que ces tuyaux présentent des courbures en forme de siphon renversé ; car l'eau s'y accumulerait, et le passage serait obstrué. A la partie supérieure sont des robinets ou *souffleurs*, destinés à laisser échapper l'air, quand on met l'appareil en train. Le palais de l'Institut, la Bourse, à Paris, sont chauffés avec des appareils à vapeur qui peuvent être cités comme des modèles.

On emploie souvent la vapeur, dans différentes industries, pour chauffer de grandes masses liquides avec un seul foyer. Tantôt la vapeur traverse un serpentín métallique qui parcourt les différentes parties de ce liquide, qui peut alors être renfermé dans des vases de bois ; tantôt elle circule, dans une double enveloppe, autour de la surface extérieure de vases métalliques. Indépendamment de la facilité de pouvoir chauffer plus régulièrement que par tout autre moyen, et de distribuer à volonté dans plusieurs appareils la chaleur produite par un seul foyer, on trouve encore dans ce système, l'avantage d'être sûr que la température ne dépassera pas celle qu'on donne à la vapeur.

1186. Chaleurs de volatilisation des divers liquides. — Despretz a déterminé, par le moyen que nous avons décrit (1181), la chaleur latente d'élasticité de l'alcool, de l'éther et de l'essence de térébenthine. Il a trouvé les nombres 331,9, 174,5 et 166,2. Il a remarqué que les liquides dont les vapeurs ont la plus forte densité, sont ceux qui exigent le moins de chaleur pour se volatiliser. Des essais tentés sur les vapeurs de sulfure de carbone et d'iode ont conduit à la même conséquence. M. Brix a, de son côté, expérimenté sur divers liquides.

Calorimètre à mercure. — MM. Fabre et Silbermann ont appliqué leur calorimètre à mercure (1061) à l'évaluation de la chaleur de volatilisation de divers liquides. Pour faire cette application, on fait passer dans le moufle garni de son éprouvette de verre, une certaine quantité de vapeur, au moyen de la pipette courbe (*fig. 763, p. 264*), dans laquelle le liquide est en ébullition, et qu'on laisse dans la position *c*, pendant que l'extrémité *n* est bouchée. Le poids et la température finale du liquide condensé dans le moufle étant connus, ainsi que sa chaleur spécifique, on déduit du nombre de calories gagnées par le calorimètre, la chaleur abandonnée par la vapeur.

Voici quelques-uns des résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann :

LIQUIDES	TEMPÉRATURE d'ébullition.	CAPACITÉS	CHALEUR de volatilisation.
Eau.....	100°	1	535,77
Bicarbure d'hydrogène.....	200 à 210°	0,494	59,91
Esprit de bois.....	66°,5	0,671	263,8
Alcool vinique.....	78	0,644	208,9
Alcool amylique.....	»	0,587	121,3
Alcool éthérique.....	»	0,506	58,5
Éther sulfurique.....	38	0,503	91,1
Éther acétique.....	74	0,483	105,8
Butyrate de méthylène.....	93	0,492	87,3
Essence de térébenthine.....	157	»	69

1087. Chaleur de volatilisation des gaz liquéfiés. — M. Regnault a fait de nombreuses expériences sur la chaleur de volatilisation des liquides provenant de la condensation de 8 gaz différents, bouillant, de -12° à -82° . Malheureusement, la plus grande partie des registres contenant les nombreuses observations laborieusement recueillies dans ces expériences, a été détruite pendant la fatale guerre de 1870. Le laboratoire admirablement outillé qu'il avait établi, à Sèvres, dans la nouvelle manufacture de porcelaine, fut saccagé par les Prussiens, les appareils brisés, les registres d'observations brûlés ou lacérés, malgré les ordres donnés par les autorités militaires allemandes. Cependant, les procès-verbaux d'une partie des expériences faites sur l'*ammoniaque* et sur l'*éther chlorhydrique de l'alcool*, ont pu être retrouvés dans les décombres. Mais tout ce qui se rapporte à l'*acide sulfureux*, aux deux *éthers de l'esprit de bois*, à l'*hydrogène sulfureux*, a été complètement perdu. Une partie des expériences relatives à l'*acide carbonique* avait heureusement été publiée avant la catastrophe, ainsi que la description d'une partie des appareils si brutalement détruits.

Appareils. — La figure 834 représente un des appareils employés dans ces expériences. CC, C'C' sont deux calorimètres contenant environ 2^k d'eau. Chacun d'eux est muni d'un bon thermomètre et d'un agitateur mu régulièrement. Le liquide provenant de la condensation du gaz est contenu dans un fort cylindre de laiton L, d'où la vapeur à saturation passe dans deux cylindres l, l', munis de cloisons échancrées, e, qui la forcent à cheminer suivant des hélices, de manière qu'elle se mette en équilibre de température avec l'eau du calorimètre. Un manomètre communiquant avec le tube f fait connaître la pression de cette vapeur, qui se détend ensuite dans le cylindre D, dont la capacité est de 269^{cc},6, et sort en a à peu près sous la pression de l'atmosphère.

Voici la marche de l'opération : Le système Ll' est retiré du calorimètre CC , plongé dans un mélange réfrigérant liquide, et mis en communication par le tube R avec l'appareil d'où arrive le gaz ; la vis v étant serrée, le gaz se liquéfie en L . Quand le cylindre L est à peu près plein, on ferme le robinet R , et l'on porte le système à la température ambiante, en le plongeant dans de l'eau, on l'en retire ensuite, et on le suspend, essuyé et desséché, à l'un des bassins d'une balance que l'on met en équilibre ¹. — On rétablit ensuite le système dans le calorimètre CC , on attend qu'il en ait pris la température, et l'on observe les thermomètres pendant 10^m , pour les corrections relatives aux pertes extérieures de chaleur, pertes qu'on atténue au moyen d'écrans enveloppant tout l'appareil. On retire alors la vis v , le gaz se précipite par un orifice en minces parois, o ,

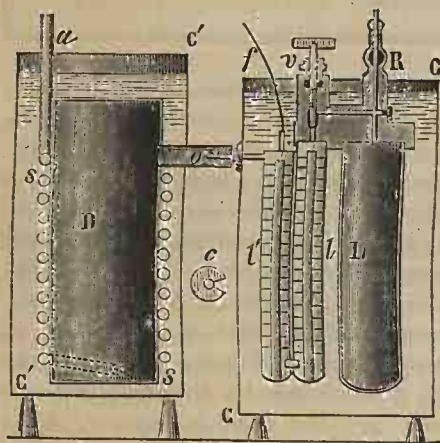


Fig. 834. — $\frac{1}{6}$.

dans le cylindre D , où il se détend, parcourt le serpentin ss , dans lequel il prend la température du calorimètre $C'C'$ et sort à peu près à la pression atmosphérique, par le tube a qui l'amène dans un compteur.

Quand tout le liquide est évaporé, ce que l'on reconnaît au compteur, on continue d'observer les thermomètres de minute en minute et pendant 10^m pour être certain que l'équilibre de température existe dans toutes les parties de chaque calorimètre, puis on observe pendant 10 autres minutes, pour la correction relative aux pertes extérieures. On retire de nou-

veau le système Ll' , on le dessèche et on le reporte sous la balance. Les poids qu'il faut ajouter pour retrouver l'équilibre, représentent le poids du gaz liquéfié, et du gaz saturé qui achève de remplir le cylindre L sous la pression correspondant à la température du calorimètre, tension donnée par les formules empiriques (1178).

Soit M la masse d'eau représentée par le premier calorimètre, θ et θ' les températures qu'il possède au commencement et à la fin de l'expérience, et $\Sigma\theta$ l'abaissement de température qu'il éprouve corrigée des influences extérieures ; la quantité de chaleur qu'il aura perdue sera $M \cdot \Sigma\theta$. Si l'on suppose que le gaz

¹ Dans les expériences sur l'acide carbonique, le gaz passait de L dans le cylindre l , puis dans un serpentin qui l'amenait en o ; mais l'appareil ayant fait explosion, on a adopté dans celui qui l'a remplacé les cylindres à cloisons, l, l' , plus faciles à dessécher, pour les posées.

s'échappe constamment à la température moyenne $m = \frac{1}{2}(0 + 0')$, cette quantité de chaleur se composera de la chaleur de volatilisation du gaz liquide, sous une pression moyenne F_m correspondant à la température moyenne, m , et de la chaleur q dépensée pour expulser le gaz saturé qui surmonte le liquide au commencement de l'expérience. On aura donc

$$Q = M \cdot \delta\theta - q$$

pour représenter la quantité Q de chaleur absorbée par le poids de gaz liquide, pour se refroidir de 0 à $m = \frac{1}{2}(0 + 0')$, puis pour se transformer en vapeur saturée conservant cette température m et la tension F_m , et faisant le travail nécessaire pour prendre le volume qui lui appartient dans ces conditions. En divisant Q par le poids du liquide, on aura la chaleur de volatilisation du gaz liquéfié.

Il y aurait à tenir compte de la chaleur cédée au calorimètre par le liquide, en descendant de 0 à $\frac{1}{2}(0 + 0')$, ce qui exigerait que l'on connût la capacité calorifique du gaz liquéfié. Ces expériences exigent encore que l'on connaisse la valeur de plusieurs autres termes inconnus et elles comportent bien des incertitudes. La température du liquide, qui se volatilise est presque toujours au-dessous de celle du calorimètre à cause du froid produit par la vaporisation. La vis v (fig. 834), en permettant de régler la pression, donne le moyen d'atténuer cette cause d'erreur en modérant la sortie du gaz. En outre, le liquide bout par soubresauts, ce qui fait que la température éprouve de notables oscillations. L'évaluation de la quantité q exige aussi des tâtonnements et l'emploi de formules empiriques incertaines sous d'aussi fortes pressions. Les effets produits dans le second calorimètre, ont permis d'élucider quelques uns de ces points obscurs. Il faut voir dans les Mémoires de M. Regnault avec quelle sagacité il se meut à travers toutes ces difficultés, qu'il parvient à vaincre ou à tourner, en perfectionnant des appareils, et recommençant sans cesse les expériences avec une persévérance admirable, dont la destruction de son laboratoire a si malheureusement anéanti les fruits.

Voici, pour terminer, les résultats moyens déduits des observations sauvées des décombres, relatives à trois des huit substances étudiées par M. Regnault :

	Acide carbonique.	Ammoniaque.	Éther chlorhydrique.
Calories.....	39,53	260,4	100,09
Pressions.....	23836 ^{mm}	4923 ^{mm}	1041 ^{mm}

Les deux derniers nombres représentent les *chaleurs totales* de volatilisation (1184), et le premier, seulement la chaleur latente.

III. Mesure de la densité des vapeurs.

1188. Méthode de Gay-Lussac. — Nous avons vu (1050) combien il est important pour les usages de la chimie, de connaître la densité des corps à l'état de gaz ou de vapeur. Quand ils ne se présentent pas naturellement à l'état gazeux, il faut chercher la densité de leur vapeur. Gay-Lussac a procédé en retournant le problème : au lieu de déterminer le poids d'un volume connu, il mesure le volume occupé par un poids donné de vapeur, par le moyen suivant : Une éprouvette graduée *c* (fig. 835), remplie de mercure sec, est renversée sur

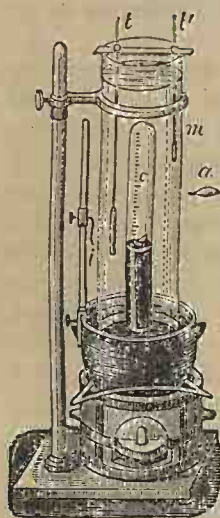


Fig. 835. — $\frac{1}{12}$.

du mercure contenu dans une chaudière. On connaît le volume qui correspond à chaque division. On y fait passer une petite ampoule de verre *a*, remplie de liquide purgé d'air par l'ébullition et pesé avec soin. L'ampoule monte à la partie supérieure de l'éprouvette, qu'on entoure ensuite d'un manchon de verre *m*, enfoncé dans le mercure de la chaudière, et qu'on remplit d'eau ou d'huile. On chauffe la chaudière, la chaleur se transmet dans toutes les parties de l'appareil, et l'ampoule est brisée par la dilatation du liquide qu'elle contient. Alors la tension de la vapeur produite fait baisser le mercure dans l'éprouvette. On attend que tout le liquide soit réduit en vapeur, la surface du mercure n'étant plus mouillée et la tension de la vapeur étant moindre que le maximum qui correspond à la température. Cette tension se mesure en retranchant de la hauteur du baromètre, la colonne de mercure ramenée à zéro, qui s'élève dans l'éprouvette. On mesure cette colonne au moyen de la pointe *i*, qu'on amène successivement dans le plan du niveau du mercure dans l'éprouvette et dans la chaudière.

(Aujourd'hui, on emploie le cathétomètre, en s'aidant d'une pointe à vis affleurant le niveau de la cuvette). La température est donnée par plusieurs thermomètres *t*, *t'*, placés à différentes hauteurs dans le manchon, dont on agite le liquide. Quand cette température est fixe, on observe, sur la division de l'éprouvette, le volume occupé par la vapeur. Soit *v* le volume donné par la division ; le volume réel est $v(1 + KT)$, *T* étant la température et *K* le coefficient de dilatation du verre. Ce volume est celui d'un poids connu de vapeur à la température *t* et sous la pression *h* ; en le divisant par le poids d'un même volume d'air sous la même pression et à la même température, on obtient la densité de la vapeur par rapport à l'air. Gay-Lussac a trouvé ainsi, pour la vapeur d'eau, le nombre 0,6235, ou environ $\frac{5}{8}$.

Despretz a mesuré la densité de la vapeur de divers liquides, au moyen d'un tube barométrique portant à sa partie supérieure un robinet, auquel il adaptait un ballon vide. Le liquide introduit dans l'appareil formait de la vapeur dont on mesurait la pression. En la comparant à celle d'un baromètre à vapeur contenant un excès de liquide, on pouvait reconnaître si, dans le tube surmonté du ballon, tout le liquide était réduit en vapeur. On pesait ensuite le ballon, et on comparait son poids à celui du même ballon vide, dont la capacité avait été déterminée d'avance. On pouvait obtenir ainsi le poids d'un volume connu de vapeur sous une pression et à une température données.

1189. Méthode de M. Dumas. — Ces deux méthodes ne peuvent être employées quand la température nécessaire pour volatiliser le corps est trop élevée. La méthode de M. Dumas permet d'opérer à de hautes températures; elle consiste à remplir de vapeur un ballon dont la capacité est connue, et à évaluer le poids de cette vapeur, poids que l'on divise ensuite par celui d'un même volume d'air dans les mêmes circonstances. Le ballon B (fig. 836), présente une longue pointe effilée à la lampe. Après l'avoir bien lavé et desséché, et pesé plein d'air, on y introduit une certaine quantité de la substance dont on veut étudier la vapeur. On plonge ensuite ce ballon et on le maintient dans un bain formé d'eau, de dissolutions salines, d'huile, ou d'alliages plus ou moins fusibles, suivant la température à laquelle on veut le porter. Un thermomètre à poids t , ou un thermomètre à air, donne la température du bain. La vapeur formée sort par la pointe effilée, sous l'apparence d'un petit nuage que l'on surveille. Tout l'air est entraîné hors du ballon, et bientôt la sortie de la vapeur cesse, ce qui indique qu'il ne reste plus de substance à vaporiser, et que le ballon est rempli de vapeur sous la pression atmosphérique P , et à la température du bain T . On ferme les ouvertures du fourneau, ou l'on retire le feu lorsque la température est encore un peu au-dessus de celle que l'on veut obtenir, les variations deviennent très-lentes, et bientôt il s'établit un état stationnaire. On ferme alors au chalumeau la pointe effilée. Le ballon étant refroidi, on le pèse, et l'on déduit du résultat, le poids de la vapeur qui le remplissait sous la pression P et à la température T , poids égal à la différence des poids obtenus avant et après l'expérience, augmentée du poids de l'air qui remplissait le ballon lors de la première pesée; comme nous l'avons vu en parlant de la mesure de la densité d'un gaz renfermé dans un flacon (1045). Le volume de ce poids de vapeur était, à la température T , $V(1 + KT)$, en désignant par V et K le volume du ballon 0° et le coefficient de dilatation du verre. Il reste à diviser le poids de la vapeur par celui d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions.



Fig. 836.

Comme il pourrait rester un peu d'air dans le ballon, il est bon, à la fin de l'expérience, de briser sa pointe sur le mercure qui doit le remplir entièrement. S'il restait une bulle d'air, on la transvaserait dans une éprouvette graduée remplie de mercure, et l'on mesurerait son volume, d'où l'on déduirait son poids, que l'on retrancherait de celui de la vapeur.

Voici quelques-uns des résultats obtenus par Gay-Lussac et par M. Dumas :

SUBSTANCES	DENSITÉ DES VAPEURS	POINT D'ÉBULLITION	
Eau.....	0,6235	100	D'après Gay-Lussac.
Acide cyanhydrique.....	0,9476	26,50	
Alcool.....	1,6138	11	
Éther chlorhydrique.....	2,219	36	
Éther sulfurique.....	2,5860	36	
Sulfure de carbone.....	2,6447	47	
Essence de térébenthine.....	5,0130	157	
Éther iodhydrique.....	5,4649	65	
		Poids d'un litre	
Vapeur d'iode.....	8,716	118°,323	D'après M. Dumas.
Vapeur de soufre.....	6,55	8,489	
Vapeur de mercure.....	6,976	9,0625	
Vapeur de phosphore.....	4,32	»	
Protochlorure de phosphore.....	4,875	6,3532	
Hydrogène arséniqué.....	2,695	3,5023	
Protochlorure d'arsenic.....	6,3006	8,1852	
Chlorure de silicium.....	5,939	7,7154	
Acide fluorique silicé.....	3,600	»	
Chlorure de bore.....	2,942	5,1212	
Acide fluoborique.....	2,3124	»	
Perchlorure d'étain.....	9,1997	11,9514	
Perchlorure de titane.....	6,836	8,881	

1190. Cas des très-hautes températures. — Quand la température doit dépasser 400°, la méthode de M. Dumas présente de grandes difficultés. Mitscherlich a alors imaginé une disposition qui permet d'opérer jusqu'à 600°, et que M. Regnault a réalisée en y apportant divers perfectionnements, dans l'appareil suivant : Deux gros tubes identiques *ba* *b'a'* (fig. 837), en verre très-réfractaire, sont maintenus l'un à côté de l'autre par trois disques verticaux de tôle. Le premier, *ba*, contient de l'air sec, et constitue un pyromètre muni d'un robinet *r*, et peut se séparer de son manomètre *iR*; le second, *b'a'*, contient la matière à vaporiser. Ces deux tubes sont introduits dans un double manchon de tôle enveloppé lui-même d'un cylindre de fonte placé sur une grille arrondie et entouré de charbons ardents, de manière à bien égaliser la température.

Quand la vapeur cesse de sortir en *f*, on scelle à la lampe le tube capillaire *e'*, on ferme le robinet *r* et l'on retire les tubes, du manchon. Quand ils sont refroidis, on porte le tube pyrométrique *ab* à 0°, et on le fait communiquer avec le manomètre *iR*, pour déterminer la température du moment où l'on a fermé le robinet *r*, et l'on achève l'opération comme ci-dessus (1189).

MM. H. Sainte-Claire Deville et L. Troost ont expérimenté à des températures de plus de 1000°¹. Pour produire de semblables températures, ils ont eu recours à l'ébullition de divers liquides, mercure, soufre,

chlorure de zinc, cadmium et zinc, qui bouillent à 860° et 1040°. Au-dessus de 800° le ballon de verre était remplacé par un ballon de porcelaine de Bayeux, qui ne se ramollit pas à des températures de plus de 1200°.

Le ballon, B (fig. 838), était placé dans un cylindre de fer contenant la matière en ébullition, et fermé par un couvercle de tôle que traversait le col du ballon. Un diaphragme cylindrique de tôle D, préservait le ballon du rayonnement des parois. On chauffait soit à la flamme du gaz, soit au charbon. Les vapeurs du liquide en ébullition se condensaient dans le tube T, et coulaient au dehors.

L'expérience se fait comme dans la méthode de M. Dumas. Quand on opère dans un ballon de porcelaine, le col étroit est fermée par un bouchon conique qui laisse échapper la vapeur, et quand elle cesse de se dégager, on fond le bouchon au chalumeau à oxygène et hydrogène. Comme la température est constante, il n'est pas nécessaire de la

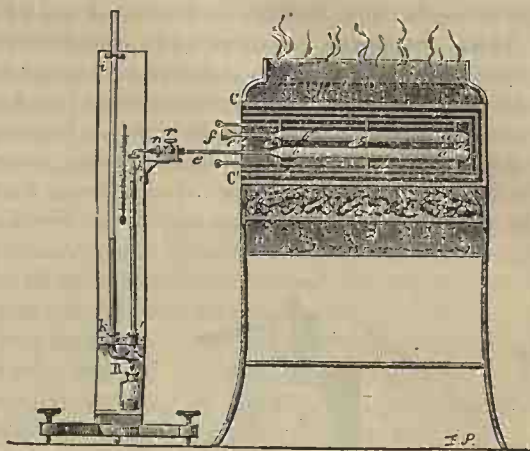


Fig. 837.

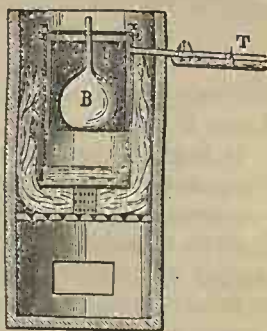


Fig. 838.

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. LVIII, p. 257.

connaître pour obtenir la densité par rapport à l'air; il suffit de peser le même ballon rempli successivement de vapeur et d'air. Mais comme l'air très-dilaté n'a qu'un poids très-faible, on lui a substitué la vapeur d'iode, dont la densité est 8,716, et qui est tellement éloignée du point d'ébullition qu'on peut admettre que son coefficient de dilatation est constant et égal à celui de l'air.

1191. Densité de la vapeur d'eau sous différentes pressions. — La méthode de Gay-Lussac donne la densité de la vapeur au-dessous de la tension maximum; celle de M. Dumas la donne près de l'état de saturation. Si l'on veut passer des nombres ainsi obtenus, ou bien de la densité théorique, à la densité à une température et sous une pression différentes, on a coutume d'appliquer les lois de Mariotte et de Gay-Lussac; alors la densité d'une vapeur par rapport à l'air pris dans les mêmes conditions est regardée comme constante, quelle que soit

la température, pourvu qu'il n'y ait pas saturation. Or nous avons vu (1034) que ces lois sont sensiblement en défaut pour les gaz qui sont près de leur point de liquéfaction, et c'est le cas des vapeurs qui sont peu éloignées de la saturation.

Quand la tension est maximum, il est évident que, la masse de vapeur contenue dans un espace augmentant avec la température, la densité par rapport à l'eau doit aussi augmenter. Mais comment change la densité *par rapport à l'air* placé dans les mêmes conditions? C'est ce qu'on ne peut décider que par l'expérience; car, si le poids d'un volume d'air diminue quand il s'échauffe, ce poids

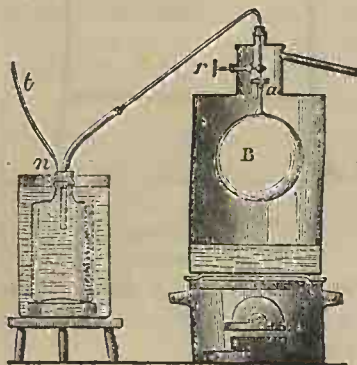


Fig. 839.

augmente avec la pression, qui doit toujours être prise égale à celle de la vapeur à saturation.

M. Regnault a fait beaucoup d'expériences à ce sujet, dans ses recherches sur l'hygrométrie¹. Il a d'abord déterminé la densité de la vapeur d'eau à 100°, sous des pressions de plus en plus faibles, au moyen de l'appareil (fig. 839). B est un ballon de 10 litres environ, portant une pièce de laiton a, à robinet r. Après y avoir introduit un peu d'eau, on en pompe l'air pendant longtemps; il se forme de la vapeur, qui est absorbée dans un tube rempli de ponce sulfurique; bientôt, tout l'air est chassé du ballon, et l'on ferme le robinet r. Le ballon est ensuite installé dans une étuve à ébullition, et mis en communication avec un flacon n, entouré d'eau à la température ambiante, et communiquant par le tube t avec un manomètre barométrique (1048). On raréfie l'air du flacon, et quand l'eau est en ébullition dans l'étuve, on ouvre le robinet r. L'eau du

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XV, p. 141.

ballon B distille alors et vient se condenser dans le flacon. Au bout d'une heure, on mesure la pression, et l'on ferme le robinet r. On sépare ensuite le tube du ballon, de celui du flacon; on dessèche le premier, et l'on pèse le ballon, en prenant toutes les précautions indiquées dans la mesure de la densité des gaz (1048). On répète ensuite l'expérience en raréfiant beaucoup plus l'air du flacon. La différence P des poids du ballon, dans les deux expériences, donne le poids de la vapeur qui le remplit sous une pression égale à la différence h des forces élastiques observées, et à la température T de l'étuve. En représentant par p le poids de l'air sec qui remplirait le ballon à 0° et sous la pression de 760^{mm}, par a et K, les coefficients de dilatation de l'air et du verre, la densité de la vapeur sera
$$d = \frac{P}{p} \cdot \frac{1 + aT}{1 + KT} \cdot \frac{760}{h}.$$

Cette méthode a conduit sensiblement à la densité trouvée par Gay-Lussac, pour les pressions de la vapeur suffisamment éloignées de 760^{mm}; mais pour les pressions voisines de 760, les valeurs ont été plus fortes.

M. Regnault a encore procédé par une méthode plus précise, au moyen de l'appareil de la figure 829, p. 397. La capacité du ballon et le poids de l'eau que contient l'ampoule de verre ayant été évalués avec soin, on procède comme pour mesurer la tension de la vapeur (1174).—Tant que la température est inférieure à celle qui serait nécessaire pour saturer l'espace au moyen du poids p d'eau de l'ampoule, la force élastique n'est autre que la tension maximum correspondant à cette température; mais si l'on chauffe davantage, la vapeur se comporte comme un gaz, et si f est sa force élastique, sa densité est donnée par la formule
$$d = \frac{P}{\pi} \cdot \frac{1 + aT}{1 + KT} \cdot \frac{760}{f},$$
 dans laquelle π est le poids de l'air à 0° et à 760^{mm} qui remplirait l'espace occupé par la vapeur dans le ballon et dans le tube manométrique t (fig. 829).

M. Regnault a trouvé, par ce moyen, que la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air à la même température, dans le vide ou sous de faibles pressions, peut se calculer au moyen de la loi de Mariotte, pourvu que le rapport entre sa force élastique et celle qui aurait lieu à saturation à la même température, ne dépasse pas 0,8. Mais quand on approche davantage de la saturation, la densité est notablement plus forte que celle que l'on calcule ainsi. Les vapeurs, dans le voisinage du maximum de tension, se compriment donc plus que ne l'indique cette loi; résultat d'accord avec celui que donnent les gaz faciles à liquéfier. M. Regnault remarque que le résultat pourrait provenir de ce que le verre retient de l'eau condensée en proportion d'autant plus grande que le point de saturation est plus rapproché; mais comme d'autres liquides montrent un semblable accroissement rapide de densité près du point de saturation, on peut admettre qu'une partie au moins de l'accroissement observé sur la vapeur d'eau est réel. MM. W. Fairbairn et T. Tate, ont constaté de leur côté l'augmentation rapide de la densité de la vapeur d'eau quand on s'approche de l'état de saturation, qu'ils ont considéré entre 58° et 144°.

1192. Densité de la vapeur d'eau dans l'air saturé. — Les expériences qui précèdent ont été faites dans le vide. Il est important surtout pour l'hygrométrie de savoir si la densité de la vapeur qui saturé un espace plein d'air est la même à toute température, c'est-à-dire si elle conserve toujours le même rapport avec la densité de l'air pris à cette même température. Des expériences de M. Schmeddink pouvaient faire croire que ce rapport augmentait avec la température. M. Regnault est arrivé à un tout autre résultat.

Dans le cas des températures ordinaires de l'atmosphère, M. Regnault emploie l'appareil (fig. 840). L'air, appelé dans un vase aspirateur dont on ouvre le robinet inférieur R, s'humecte en traversant le ballon *o* rempli d'éponges mouillées, et passe dans le manchon en fer-blanc *ac* posé sur une assiette pleine d'eau. Dans l'intérieur se trouve un second manchon en toile métallique T,

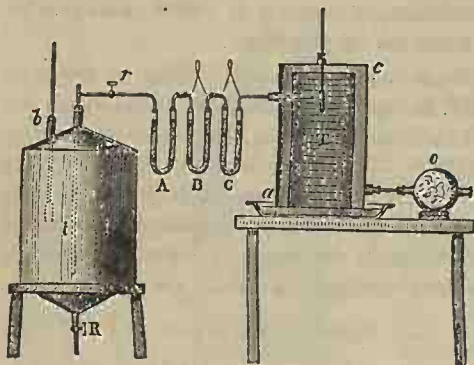


Fig. 840.

enveloppé extérieurement et intérieurement d'un linge mouillé baignant dans l'eau de l'assiette. Un thermomètre central est observé de 5 en 5 minutes; la moyenne de ses indications est prise pour la température de l'air. Cet air, complètement saturé, traverse ensuite deux tubes B et C remplis de fragments de pierre ponce imbibés d'acide sulfurique, où il dépose son humidité. Le tube A est destiné à arrêter l'humidité qui pourrait

venir du vase aspirateur. Après l'expérience, l'augmentation de poids des tubes B et C représente le poids de vapeur contenu dans le volume d'air qui a traversé l'appareil. Ce volume est égal à celui du vase aspirateur, qui a été jaugé avec soin par des pesées, et dont la température est donnée par le thermomètre *b*.

Pour les températures supérieures à celles de l'atmosphère, l'air aspiré, après avoir traversé un vase plein d'eau à une température voisine de celle à laquelle on veut opérer, passe, par un tube de fer-blanc *ac* (fig. 841), dans le double manchon V, plongé dans un bain continuellement agité et entretenu à une température constante au moyen d'une lampe à alcool. Au moment où commence l'aspiration, le thermomètre intérieur baisse de quelques dixièmes de degré, il y a condensation d'un peu de vapeur, et l'on voit quelques gouttelettes se déposer à l'origine du premier tube desséchant, ce qui fait que son poids est un peu trop fort.

Pour opérer à la température de 0°, on fait entrer l'air par l'extrémité *b* d'un tube *ab* (fig. 842) entouré de glace fondante, que ce gaz traverse. En *c* est adapté le premier tube à ponce sulfurique.

Calcul de la densité. — Pour déduire la densité de la vapeur, des résultats de ces expériences, on calcule le poids de cette vapeur, en partant de son volume et de sa densité dans le vide à la même température, et on l'égalé au poids de l'eau retenue par les tubes en U. Soit V le volume de l'aspirateur à 0° , t' sa température à la fin de l'expérience, t la température moyenne de l'air introduit, f et f' les forces élastiques de la vapeur d'eau à saturation aux températures t et t' . Le volume de l'air introduit dans l'aspirateur sera, en appelant k son coefficient de dilatation, $V(1 + kt')$. La température de cet air est t' , et sa pression, $\Pi - f'$, en représentant par Π celle de l'atmosphère. A la température t et sous la pression $\Pi - f$ que possède l'air dans le manchon, son volume serait $V' = V(1 + kt) \frac{\Pi - f'}{\Pi - f} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}$. En le multipliant par la densité de la vapeur à la température t et sous la pression f , on aura pour le poids d'un volume égal de vapeur,

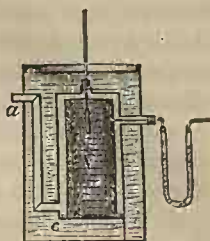


Fig. 841.

$$V' \cdot p \delta \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{760}, \quad \text{ou} \quad V(1 + kt') \frac{\Pi - f'}{\Pi - f} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t'} \cdot p \delta \frac{f}{760};$$

p étant le poids de 1^e cube d'air à 0° et 760^{mm} , et δ la densité de la vapeur par rapport à l'air.

En égalant la valeur ainsi calculée, au poids trouvé par l'expérience, on a une équation d'où l'on tire la valeur de δ .

M. Regnault a encore procédé autrement : il a calculé, au moyen de la formule précédente, le poids de la vapeur, en prenant pour sa densité le nombre 0,622, c'est-à-dire la densité théorique telle que nous allons la définir (1193), et il a comparé ce poids à celui que donne l'expérience directe. — En opérant ainsi, le poids calculé s'est toujours trouvé un peu plus fort que l'autre, et toujours de la même fraction du poids total, à fort peu près; fraction du reste très-petite et ne s'élevant qu'à 0,01 environ. On conclut de là que la densité de la vapeur à saturation dans l'air aux basses températures, peut se calculer d'après la loi de Mariotte, comme celle de l'air à laquelle on la compare, et que le rapport du poids de la vapeur à celui d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions de température et de pression est un peu plus faible que la densité théorique de la vapeur. Cette dernière circonstance pourrait provenir de ce que les valeurs de f et f' ont été prises dans le vide; or nous savons qu'elles sont un peu plus fortes que les tensions dans l'air (1142).

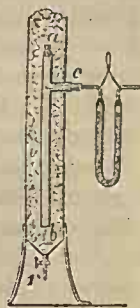


Fig. 842.

1193. Densités des vapeurs de diverses substances. — Il était nécessaire, pour les besoins de la chimie, d'opérer sur d'autres vapeurs que

celle de l'eau. En effet, la densité de la vapeur des corps composés peut se calculer au moyen de la loi de Gay-Lussac sur la composition des gaz (1050). Par exemple, 2 volumes d'hydrogène pesant 0,1382, et 1 volume d'oxygène, pesant 1,1055, produisent deux volumes de vapeur d'eau, dont la densité doit être, par conséquent, la demi-somme de ces poids, ou 0,6218, nombre qui diffère à peine de 0,6235 trouvé par Gay-Lussac. Dans certains cas, on hésite sur le nombre de volumes à attribuer à la vapeur du composé formé; alors sa densité peut décider la question; mais il faudrait savoir à quelle distance du point de saturation cette densité doit être prise, ou à partir de quelle température elle devient constante. On a donc été conduit à mesurer les densités à différentes distances du point de saturation.

M. Bineau a fait des expériences sous diverses pressions, sur les vapeurs d'*acide formique* et d'*acide acétique*, et il a constaté le décroissement de la densité par rapport à l'air, quand on s'éloigne du point de saturation. M. Cahours¹ opérant par la méthode de M. Dumas sous la pression atmosphérique, mais à différentes températures, a reconnu aussi que la densité diminue quand la température s'élève, ce qui a été confirmé par M. H. Herwig sur les vapeurs d'*alcool*, de *chloroforme* et de *sulfure de carbone*. Pour l'*eau*, l'*éther*, l'*alcool* et ses *congénères*, la densité trouvée par M. Cahours s'accorde avec la densité théorique quand on s'éloigne de 30 à 35° du point d'ébullition. Pour l'*acide acétique*, dont la densité théorique est 2,09, on a trouvé 3,20, à 125°; et 2,08, à 250°, température à partir de laquelle la densité reste constante. La densité du *perchlorure de phosphore* n'est sensiblement constante qu'à partir de 300°, celle de l'*acide butyrique* à 261°; celle de l'*essence d'anis* diminue encore un peu à 338°; elle est alors égale à 5,19, la densité théorique étant 5,18.

MM. H. Sainte-Claire Deville et L. Troost ont fait aussi beaucoup d'expériences sur des substances ne bouillant qu'aux températures les plus élevées, par la méthode décrite ci-dessus (4190). Voici quelques-uns des résultats obtenus : L'*iode* a donné pour densités, aux températures d'ébullition du soufre, du cadmium et du zinc, c'est-à-dire à 440°, 860° et 1040°, les nombres 8,70; 8,70; 8,71. La vapeur de *soufre*, qui a pour densité 6,6 vers 500°, a donné 2,23 à 860° et 1040°, et celle du *sélénium*, 7,67 et 6,37 aux mêmes températures. On voit, pour ces deux derniers corps, combien il était important d'opérer à de hautes températures pour pouvoir comparer les résultats aux densités théoriques. Voici quelques autres résultats obtenus à 440° :

<i>Chlorure d'aluminium</i>	<i>Bromure d'aluminium</i>	<i>Chlorure de zirconium</i>	<i>Sesquichlorure de fer.</i>
9,347	18,62	8,4	11,39.

Ces nombres étant à peine supérieurs aux densités théoriques, on peut admettre que, à 440°, la dilatation des vapeurs de ces substances est uniforme et

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XIX, p. 764; XX, 51; et XXI, 625.

égale à celle de l'air. Citons encore la vapeur de *phosphore* et celle de *cadmium*, dont les densités à 1040°, sont 4,5 et 3,94.

La vapeur de soufre présente une anomalie remarquable. En comparant, comme l'a fait M. Dupré¹, les densités de cette vapeur trouvées à 500° par M. Dumas, à 1000° par M. Bineau, à 860 et 1040° par MM. S. C. Deville et Troost, on reconnaît qu'il y a une température, entre 500 et 860°, près de laquelle le volume de la vapeur sous la pression de 760^{mm} devient rapidement triple, pour une très-faible élévation de température, comme si chaque atome de vapeur de soufre se partageait en trois.

Ajoutons que M. Hirn, en vue de contrôler certains résultats fournis par la théorie mécanique de la chaleur, a évalué les densités des vapeurs *non saturées* de l'eau, du sulfure et du bichlorure de carbone, de la benzine et de l'alcool anhydre, à des températures très-élevées, en opérant, suivant sa méthode particulière, sur de grands volumes (24 litres), de manière à rendre négligeables la plupart des corrections².

1194. Rapport entre les volumes d'un même poids de liquide et de vapeur. —

Quand on connaît la densité d'une vapeur, il est facile de calculer le volume de vapeur fourni par un volume donné de liquide. Considérons, par exemple, la vapeur d'eau : sa densité par rapport à l'air dans les mêmes conditions est $\frac{5}{8}$; en la multipliant par le poids spécifique $0,0013 \frac{273}{273 + 100}$ de l'air à 100°, on trouve à peu près $\frac{1}{1680}$ pour la densité de la vapeur d'eau à 100°, par rapport à l'eau à 4°. Les volumes d'une même masse étant en raison inverse des densités, le volume de vapeur à 100°, fourni par un litre d'eau à 4° sera de 1680 litres. Le volume augmente donc énormément dans le passage de l'état liquide à l'état gazeux, quand la pression n'est pas très-considérable. — Nous avons vu (1170) comment Cagniard de Latour a pu obtenir, sous d'énormes pressions, de la vapeur présentant une densité comparable à celle du liquide qui la produit, et occupant un volume de peu supérieur à celui de ce liquide.

Dans ses expériences faites à différentes températures sur la liquéfaction de l'acide carbonique (1170), M. F. Andrews a remarqué que la courbe dont les ordonnées représentent les volumes sous les différentes pressions, montre un abaissement rapide, au moment de la liquéfaction, d'autant moins prononcé que la température est plus élevée; et à partir de 48°, cette courbe est régulière, même au moment du passage par la pression qui produit la liquéfaction; ce qui montre la continuité dans la variation de la densité pendant le passage à l'état liquide. D'autres gaz ont donné des résultats semblables à ceux de l'acide carbonique.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. III, p. 110.

² *Exposition analytique et expérimentale de la théorie méc. de la chaleur* (1876), t. II, p. 302.

§ 4. — MACHINES A VAPEUR

I. Machines à vapeur fixes.

1195. Historique. — Une des plus belles inventions, une de celles qui ont exercé le plus d'influence sur le développement de l'industrie et de la civilisation, est sans contredit la machine à vapeur. Aussi a-t-on été fouiller jusque dans l'antiquité la plus reculée pour y trouver les indices les plus légers des connaissances que l'on pouvait avoir sur la force de la vapeur d'eau, et sur la possibilité de l'employer à produire des effets mécaniques. On a ensuite recherché avec ardeur, souvent même avec passion, les noms des inventeurs des

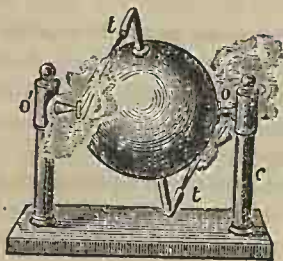


Fig. 843.

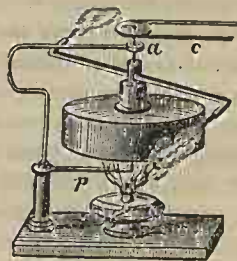


Fig. 844.

divers systèmes de machines à vapeur et de leurs principaux perfectionnements. Pendant longtemps l'Angleterre a revendiqué exclusivement pour ses nationaux l'honneur d'avoir découvert le principe et d'avoir inventé les organes les plus importants de ces merveilleux appareils. Mais le capitaine de frégate Montgéry a prouvé, dans une série d'articles publiés en 1822 et 1823, combien il en faut rabattre de ces prétentions exclusives. Depuis, un auteur anglais, Robert Stuart, mettant de côté tout esprit national mal entendu, a rendu pleine justice aux véritables inventeurs du principe de la machine à vapeur; et Arago, dans une notice célèbre publiée dans l'Annuaire du bureau des longitudes pour 1830, a établi victorieusement les droits de Papin à la découverte du moyen de faire mouvoir un piston par la force de la vapeur.

Des écrivains ont voulu faire remonter jusqu'à Héron, d'Alexandrie, 120 ans avant notre ère, l'origine des machines à vapeur. Ce philosophe décrit en effet, dans ses *Spiritualia*, un éolipyle tournant, dont la figure 843 peut donner une idée : Une sphère creuse, mobile autour d'un diamètre oo' , reçoit de la vapeur par le support creux c et le pivot foré o . Cette sphère porte deux tubes t, t , coudés dans un plan perpendiculaire à oo' ; et elle tourne par un effet de réaction,

quand la vapeur s'échappe par les orifices de ces tubes. Pour répéter commodément cette expérience, nous avons imaginé l'appareil (fig. 844) : un vase cylindrique dans lequel on fait bouillir de l'eau, tourne sur lui-même, pendant que la vapeur sort par deux tubes coudés dans un plan horizontal. Le vase est soutenu par une pointe verticale qui termine le support *p*, et est maintenu en *a* par un anneau dans lequel tourne la tige qui le surmonte.

Héron, ne prétendait attacher aucune importance au point de vue des applications possibles, à une expérience de simple curiosité. Cependant, les anciens avaient quelque idée de la force de ressort de la vapeur ; car Sénèque explique les tremblements de terre par l'expansion des vapeurs engendrées par le feu souterrain. Au onzième siècle, Agathias raconte qu'Anthémius, pour se venger de son voisin Zénon, ébranla le plafond de la chambre de ce dernier, au moyen de la vapeur sortant de grandes chaudières et amenée sous les poutres. Ces notions, où l'on ne peut aucunement trouver le germe de l'emploi de la vapeur comme force motrice, se transmettent sans modifications importantes jusqu'au dix-septième siècle. En 1605, Flurance Rivault, précepteur de Louis XIII, dans ses *Éléments d'artillerie*, dit que les éolipyles seraient brisés par l'eau convertie en air au moyen du feu, s'il n'y avait pas d'issue.

Salomon de Caus, vers 1615, dans un ouvrage d'assez peu de valeur, intitulé *les Raisons des forces mouvantes*, cite l'expérience suivante : on prend un ballon de cuivre (fig. 845), dans lequel s'enfonce un tube *t* ; on y introduit de l'eau et on le met sur le feu. Au bout de quelques instants, toute l'eau, poussée par la vapeur, jaillit par le tube *t*. Il y a loin de cette simple expérience de physique, à l'idée d'employer la vapeur pour élever l'eau, et Salomon de Caus n'y songeait guère. D'ailleurs, J. B. Porta avait décrit antérieurement un appareil au moyen duquel il obtenait le même résultat, seulement la vapeur se formait dans un vase à part. C'est donc à tort qu'on a voulu regarder Salomon de Caus comme ayant songé le premier à employer la vapeur pour élever l'eau ; il n'avait eu en vue qu'une simple expérience de curiosité, qu'il ne donne même pas comme étant de lui. Quant à certaine lettre publiée en 1834, d'après laquelle on l'a fait mourir fou dans un cabanon de Bicêtre, et dont se sont emparés les peintres et les romanciers, ce n'est qu'une invention inqualifiable d'un journaliste sans scrupule, et à court de nouvelles.

Depuis, on a fait servir le jet de vapeur de l'éolipyle à faire tourner de petites roues à palettes. Branca décrit un appareil semblable, en ajoutant qu'il peut servir à mettre en action des pilons pour broyer de la poudre. Nous trouvons là l'idée d'employer la vapeur à produire des effets mécaniques, mais par un moyen qui ne peut donner que des résultats insignifiants.

En 1663, le marquis de Worcester décrit d'une manière confuse un appareil analogue à ceux de Salomon de Caus et de Porta, au moyen duquel il propose

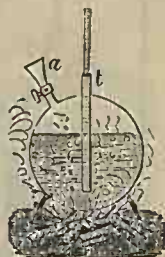


Fig. 845.

d'élever l'eau. Mais il ne paraît pas qu'il l'ait jamais exécuté, et ceux qui ont voulu, d'après sa description, en tracer un dessin, sont tous arrivés à des résultats différents. L'idée d'utiliser la force de la vapeur se trouve cependant dans cette description, mais nous avons vu qu'elle avait déjà été émise, et le marquis de Worcester ne peut pas plus être regardé comme l'inventeur des pompes à vapeur, que le P. Lana ne peut être considéré comme ayant inventé les aérostats, parce qu'il a indiqué la possibilité de s'élever dans l'atmosphère en remplissant des vases d'air raréfié, sans indiquer de moyen praticable d'exécuter cette opération (I, 474). — Rien ne pouvait donc faire pressentir, au dix-septième siècle, qu'on pourrait un jour utiliser la vapeur comme force motrice, lorsque Denis Papin, né à Blois, publia une expérience fondamentale qui contient le principe même de la machine à vapeur telle qu'on l'emploie aujourd'hui.

1196. Expériences de Papin. — Le baromètre venait d'être découvert, Otto de Guericke, par des expériences ingénieuses, et au moyen de la machine pneumatique, qu'il venait d'inventer, avait montré les effets extraordinaires de la pression atmosphérique; toutes les imaginations étaient surexcitées par la nouveauté de ces résultats, la puissance de la pression de l'air frappait surtout les esprits, on songeait de tous côtés à en tirer parti, et Otto de Guericke exécuta l'expérience curieuse que nous avons eu l'occasion de citer, par laquelle il faisait mouvoir un piston dans un cylindre, dont il avait extrait l'air (I, 408). Ayant repris cette expérience, Papin chercha les moyens de produire le vide, avec économie. Il imagina d'abord de faire mouvoir, au moyen du vent ou d'une chute d'eau, des machines pneumatiques qui auraient communiqué par de longs tuyaux avec un corps de pompe; pour faire le vide sous un piston. Il pourrait ainsi, disait-il, « transporter au loin la force des rivières. »



Fig. 846.

Il essaya ensuite, comme l'avait déjà fait Huyghens, de brûler de la poudre sous le piston, qui devait ensuite s'enfoncer sous l'effort de la pression atmosphérique, après que les gaz refroidis se seraient contractés; mais l'effet était toujours très-faible. C'est alors qu'il eut l'idée de remplir le corps de pompe de vapeur, et de la condenser ensuite par le froid.

Papin prit donc un cylindre fermé par le bas contenant un peu d'eau, et y enfonça un piston P (fig. 846), l'air s'échappant par un petit trou qu'il boucha ensuite au moyen de la tige o. Ayant alors apporté du feu sous le cylindre, l'eau entra en ébullition, et la vapeur souleva le piston jusqu'au haut du corps de pompe, où il fut arrêté par une clavette à ressort r. Le feu ayant été alors enlevé, la vapeur se condensa par le refroidissement et la clavette r ayant été retirée, le piston descendit sous l'effort de la pression atmosphérique. Le feu fut ensuite rapproché, et le piston remonta pour redescendre quand la vapeur se fut de nouveau condensée.

Cette expérience mémorable fut publiée en 1690 dans les *Actes des érudits* de Leipsick; Papin ne se contente pas de la décrire, il entre dans de longs détails sur les applications que l'on peut faire du mouvement de va et vient de son piston, soit pour mouvoir des pompes et épuiser l'eau des mines, soit pour faire marcher des *rames tournantes* adaptées à des bateaux. Les droits de Papin à l'invention des machines dans lesquelles la vapeur sert à faire mouvoir un piston dans un corps de pompe, sont donc établis d'une manière irrécusable, tant au point de vue de l'idée théorique qu'à celui des applications possibles.

On a cru longtemps que Papin s'en était tenu à de simples essais faits sur une petite échelle; mais il résulte d'une correspondance de ce savant avec Leibnitz, retrouvée récemment par M. Kuhlmann, de l'Université de Hanovre, que Papin a fait exécuter une machine à vapeur capable de faire marcher un bateau au moyen de roues à aubes¹. Il paraît que ces essais avaient eu un certain retentissement, car le comte de Sintzendorff, qui possédait en Bohême plusieurs mines inondées, demanda à Papin de venir les dessécher au moyen de son invention.

1197. Machine de Savery. — Les essais de Papin paraissaient oubliés, lorsque le capitaine Savery, en 1698, construisit la machine à élever l'eau qui porte son nom, et dans laquelle il appliqua le principe de la condensation de la vapeur pour faire le vide. La vapeur se forme dans deux chaudières (fig. 847), communiquant entre elles, et peut passer, par des tuyaux T, T', dans des réservoirs V et V', dont la partie inférieure communique avec deux tubes r's', rs munis chacun de deux soupapes. Ces tubes aboutissent par le haut à un tuyau d'ascension A, et par le bas, à un tuyau d'aspiration qui plonge dans l'eau que l'on veut élever. Un levier e sert à ouvrir ou à fermer alternativement les tubes T, T' au moyen d'une vanne o représentée à part en e'' oo'. Supposons que le tube T soit ouvert, et le tube T', fermé; la vapeur s'introduit dans le réservoir V, s'y condense d'abord en l'échauffant; puis soulevant la soupape r, qui s'ouvre de bas en haut, s'échappe en entraînant l'air qui remplit le réservoir. On ferme ensuite le tube T, et l'on projette de l'eau froide sur le réservoir V, au moyen d'un robinet e' que l'on amène au-dessus; la vapeur est condensée, la

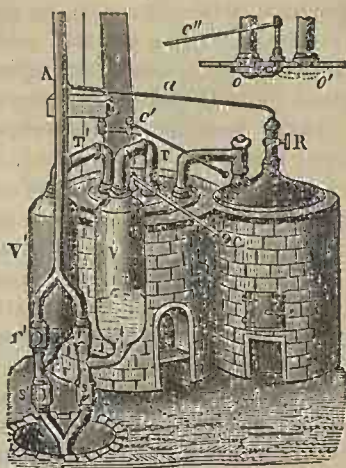


Fig. 847.

¹ On peut lire cette curieuse correspondance, entre autres, dans l'*Exposition et histoire des principales découvertes scientifiques modernes*, par M. L. Figuier, t. III.

soupape r se ferme, et la pression atmosphérique fait monter l'eau dans le réservoir V , par le tube d'ascension et par la soupape s , qui se soulève. Quand ce réservoir V est rempli d'eau, on y fait arriver de nouveau la vapeur, qui presse sur cette eau et la fait monter dans le tube d'ascension A . Le réservoir V étant alors vide d'eau et rempli de vapeur, on ferme le tube T , la vapeur est condensée par l'injection d'eau froide venue du robinet c' , et ce réservoir se remplit de nouveau d'eau; et ainsi de suite. Le réservoir V' produit le même jeu, alternativement avec le réservoir V . Le tube a et le robinet R servent à renouveler l'eau de la chaudière. On voit que l'ouvrier qui dirige la machine n'a qu'à faire mouvoir le levier e pour introduire la vapeur alternativement en V et en V' , et à faire passer le robinet c' au-dessus de l'un ou de l'autre de ces réservoirs. Dans la machine de Savery, il y a une grande perte de vapeur, provenant de la condensation des premières portions qui viennent presser sur l'eau froide. Papin a plus tard atténué cette perte, au moyen d'un flotteur en forme de caisse, dont la surface supérieure, séparée de l'eau, pouvait conserver en grande partie la chaleur que la vapeur lui avait communiquée une première fois.

1198. Machine atmosphérique. — La machine de Savery ne pouvait élever l'eau à une grande hauteur, cette hauteur dépendant de la tension de la vapeur, qui aurait dû être énorme pour les profondeurs des mines; aussi n'a-t-elle guère été employée que pour faire monter l'eau dans les jardins de plaisance, sur des terrasses. La question de l'épuisement des mines par la vapeur était donc loin d'être résolue, lorsque un artisan de Dartmouth, Newcomen, eut l'idée de se servir de pompes ordinaires, et de les mettre en mouvement au moyen du système à piston de Papin (1196). Associé avec un autre artisan, Cawley, puis avec Savery, qui était muni d'un privilège pour la production du vide par la condensation de la vapeur, il construisit, en 1710, la première machine qui ait été employée avec succès à l'évacuation de l'eau des mines.

Cette machine, connue sous le nom de *machine atmosphérique*, consiste en un corps de pompe (fig. 848) muni d'un piston P , et communiquant par le bas avec une chaudière C . La tige du piston est attachée par une chaîne, à un balancier BB , dont l'autre extrémité soutient la tige T de la pompe qu'il s'agit de faire mouvoir. Pour que cette tige et celle du piston P marchent verticalement, les chaînes s'enroulent sur des arcs B, B . Deux robinets, ou deux soupapes, r, r' , servent à faire communiquer le bas du corps de pompe, successivement avec la chaudière et avec un réservoir R contenant de l'eau que lui fournit la pompe p , mise en mouvement par la machine même. — Supposons le robinet r ouvert et r' fermé, la vapeur passe sous le piston, et pour peu que sa tension dépasse la pression atmosphérique, le piston s'élève, son poids étant contre-balancé par une charge Q placée de l'autre côté du balancier. Quand le piston est arrivé au haut de sa course, on ferme le robinet r et l'on ouvre le robinet r' ; l'eau, sortant par un grand nombre de petits orifices, jaillit à travers la vapeur, et la condense rapidement par son contact direct; le vide se fait et la pression atmosphérique fait descendre le piston avec une force qui dépend de l'étendue de sa surface.

Par exemple, si l'aire de cette surface est de 1 mètre carré, et si l'on néglige la tension de la vapeur qui reste, le piston est poussé par une force de 10,000 kil. environ, la pression atmosphérique équivalant à 1 kil. à peu près par centimètre carré (I, 370).

Dans le principe, on condensait la vapeur en faisant passer un courant d'eau froide dans une enveloppe extérieure au corps de pompe, à travers les parois duquel la vapeur était refroidie difficilement, et la machine marchait très-lentement. Un jour, les inventeurs virent le piston descendre et monter rapidement, plusieurs fois de suite, sans qu'on eût ouvert le robinet *r'*, et ils reconnurent que l'eau, dont on avait coutume de recouvrir le piston pour éviter la rentrée de l'air par les joints, passait par une fissure accidentelle du piston. Ils imaginèrent alors de condenser la vapeur par le contact direct de l'eau, en la lançant sous forme de pluie dans le corps de pompe; ce qui, en outre, le refroidit beaucoup moins, de sorte qu'il y a une grande économie de vapeur, et, par conséquent, de combustible.

L'eau introduite dans le corps de pompe est évacuée de temps en temps par le robinet *S'*. Le robinet *S* sert à renouveler celle qui devait toujours se trouver au-dessus du piston, parce que l'on ne connaissait pas alors l'art de construire des corps de pompe parfaitement cylindriques.

La manœuvre des robinets *r* et *r'* était d'abord confiée à un ouvrier. Un jour, un enfant, nommé Humphry Potter, chargé de cette tâche, imagina, pour s'en débarrasser, d'attacher aux leviers des robinets *r*, *r'*, deux cordons qu'il fixa par l'autre bout au balancier, de manière que celui-ci, en montant et descendant, faisait ouvrir et fermer ces robinets. Cette invention fut ensuite perfectionnée : l'ingénieur Beighton fixa au balancier *BB* une barre *t*, nommée *plug-frame*, munie de chevilles qui, en montant ou descendant, faisaient mouvoir les soupapes ou les robinets, par l'intermédiaire de leviers coudés *o*, *c*. La machine marcha alors d'elle-même; il n'y eut plus qu'à entretenir le feu, et à remettre de temps en temps de l'eau dans la chaudière.

1199. Condenseur de Watt. — La machine atmosphérique de Newcomen présente l'inconvénient majeur de laisser perdre la quantité notable de vapeur, qui se condense dans le corps de pompe refroidi par l'injection d'eau froide. En 1763, l'écoissais James Watt, ayant été chargé de réparer un modèle de machine de Newcomen, qui faisait partie du cabinet de physique de l'Université de

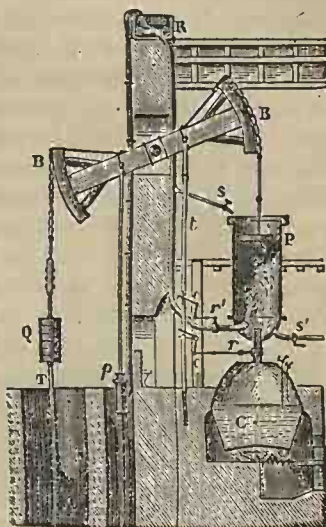


Fig. 848.

Glasgow dont il était conservateur, fut frappé de l'inconvénient dont il s'agit, inconvénient rendu plus apparent par la petitesse du modèle. Pour y parer, il songea d'abord à n'injecter que peu d'eau dans le corps de pompe; mais alors cette eau devenant très-chaude, la tension de sa vapeur résistait notablement à la descente du piston. Il eut alors l'idée d'opérer la condensation hors du corps de pompe, dans un vase à part nommé *condenseur*, mis en communication avec ce corps de pompe au moment où l'on veut y faire le vide. L'eau injectée, et l'air qui s'en dégage dans le vide, sont enlevés continuellement par une pompe nommée *pompe à air*, mise en jeu par la machine elle-même. Il y a bien là une dépense de force, et par suite une perte de vapeur; mais cette perte est beaucoup plus petite que celle que l'on évite par l'emploi du *condenseur*.

Le corps de pompe restant ainsi toujours brûlant, les premières portions de vapeur introduites pouvaient agir sans éprouver la condensation. Mais il restait encore plusieurs inconvénients : l'eau mise au-dessus du piston, en coulant par les joints, se réduisait en vapeur et retardait la formation du vide. D'un autre côté, l'air qui descend dans le corps de pompe à la suite du piston, refroidit en dedans les parois, ce qui entraîne une perte de vapeur quand ce piston remonte. Pour obvier à ces divers inconvénients, Watt imagina de fermer le corps de pompe à sa partie supérieure, par un couvercle à ouverture centrale, garni d'une *boîte à étoupe* (I, 182) que traverse la tige du piston; et de remplacer la pression atmosphérique par celle de la vapeur introduite au-dessus du piston. Pour faire marcher la machine, on fait d'abord arriver la vapeur en même temps de chaque côté du piston, qui monte alors par l'effet d'un contre-poids placé à l'extrémité opposée du balancier; puis on fait communiquer le bas du corps de pompe avec le condenseur. — Enfin, pour empêcher le refroidissement extérieur du corps de pompe, Watt fait circuler la vapeur dans l'espace compris entre sa surface et une enveloppe ou chemise, qui l'environne de toutes parts.

1200. Machine à simple effet. — La machine ainsi disposée se meut entièrement par l'action de la vapeur, et la pression de l'atmosphère n'y joue plus aucun rôle. On la nomme *machine à simple effet*, parce que la vapeur ne pousse le piston que d'un côté, pendant sa descente.

Ce n'est qu'à partir de ces remarquables perfectionnements que la machine à vapeur put sortir des mines où le charbon est à bas prix, pour se répandre dans les usines et les ateliers. L'adjonction du condenseur économisa tout d'un coup environ les deux tiers du combustible. Malgré cet avantage immense, Watt eut à lutter pendant longtemps avant de voir adopter ses appareils. Sans fortune, et réduit à faire ses essais sur de petits modèles qu'il construisait lui-même au moyen de fioles et de tubes de verre, il semblait avoir renoncé à tirer parti de ses découvertes, lorsque sa profession d'arpenteur le mit en rapport avec le Dr Ræbuck, capitaliste intelligent, avec lequel il s'associa; mais Ræbuck perdit subitement sa fortune. Heureusement qu'un manufacturier de Birmingham, Boulton, homme actif et entreprenant, se trouva là pour remplacer Ræbuck. Malgré son influence et son activité, plus de 1,200,000 francs furent d'abord

dépensés en pure perte ; la machine atmosphérique avec tous ses inconvénients fut encore longtemps préférée, soit à cause du préjugé et de la routine, soit à cause des frais plus considérables de premier établissement qu'exigeait la machine à condenseur.

Voici un fait qui donne une idée de l'économie de combustible réalisée par le condenseur : Watt et Boulton exigeaient de ceux qui voulaient adapter un condenseur à leur machine, la valeur du tiers de l'économie de combustible ainsi réalisée. Des expériences préliminaires faites sur la machine avant et après la modification, donnaient l'économie de combustible pour un certain nombre de coups de piston ; et le nombre de coups de piston accomplis pendant chaque année, était indiqué par un compteur que le balancier faisait marcher. Or, l'économie fut telle, sur trois machines établies à la mine de Chacewater, en Cornouailles, que les propriétaires rachetèrent pour 60,000 francs par an le tiers revenant aux inventeurs ; ce qui suppose une économie totale de plus de 180,000 francs.

1201. Machine à double effet. — Dans la machine à simple effet, les deux mouvements opposés du piston ont lieu avec des vitesses inégales, le piston ne recevant l'impulsion de la vapeur que dans son mouvement de descente. Cette circonstance, sans inconvénient quand il s'agit de faire marcher des pompes, en présente de graves quand la machine doit faire mouvoir des appareils qui exigent un mouvement régulier, comme les métiers à filer. Watt proposa d'abord de placer un cylindre à piston à chaque extrémité du balancier ; mais il remplaça bientôt cette disposition par celle de la machine à double effet, dans laquelle un seul piston est poussé par la vapeur, alternativement dans les deux sens.

Dans la machine à double effet (fig. 849), les deux extrémités du corps de pompe peuvent être mises en communication, tantôt avec la chaudière C, tantôt avec le condenseur e, par les robinets r, s, r', s'. Supposons d'abord les robinets r et s' ouverts et les deux autres fermés. La vapeur passe au-dessus du piston et le fait descendre, pendant que l'air ou la vapeur qui se trouve au-dessous se rend par le robinet s' dans le condenseur e, dont la pompe à air p enlève continuellement l'air et l'eau. Quand le piston est arrivé au bas de sa course, on ouvre à leur tour les robinets r', s, et l'on ferme les deux autres. La vapeur passe alors au-dessous du piston et le soulève, tandis que celle qui remplit la partie supérieure du corps de pompe se précipite dans le condenseur par le robinet r'.

1202. Parallélogramme de Watt. — Le balancier auquel est fixée la tige du piston, devant être poussé de bas en haut quand le piston monte, on ne peut plus, pour conserver le mouvement rectiligne de la tige, employer des chaînes s'enroulant sur des arcs, comme dans la figure 848. Après avoir songé à

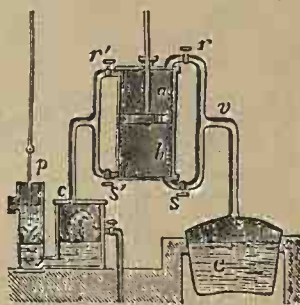


Fig. 849.

employer des crémaillères, comme dans la machine pneumatique; Watt imagina une disposition très-ingénieuse, dont voici le principe :

Supposons deux leviers égaux $O\delta$, $\varepsilon\gamma$ (fig. 850) ayant leur point d'appui en O et ε , et réunis par une barre articulée $\gamma\delta$. Les extrémités δ et γ décrivant des arcs de cercles $\delta\delta'$, $\gamma\gamma'$, le levier $\delta\gamma$ viendra, de la position $\delta\gamma$ en $\delta'\gamma'$, et l'on conçoit que son milieu c puisse se mouvoir sensiblement suivant une ligne droite. C'est, en effet, ce qui a lieu; car la courbe décrite par le point c , qui est une *lemniscate*, présente un point d'inflexion près duquel la courbure est assez peu prononcée pour qu'on puisse la considérer comme se confondant avec une ligne droite. Cela posé, prolongeons le levier $O\delta$ d'une quantité égale, δz , et supposons que Oz soit le demi-balancier d'une machine à vapeur. Construisons, avec des tringles parallèles deux à deux, un parallélogramme $\alpha\beta\gamma\delta$ articulé aux angles, de manière à pouvoir prendre différentes formes $\alpha\beta\gamma\delta$, $\alpha'\beta'\gamma'\delta'$. Il est facile de voir que si le point c suit une ligne droite cc' , le point β décrira une droite parallèle à cc' . En effet, les trois points O , c , β , sont en ligne droite, $\alpha\beta = \delta\gamma$ étant double de δc , comme Oz est double de $O\delta$. On a donc $Oc : O\beta = O\delta : Oz$; on a de même $Oc' : O\beta' = O\delta' : Oz'$; d'où $Oc : O\beta = Oc' : O\beta'$. La droite cc' est donc parallèle à celle qui joint les points β et β' . Comme il en est ainsi, quelle que soit l'étendue du déplacement cc' ou $\beta\beta'$, on voit que si cc' est une ligne droite, il en est de même du chemin parcouru par le point β .

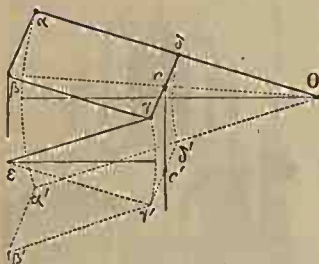


Fig. 850.

C'est en ce point qu'est articulée la tige du

piston. Au point c se fixe celle de la *pompe à air*.

Nous avons supposé que la longueur Oz était double de $O\delta$, et $\varepsilon\gamma$ égal à $O\delta$. Il y a d'autres proportions qui satisfont au problème; celles que nous avons considérées sont les plus usitées.

1203. Distribution de la vapeur. — La machine elle-même est chargée de faire passer la vapeur d'un côté ou de l'autre du piston, et de la conduire dans le condenseur. Les appareils destinés à cet usage, et qui remplacent les robinets r , r' , s , s' (fig. 849), constituent la *distribution*; il y en a de plusieurs sortes.

Soupapes de distribution. — Watt a d'abord adopté un système de soupapes à charnière, qu'il a plus tard disposées comme on le voit dans la figure 851 : en haut et en bas du corps de pompe sont annexées deux boîtes so , $s'o'$ à deux ouvertures, contenant chacune deux soupapes coniques. Les ouvertures inférieures o , o' communiquent avec le condenseur, et les deux supérieures, avec la chaudière. La tige de la soupape supérieure, dans chaque boîte, est un tube dans lequel glisse la tige de la soupape inférieure. Ces deux tiges sortent au dehors à travers une boîte à étoupes, et sont fixées, par des traverses horizon-

tales, à deux tringles verticales l, l , de manière que l'une des soupapes supérieures soit fixée à la même tringle qu'une des soupapes inférieures. Ces tringles sont poussées de bas en haut ou de haut en bas par un système de *plug-frame* analogue à celui que nous avons décrit (1198). Quand les soupapes sont placées comme dans la figure, la vapeur entre dans la partie supérieure du corps de pompe, dont la partie inférieure communique avec le condenseur par l'ouverture o' . Si l'on vient à relever la tringle t et à abaisser la tringle l , les soupapes s et r' , qui étaient ouvertes, se ferment, et les deux autres s'ouvrant, la vapeur passe sous le piston, et la partie supérieure du corps de pompe communique avec le condenseur par l'ouverture o .

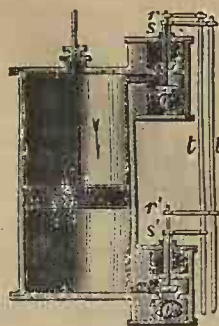


Fig. 851.

Tiroirs. — La figure 852 représente une autre disposition, due aussi à Watt. La vapeur arrive en v et s'introduit autour d'un cylindre communiquant avec les extrémités du corps de pompe, et contenant deux pistons p, p , reliés entre eux par une tige qui sort au dehors à travers une boîte à étoupes. L'ouverture o communique avec le condenseur. Quand les pistons p, p sont dans la position de la figure, la vapeur venant de v pénètre dans la partie supérieure du corps de pompe, pendant que la partie inférieure communique avec le condenseur. Le contraire a lieu, quand les pistons p, p sont placés dans la position r, r .



Fig. 852.

Souvent on remplace ces pistons p, p par une pièce creuse mn (fig. 853), nommée *tiroir* ou *glissoir*, et autour de laquelle circule la vapeur arrivant en v . Les parties extrêmes de cette pièce sont parfaitement dressées du côté du corps de pompe, et leur section, que l'on voit en a , présente la forme d'un demi-cercle dont la partie plane, représentée en M , s'applique exactement sur une surface bien dressée, dans laquelle s'ouvre la communication avec l'extrémité c ou c' du corps de pompe. La partie courbe dorsale glisse sur des garnitures d'étoupes i, i, I, I qui l'entourent, comme une espèce de piston

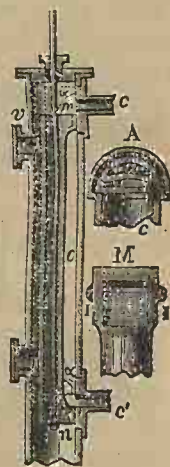


Fig. 853.

plongeur. Enfin, l'extrémité n de l'espace demi-cylindrique A qui contient le tiroir, communique avec le condenseur.

Dans la position de la figure, la vapeur passe dans la partie inférieure du corps de pompe, tandis que la partie supérieure communique avec le condenseur par

l'intérieur du tiroir, dont la section droite se voit en *a*. Dans la position *xx* du tiroir, le contraire a lieu, et le piston descend. Ce système porte souvent le nom de *soupage* ou de *tiroir en D*, à cause de la forme de la section transversale; il présente un inconvénient grave : le tiroir ne se dilate pas régulièrement, à cause

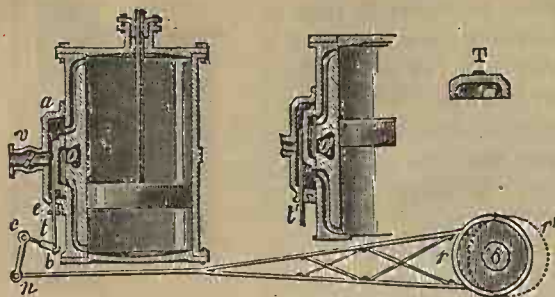


Fig. 854.

du défaut d'homogénéité; il se gauchit, ce qui fait qu'une seule des surfaces planes s'applique exactement, l'autre laissant passer la vapeur. On évite cet inconvénient en coupant la pièce en deux.

Tiroir à coquille.

— Ce tiroir, imaginé en 1801 par Murray, de Leeds, est formé par un prisme rectangulaire (fig. 854), creusé d'un côté, dont on voit la coupe transversale T. Cette pièce glisse dans l'intérieur d'une caisse ou *boîte à vapeur* *ae*, dans laquelle la vapeur arrive par le tube *v*. La face creuse du tiroir s'applique exactement sur une surface bien dressée, dans laquelle sont pratiquées trois ouvertures, communiquant l'une, *o*, *o'* avec le condenseur, et les deux autres avec la partie supérieure et la partie inférieure du corps de pompe. Dans la position *t* du tiroir, la vapeur passe au-dessus du piston, et la partie inférieure du corps de pompe communique avec le condenseur par la cavité pratiquée dans le tiroir et par l'ouverture *o*. L'inverse a lieu dans la position *t'*.

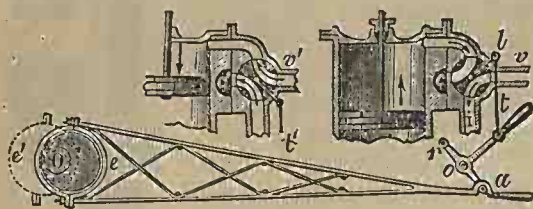


Fig. 855.

Le mouvement est imprimé au tiroir par la tige *t* qui traverse une boîte à étoupes.

Le tiroir à coquille constitue un des meilleurs distributeurs, mais la vapeur le pressant contre la surface

sur laquelle il glisse, avec une force proportionnelle à son étendue, le frottement devient énorme dans les appareils de grandes dimensions. C'est ce qui a conduit à imaginer le tiroir en D.

Robinet à quatre voies. — Enfin, on emploie encore le robinet à quatre voies de Papin (I, 182). Dans la position *l* (fig. 855), la vapeur qui arrive en *v*

passé sous le piston par le canal *i*, tandis que la partie supérieure du corps de pompe communique par l'ouverture *c* avec le condenseur. L'inverse a lieu dans la position *t'* du robinet. — Le robinet de Papin n'est guère employé que dans les petites machines.

1204. Excentrique. — Les tiroirs et les robinets à quatre voies sont mus par la machine elle-même; ordinairement par le moyen suivant : Dans les machines à double effet, le mouvement d'oscillation du balancier est transformé en un mouvement de rotation imprimé à un arbre horizontal muni d'un volant. Cet arbre, *O* (*fig. 854*), porte un *excentrique*, qui n'est autre chose qu'une poulie perpendiculaire à l'arbre, mais dont le centre est en dehors de l'axe de cet arbre, de manière qu'elle ne tourne pas autour de son propre centre. On voit en *r* et *r'* deux de ses positions, diamétralement opposées. Un anneau portant un système de tringles *nr* enveloppe l'excentrique, qui peut tourner dans cet anneau, de manière que le point *n* prend un mouvement de va et vient qui le rapproche et l'éloigne successivement de *O* à chaque tour que fait l'excentrique. L'extrémité *n* est articulée avec un levier coudé dont l'axe est en *c*. Ce levier agit, par le bras *cb* sur la tige *t* du tiroir qu'il s'agit de faire mouvoir, ou sur la clef *l* (*fig. 855*) du robinet à quatre voies, de manière à produire des déplacements alternatifs d'accord avec les mouvements du piston.

1205. Renversement de la vapeur. — Il y a des machines, comme celles des navires à vapeur, dans lesquelles il est indispensable de pouvoir faire tourner l'arbre dans l'un ou l'autre sens, à volonté. L'opération par laquelle on change ainsi le sens du mouvement, s'appelle *renversement de la vapeur*. Pour renverser la vapeur, il faut modifier brusquement la position du robinet ou du tiroir, ce que l'on obtient en agissant avec la main sur une manette qui termine le bras *t* du levier coudé *aot* (*fig. 855*), et faire en sorte que l'excentrique *e* fasse mouvoir la tige *tl* en sens opposé. C'est à quoi l'on arrive en accrochant au bouton *r* l'extrémité *a* de la tringle *ea*, de manière à la faire agir sur le bras de levier *ro*, et par conséquent à donner à la tige *tl* un mouvement inverse de celui qu'elle avait dans les mêmes positions de l'excentrique, quand la tringle agissait sur le bras de levier *ao*.

1206. Description de la machine de Watt. — Il est facile, au moyen des détails qui précèdent, de se rendre compte de l'ensemble de la machine de Watt à double effet (*fig. 856*). Le corps de pompe, *P*, reçoit la vapeur par le tuyau *V*, qui la conduit d'abord dans la boîte de distribution *bV*. La tige du piston est articulée, par l'intermédiaire du parallélogramme *αβγ*, à l'extrémité du balancier *αα'*, levier énorme, ordinairement en fonte, mobile sur deux tourillons qu'il porte en son milieu. L'autre extrémité *α'* du balancier est articulée à une bielle *B*, articulée elle-même par son autre extrémité à une manivelle *m* fixée à l'arbre d'un volant *FF*; de manière que le mouvement d'oscillation que reçoit la bielle se transforme en un mouvement de rotation. Il est facile de voir que la manivelle doit avoir pour longueur la moitié de la course du piston quand les deux bras du balancier sont égaux, ce qui a lieu ordinairement. Le volant *FF*,

très-pesant, sert à régulariser les mouvements, et en même temps à faire franchir, par sa vitesse acquise, les deux *points morts* ou *instants critiques*, qui correspondent aux positions où la bielle, est sur le prolongement de la manivelle.

La tringle T, fixée à l'anneau qui entoure un excentrique adapté à l'arbre, fait mouvoir le tiroir, au moyen d'un levier coudé qui agit sur la tige de ce tiroir. C est le condenseur, dans lequel on règle l'arrivée de l'eau d'injection au moyen du robinet *rr*. Cette eau vient d'une bêche alimentée par la pompe Q, mise en mouvement par le balancier. A est la pompe à air; l'eau chaude qu'elle extrait du condenseur C est conduite au-dehors par un tuyau *e*; une partie est aspirée,

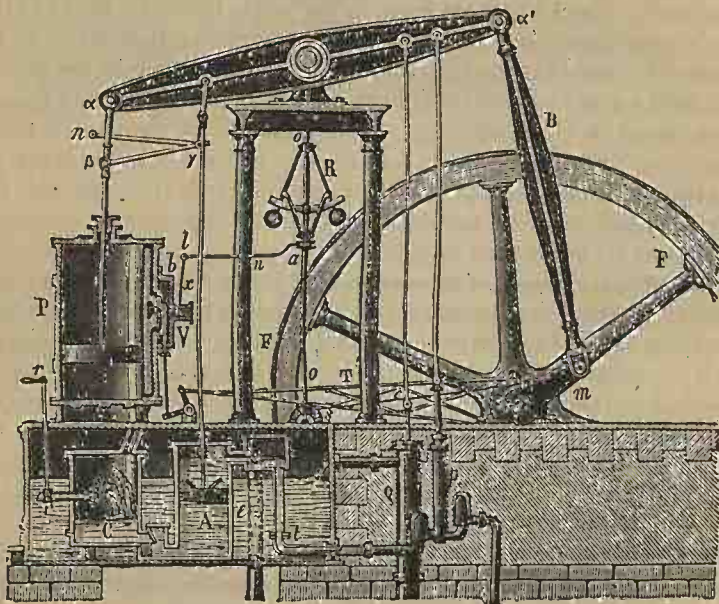


Fig. 856.

à travers le tube *t*, par la pompe d'alimentation *p* qui la refoule dans la chaudière, pour remplacer l'eau qui disparaît à l'état de vapeur. Cette pompe est ordinairement une pompe à piston plongeur, dont les soupapes sont souvent de simples sphères métalliques.

Modérateur à force centrifuge. — Pour rendre régulière la vitesse d'une machine, malgré les changements dans les résistances qu'elle peut avoir à vaincre, Watt a imaginé de faire varier la quantité de vapeur qui arrive dans la boîte de distribution, de manière à en fournir moins quand la vitesse s'accélère. Il a employé pour cela le pendule conique déjà utilisé pour régler la position des vannes des récepteurs hydrauliques. Cet appareil, que l'on voit en R (fig. 856),

consiste en deux boules très-lourdes suspendues, par deux barres articulées, à un arbre vertical *oo*. Les quatre barres forment ainsi un losange à angles variables. L'arbre *oo* reçoit de celui du volant, un mouvement de rotation sur lui-même, par la corde sans fin *c* et l'engrenage *s*. Quand la vitesse de la machine, et, par suite, celle de l'appareil *R* augmente, les boules s'écartent, et l'anneau *a* monte; il descend quand la vitesse diminue. Cet anneau porte une gorge dans laquelle s'engage à frottement doux, une fourchette qui termine un levier *ln*; de manière que le bras *an* s'élève et s'abaisse en même temps que l'anneau *a*. L'autre bras agit, par l'intermédiaire d'une tringle *x*, sur une clef que l'on voit dans le tuyau d'arrivée *V*, de manière à intercepter d'autant plus le passage de la vapeur que le mouvement de la machine est plus rapide.

On emploie aussi, pour remplir le même objet, le *régulateur Molinié*, qui consiste en une espèce de soufflet cylindrique vertical, disposé comme celui de la soufflerie acoustique (I, 685). Suivant que le mouvement intermittent communiqué par la machine à la tablette inférieure du soufflet est plus ou moins rapide, la tablette supérieure s'élève plus ou moins, et agit sur la clef du tuyau *V*.

1207. Machines à haute pression. — Watt, en 1769, s'était réservé le privilège, pour le cas où l'eau serait rare, de construire des machines dans lesquelles la vapeur ne serait pas condensée après avoir produit son effet, et s'échapperait simplement dans l'atmosphère. Ce système avait déjà été indiqué par Papin, et le principe en avait été décrit par Leupold en 1724. Dans ce cas, le piston éprouvant du côté vers lequel il marche une résistance égale à la pression atmosphérique, la vapeur qui le presse du côté opposé doit posséder une tension notablement supérieure à celle de l'atmosphère. La machine porte alors le nom de *machine à haute pression*; on réserve le nom de *machines à basse pression* à celles dans lesquelles la tension de la vapeur de la chaudière est au-dessous de deux atmosphères; alors il y a toujours un condenseur.

Les machines à haute pression sans condensation ont été construites pour la première fois par Olivier Evans. Elles sont moins compliquées que les machines à basse pression; il y a de moins le condenseur, sa pompe d'alimentation et sa pompe à air, ainsi que les tringles, robinets, tuyaux... qui dépendent de ces appareils. En outre, les machines à haute pression occupent moins de place, sont moins coûteuses, à égalité de force dépensent moins de combustible, et n'exigent pas la grande quantité d'eau nécessaire à la condensation. Du reste, ces machines peuvent être accompagnées d'un condenseur; on épargne alors une atmosphère de pression. — On donne généralement aujourd'hui à la vapeur, une tension qui varie de 3 à 10 atmosphères.

1208. Différents types de machines fixes. — La machine de Watt à condensation est d'un poids énorme et occupe un grand espace. Le balancier et le bâtis qui le soutient sont surtout d'une installation compliquée. On a cherché, dès le principe, des dispositions plus simples, et il y a un très-grand nombre de modèles différents de machines à vapeur. Nous ne pouvons donc songer à en donner ici une description même abrégée. Nous remarquerons seulement que

toutes les machines fixes, si différentes dans les détails, peuvent se rapporter à quatre types principaux : la machine de Watt déjà décrite (1206), la machine Maudslay, la machine à cylindre oscillant, et les machines rotatives. Ces quatre systèmes diffèrent principalement par la manière dont le mouvement est transmis au volant.

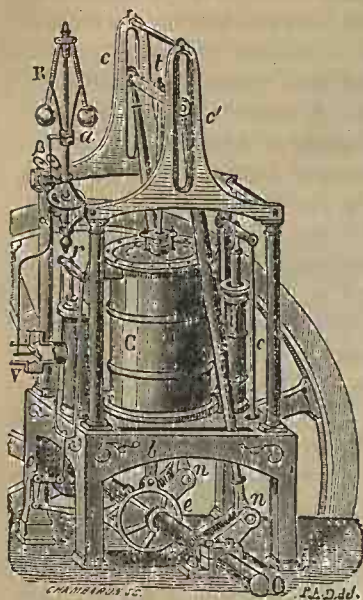


Fig. 857.

Levier du troisième genre, qui ne se voit pas dans la figure, et dont l'extrémité opposée au point d'appui agit sur deux bielles pendantes, *c*. Le modérateur *R*, reçoit son mouvement de l'arbre du volant, au moyen d'une corde sans fin qui

Système Maudslay.—La figure 857 représente une machine de ce système, sans condensation : *C* est le corps de pompe; la tige du piston est guidée par deux galets ou deux patins fixés aux extrémités d'une traverse *t* qui la surmonte, et roulant ou glissant dans deux glissières fixes *c*, *c'* parallèles à la tige. Deux bielles pendantes *cn*, *c'n*, articulées aux extrémités de la traverse *t*, agissent en *n*, *n* sur les deux manivelles égales et parallèles que porte l'arbre *O* du volant. La vapeur arrive par le tuyau *V*, dans la boîte à vapeur. Le tiroir est mis en mouvement par l'excentrique *e*, le levier coudé *o* et la traverse *r* que porte à son extrémité la tige de ce tiroir. *i* est la pompe d'alimentation, mise en jeu par l'excentrique *e*, qui fait osciller, par l'intermédiaire d'une bielle *b*, un

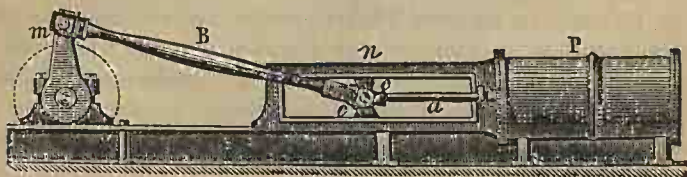


Fig. 858.

se passe sur deux poulies de renvoi β . L'anneau *a* soulève plus ou moins la tringle à fourchette *az*, qui agit, par son extrémité inférieure, sur la clef placée dans le conduit de vapeur *V*.

Ce système présente une élégante simplicité quand le corps de pompe est horizontal, et la bielle dans le prolongement de la tige du piston. Cette disposition est représentée dans la figure 858. P est le corps de pompe; l'extrémité de la tige *a* du piston est guidée par un patin *cc* qui glisse à frottement doux entre deux glissières fixes, *n*, et elle est articulée avec la bielle B qui agit sur la manivelle *m* du volant.

Machines à cylindre oscillant. — On est parvenu à lier directement la tige du piston à la manivelle de l'arbre du volant, en donnant au corps de pompe la liberté d'osciller dans un plan perpendiculaire à cet arbre. Le corps de pompe est alors soutenu sur des colonnes, par deux tourillons, dont un se voit en *o* (fig. 859), autour desquels il peut osciller. La tige du piston agit directement sur la manivelle *m*; elle est guidée par des galets qui roulent entre deux tiges *e*, *e'*, fixées au couvercle du corps de pompe. La vapeur arrive par l'un des tourillons, qui est foré, et dans lequel s'engage l'extrémité d'un tuyau communiquant avec la chaudière à vapeur; une garniture d'étoupes permet au tourillon de tourner sur lui-même sans qu'il y ait perte de vapeur.

La distribution se fait de différentes manières. Dans les appareils de petites dimensions, on emploie souvent une espèce de robinet à quatre voies, dont le corps est formé par l'extrémité du tourillon, qui présente une forme conique et est reçu dans un boisseau fixe, dans lequel il tourne alternativement, pendant les oscillations du corps de pompe.

Dans les appareils de grandes dimensions, on emploie des tiroirs mis en mouvement par divers moyens. Par exemple, l'excentrique *e* (fig. 859) fait monter et descendre une bielle *b*, guidée en *n*, et portant une glissière *a*, ayant la forme d'un arc de cercle dont le centre est en *o*. Le levier *l* qui agit sur la tige du tiroir, porte un bouton engagé dans la glissière. Le tiroir ne changerait pas de position si la glissière *a* restait fixe; mais comme l'excentrique *e* la fait monter et descendre alternativement, le tiroir reçoit un mouvement de va et vient. La vapeur arrive dans la boîte de distribution par un des tourillons et sort par l'autre.

Les machines oscillantes, imaginées en Angleterre par Manby, et importées en France par Cavé, sont plus simples, moins pesantes et tiennent moins de place que les autres, ce qui les fait souvent adopter dans les bateaux à vapeur, malgré l'usure rapide des tourillons, sur lesquels porte tout l'effort de la machine.

1209. Machines rotatives. — Pour éviter la perte de travail produite par le changement du mouvement alternatif en mouvement de rotation, on a construit de petites machines, dans lesquelles la vapeur imprime directement un mouvement

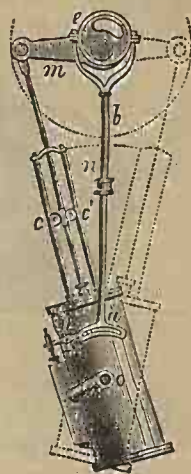


Fig. 859.

de rotation à un arbre. Les premiers essais ont été faits par Watt, et, depuis, divers inventeurs ont donné des solutions ingénieuses de ce problème. M. Pecqueur est le premier qui ait exécuté une machine rotative utilisée dans l'industrie. La machine à disque de MM. Bishop et Rennie a aussi été appliquée, en Russie, à de petits navires. — Comme exemple d'appareil à rotation directe, nous décrirons la machine américaine de M. Berhn construite en France par M. Petau. Elle consiste en un double tambour formant une seule cavité, dont on voit la section droite (fig. 860). La vapeur y entre par le tube *v* et en sort en D. Suivant l'axe de chaque tambour, tourne un arbre *o*, *o'* dont un sert d'arbre moteur. Ces deux arbres sortent à travers une des bases, et sont liés l'un à l'autre, en dehors, par des roues dentées égales, de manière à se faire tourner mutuellement en sens inverse. Deux secteurs cylindriques *s*, *s'* sont affermis sur ces arbres; leur surface convexe et leurs bases rasant de près les parois des tambours, et la

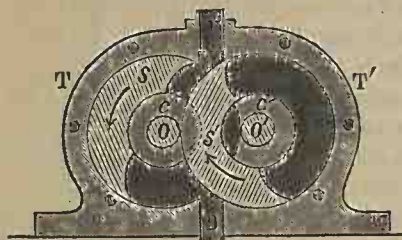


Fig. 860.

vapeur qui s'engage entre les joints sert de fluide lubrifiant, comme dans la machine pneumatique à piston libre (I, 403). Dans la position de la figure, on voit que la vapeur pousse le secteur *s* dans le sens de la flèche, et l'amène, après un demi-tour, dans la position symétrique de celle que présente sur la figure le secteur *s'*; position que celui-ci n'a pas conservée, car sous l'action

de l'engrenage extérieur, il fait aussi un demi-tour et vient se placer dans la position symétrique de celle que présente sur la figure le secteur *s*, de sorte que la vapeur pousse à son tour ce secteur *s'* dans le sens de la flèche *s'*... et ainsi de suite.

1210. De la détente. — La vitesse du piston tendant à s'accélérer, ce qui produit une secousse à l'instant où son mouvement doit changer de sens, Watt imagina de ne laisser entrer la vapeur que pendant une partie seulement de la course du piston. La vapeur introduite agit ensuite par sa force de ressort ou par *détente*, avec une énergie décroissante, son volume augmentant en suivant à peu près la loi de Mariotte. Indépendamment de la régularité de mouvement obtenue par ce moyen, il y a une économie de vapeur, et par conséquent de combustible. Cette économie est, en partie, au détriment du travail produit; mais la perte est loin d'être proportionnelle à l'économie de vapeur. Par exemple, si la vapeur n'entre que pendant $1 : n$ de la course du piston, elle produit d'abord $1 : n$ du travail qui serait effectué si elle entraît pendant toute la course, et l'on dépense *n* fois moins de vapeur. On gagne ensuite tout le travail effectué par la détente.

Manière de produire la détente. — Tantôt on emploie une soupape placée

dans le tuyau d'arrivée de la vapeur, et qui se ferme par l'effet d'un excentrique, quand le piston a parcouru une certaine partie de sa course. Tantôt on se sert d'un second tiroir, nommé *tiroir à recouvrement*, glissant au-dessus de celui qui règle l'introduction de la vapeur, et placé soit dans la même boîte, soit dans une boîte séparée; ce tiroir à recouvrement laisse passer ou intercepte la vapeur qui se rend au second. Enfin, on peut encore n'employer qu'un seul tiroir à coquille, mais il faut le faire mouvoir au moyen d'un excentrique dont la courbure soit calculée de manière à pousser le tiroir avec des vitesses variant suivant une loi convenable.

Détente Clapeyron. — M. Clapeyron est parvenu à régler la détente avec un seul tiroir et au moyen d'un excentrique circulaire. Le tiroir (*fig. 861*) porte deux plaques α , β qui peuvent tenir fermées les ouvertures par lesquelles arrive la vapeur, pendant un temps plus ou moins long; de manière que la communication c , par exemple, soit fermée pendant que c' communique avec le condenseur par l'ouverture o . Cette ouverture est très-large et peut être en partie recouverte sans inconvénient, comme on le voit dans la figure. Alors la détente se fait au-dessus du piston, pendant que le tiroir monte. Le moment où le canal c est obstrué dépend de la dimension des plaques α et β , et de leur distance; elle dépend aussi de l'amplitude des déplacements du tiroir.

1211. Détente variable. — Il y a un grand avantage à pouvoir faire varier l'étendue de la détente d'après les différentes résistances que doit vaincre la machine. On emploie pour cela divers moyens : tantôt on dispose de l'amplitude des mouvements d'un tiroir à recouvrement, tantôt on modifie l'excentrique qui fait jouer une soupape de détente. Le plus souvent on fait varier l'amplitude du



Fig. 861.

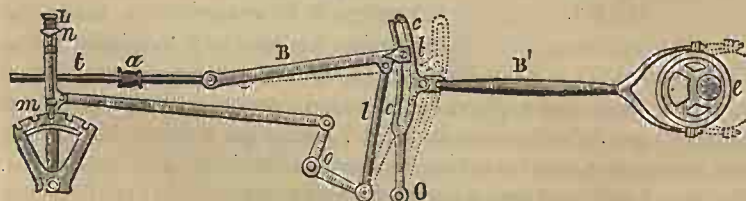


Fig. 862.

mouvement alternatif du tiroir unique de Clapeyron, au moyen d'une disposition qui permet d'opérer la détente, même pendant la marche de la machine : t (*fig. 862*) est la tige du tiroir, guidée dans un anneau a , et mise en mouvement par une bielle B . Cette bielle porte un bouton b , qui s'engage dans une glissière cc articulée en O , de manière à obéir à la bielle B' de l'excentrique e . L'amplitude des mouvements du tiroir dépend de la distance Ob , et cette distance peut être

modifiée au moyen de la tige articulée *l* et du levier coudé *o*, sur lequel on agit au moyen du levier *Lm*. Ce levier porte un verrou *n* que l'on enfonce dans un des crans que porte un arc métallique *m*, de manière à maintenir le bouton *b* à une distance déterminée du point *O*. — Dans certaines machines, la détente variable est réglée par le régulateur à force centrifuge, qui agit sur la tige *l*, de manière à rendre l'entrée libre de la vapeur d'autant plus courte que la vitesse est plus grande.

1212. Machines de Woolf. — Dans la machine de Woolf, la détente se fait dans un second corps de pompe *P'* séparé du premier, et de plus grandes dimensions (*fig. 863*). La partie inférieure de l'un des corps de pompe communique avec la partie supérieure de l'autre, et *vice versa*. La vapeur entre

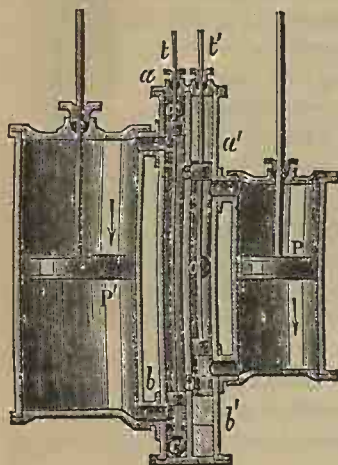


Fig. 863.

librement dans le corps de pompe *P*, et après avoir agi sur le piston qu'il contient, elle passe dans l'autre corps de pompe, où elle presse par détente le piston *P'*, qui est plus grand que *P*. Des tiroirs à pistons, mobiles dans les tuyaux *ab*, *a'b'*, servent à régler l'introduction de la vapeur. Dans la position de la figure, les deux tiroirs sont soulevés par les tiges *t*, *t'*; la vapeur arrive par l'ouverture *o* et passe au-dessus du piston *P*, tandis que celle qui se trouve au-dessous de ce piston se précipite au-dessus du piston *P'*, et le presse par sa détente. Pendant ce temps-là, le dessous du piston *P* communique avec l'air extérieur, ou avec un condenseur, par l'ouverture *c'*. Quand les deux pistons *P*, *P'* sont arrivés au bas de leur course, les tiges *t*, *t'* s'abaissent, et les

tiroirs prennent les positions indiquées en lignes ponctuées. Alors la vapeur arrivant en *o* passe sous le piston *P*, et celle qui se trouve au-dessus, passe sous le piston *P'*, pour le soulever par sa détente, pendant que le dessus de ce dernier piston communique avec l'extérieur, ou avec le condenseur, par l'ouverture *c*. Les pistons *P* et *P'* sont fixés à l'extrémité d'un même balancier, par l'intermédiaire d'un parallélogramme, articulé en deux points placés sur une ligne droite qui passe par l'axe du balancier et par l'angle opposé du parallélogramme (1202). Les machines de Woolf, d'abord peu employées, commencent à jouir d'une faveur qu'elles doivent à l'économie notable de combustible qu'elles réalisent.

1213. Machines à vapeurs combinées. — La chaleur qu'emporte la vapeur qui sort du corps de pompe est entièrement perdue, sauf la petite portion qui retourne à la chaudière avec l'eau d'alimentation, quand il y a un condenseur. On a cherché à utiliser une partie de cette chaleur perdue, en l'employant à

vaporiser un liquide beaucoup plus volatil que l'eau, comme l'éther, le *chloroforme*, le *sulfure de carbone*. Dans la machine à vapeurs combinées de M. Dutrembley, la vapeur d'eau sortant du corps de pompe se rend dans un condenseur complètement clos, que traversent verticalement un grand nombre de tubes aplatis en cuivre, très-rapprochés les uns des autres. La partie inférieure de ces tubes communique avec un réservoir, placé au-dessous du condenseur, et rempli d'éther qui s'élève à une certaine hauteur dans les tubes. Ce système constitue l'*appareil vaporisateur*. La vapeur d'eau en circulant autour des tubes, se condense et abandonne de la chaleur qui vaporise l'éther. La vapeur d'éther passe dans un corps de pompe un peu plus grand que celui dans lequel agit la vapeur d'eau, et y pousse un piston qui agit sur l'arbre de la machine, le travail de la vapeur d'éther s'ajoutant à celui de la vapeur d'eau. La vapeur d'éther, à sa sortie du corps de pompe, va se condenser dans des tubes disposés comme ceux de l'appareil vaporisateur et autour desquels circule un courant d'eau froide. Une pompe foulante repousse l'éther régénéré dans le réservoir inférieur de l'appareil vaporisateur. Quant au liquide provenant de la condensation de la vapeur d'eau autour de ce dernier appareil, il est pris par une pompe qui le refoule dans la chaudière, rendant à celle-ci la chaleur qui n'a pas été employée à vaporiser l'éther.

Un appareil semblable, de la force de 70 chevaux, a été établi sur un navire par M. Dutrembley. Il résulte d'expériences faites sur cet appareil, que l'économie de combustible, lorsque la machine marche avec les deux vapeurs combinées, est de 70 pour cent de la quantité consommée quand la vapeur d'eau agit seule dans les deux cylindres. La perfection des joints est telle, que c'est à peine si l'on sent une légère odeur d'éther au moment où la machine va être mise en mouvement, ce qui éloigne la crainte qu'aurait pu faire concevoir l'inflammabilité de l'éther. D'ailleurs, on peut dire que l'expérience a prononcé : on a vu, à Lyon, une machine de la force de 50 chevaux fonctionner pendant plus de 15 ans sans qu'aucun accident se soit produit. Au reste, le *chloroforme*, dont la vapeur n'est pas inflammable, peut remplacer l'éther. Une machine de 20 chevaux, à chloroforme, construite par M. Lafont, a été employée avec succès pendant 4 ans aux travaux du port de Lorient. Une machine plus puissante, dans le même système, a depuis été établie à bord d'un petit navire, le *Galilée*. — Malgré la grande économie qu'elles présentent, les machines à vapeurs combinées se sont peu répandues, ce qui tient en partie à leur complication. On peut en dire autant des machines dont nous allons parler :

1214. Machines à vapeur surchauffée. — Au lieu d'introduire dans un corps de pompe de nouvelle vapeur à chaque coup de piston, on a imaginé de réchauffer la vapeur qui a déjà servi, de manière à augmenter sa force expansive, et de la conduire de nouveau dans le corps de pompe. On économise ainsi la chaleur latente qu'aurait exigée la formation d'une nouvelle quantité de vapeur. Marc Séguin s'est occupé de cette question dès 1838, et M. Siemens a construit un appareil de la force de 40 chevaux, dans lequel la vapeur, après avoir poussé

le piston, passe dans deux petits cylindres où elle reçoit d'un foyer une quantité de chaleur égale à celle qu'elle a perdue. Cette vapeur est alors de nouveau introduite dans le corps de pompe. On voit que la même vapeur sert constamment et qu'il n'y a qu'à remplacer celle qui se perd; aussi, d'après l'inventeur, cette machine ne dépenserait-elle que $\frac{1}{6}$ du combustible nécessaire à une machine ordinaire de même puissance.

1215. DU TRAVAIL DES MACHINES A VAPEUR. — Le nombre de kilogrammètres fournis par une machine à vapeur, pendant un temps donné, peut s'évaluer au moyen du frein de De Prony (I, 78), que l'on applique à l'arbre du volant. L'unité ordinairement adoptée est le *cheval-vapeur*, employé pour la première fois par Savery. Nous avons vu (I, 77) que cette unité représente 75 kilogrammètres par seconde, et qu'il faut disposer de plus de 5 chevaux vivants pour fournir en 24 heures le travail d'un *cheval-vapeur*. On peut aussi calculer théoriquement le travail du piston, quand on connaît les dimensions du corps de pompe et la tension de la vapeur.

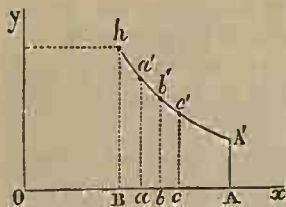


Fig. 864.

Calcul du travail du piston. — Supposons d'abord que la machine marche à *pleine vapeur*, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas détente. Désignons par S la surface du piston, par H l'excès de la pression de la vapeur dans le corps de pompe sur sa tension dans le condenseur ou dans l'atmosphère, suivant que la machine est à condenseur ou sans condenseur, et par l le chemin parcouru par le piston en 1^s . Le travail accompli en 1^s , sera SHl , ou bien VH , en représentant par V le volume Sl . Si V est exprimé en décimètres cubes, et H en décimètres d'eau, le produit VH représentera le nombre de kilogrammètres fournis en 1^s .

Dans les machines à détente, pour obtenir le travail accompli pendant une course du piston, il faut ajouter au travail effectué pendant que la vapeur entre librement, celui qui s'accomplit pendant la détente. Le premier est égal à SHl , en appelant l l'espace parcouru à pleine vapeur par le piston. Si nous prenons sur l'axe Ox (fig. 864) une longueur OB représentant la valeur de l , et l'ordonnée Bh égale à la pression H , l'aire Bhl du rectangle Oh , multipliée par S , représentera le travail accompli pendant le parcours de l'espace l .

Pour obtenir le travail de la détente, supposons d'abord que le vide soit complet dans le condenseur, et soit OA la longueur L du corps de pompe. Divisons l'espace $BA = l'$ parcouru par le piston pendant la détente, en un nombre n de parties égales Ba, ab, bc, \dots ; supposons que les pressions de la vapeur soient constantes pendant que le piston parcourt chacune de ces parties, et représentons-les par Bh, aa', bb', cc', \dots . Les travaux accomplis dans ces subdivisions, seront représentés par les aires des rectangles Ba', ab', bc', \dots multipliées par S , et le travail de la détente à la fin de la course du piston, par la somme de

ces aires; c'est-à-dire, en supposant *n infini*, par l'aire BAA'h. Pour obtenir les pressions *aa'*, *bb'*, *cc'*, supposons que la vapeur se dilate en suivant la loi de Mariotte, et soit *y* la pression pour une distance *Oa* au point *O* égale à *x*; on aura $xy = OB \times Bh = III$, d'où l'on tirera la valeur de *y*. Cette expression est aussi l'équation de la courbe *hA'*. On voit que cette courbe est une hyperbole équilatère rapportée à ses asymptotes *Ox* et *Oy*. Il suffira donc, pour calculer le travail correspondant à une course du piston, dans les machines à condensation, d'ajouter au rectangle *Oh*, l'aire comprise entre l'hyperbole équilatère, son asymptote *Ox* et les deux ordonnées correspondantes aux valeurs $x = l$, $x = L$; l'équation de cette hyperbole étant $xy = III$.

Quand la machine marche sans condensation, on évalue par le même moyen le travail du piston; mais il faut prendre pour ordonnées les différences entre la pression atmosphérique et la pression de la vapeur calculée par la formule $xy = III$. Dans ce cas, l'axe des *x* est une parallèle à l'asymptote.

Pour représenter le travail par une expression analytique, on calcule algébriquement les aires *Oh* et BAA'h, et on les ajoute. On trouve ainsi, dans le cas où il n'y a pas condensation, et en représentant par *P* la pression atmosphérique en colonne d'eau, et par *y'* la pression à la fin de la détente, donnée par l'égalité $Lx = III$,

$$sIII \left(1 + \log \frac{L}{l} - \frac{P}{y'} \right); \quad \text{et} \quad sIII \left(1 + \log \frac{L}{l} \right),$$

quand il y a condensation et qu'on suppose le vide complet dans le condenseur. Les logarithmes sont pris dans le système Népérien.

Voici le tableau du travail d'une même masse de vapeur, quand la détente se fait après que le piston a parcouru 9, 8, 7.... 1, dixièmes de sa course; le travail à pleine vapeur étant pris pour unité :

FRACTION de la course où commence la détente.	TRAVAIL produit.	FRACTION de la course où commence la détente.	TRAVAIL produit.
1	4,000	0,5	1,693
0,9	1,105	0,4	1,916
0,8	1,223	0,3	2,204
0,7	1,357	0,2	2,609
0,6	1,509	0,1	3,302

Quand on calcule le travail absolu du piston au moyen des formules ci-dessus, on trouve des nombres notablement supérieurs à ceux que l'on déduit de l'observation. Cela tient à ce que l'on suppose que la loi de Mariotte est exacte et que la température de la vapeur est constante pendant toute la course du piston, ce

qui est loin d'être vrai. Il résulte des expériences de M. Morin que les valeurs calculées ainsi sont trop fortes de 0,03 environ. On suppose, en outre, que la pression de la vapeur dans le corps de pompe avant la détente est égale à la pression dans la chaudière. Or, la première a été trouvée égale, suivant les cas, à 0,60, et même à 0,48 de la seconde; ce qui s'explique par les résistances qu'éprouve la vapeur dans les tuyaux et les tiroirs, où elle suit une route sinueuse, et montre la nécessité de donner aux conduits une grande section, de $\frac{1}{25}$ au moins de celle du corps de pompe, sans cependant la faire trop grande, la vapeur qui reste dans les canaux à partir de la boîte à vapeur étant perdue sans produire d'effet. — M. de Pambour a proposé une nouvelle théorie

dans laquelle il tient compte des différences de pression, et qui donne des résultats plus complets et beaucoup plus satisfaisants.

1216. Indicateur de Watt. — Ce petit appareil, notablement perfectionné par M. Combes, fait connaître expérimentalement le travail effectué pendant chaque coup de piston. Il consiste en un tube vertical contenant un piston *p* (fig. 865), et que l'on visse sur le couvercle du corps de pompe de la machine. Quand la vapeur arrive dans la partie supérieure de ce dernier, elle soulève le piston *p* en faisant céder un ressort en hélice qui entoure sa tige *t*. Cette tige porte un crayon articulé, *r*, qui monte et descend en même temps qu'elle, et est pressé par un ressort contre un tambour *A*, sur lequel est étendue une feuille de papier dont les deux bords verticaux sont maintenus par des lames à ressort *l*, *l'*. Quand la vapeur soulève

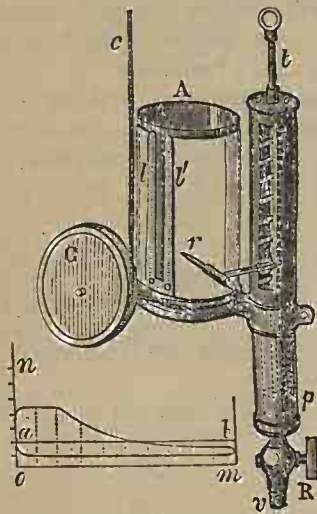


Fig. 865.

le piston *p*, le crayon trace un trait vertical sur le tambour *A* s'il est en repos. Mais ce tambour reçoit un mouvement de rotation d'un cordon, *c*, fixé vers le haut de la tige du piston de la machine à vapeur et qui tire sur une poulie *C*, à laquelle est adapté un petit treuil. Autour de ce treuil, s'enroule un second cordon qui embrasse le tambour *A*, de manière que ce dernier tourne avec une vitesse à chaque instant proportionnelle à celle du piston de la machine. En vertu de ce mouvement, combiné avec celui du crayon *r*, ce dernier trace une courbe. Enfin, un ressort en spirale, contenu dans le tambour, le fait revenir sur ses pas quand le cordon *c* redescend.

Prenons sur une droite horizontale, une longueur *ab* (fig. 865), égale à l'arc décrit par un point du tambour *A* pendant l'ascension du piston de la machine, et supposons que cette droite soit celle que trace le crayon quand le piston *p* est soumis de chaque côté à la pression atmosphérique. Soit *om* la droite que décrirait

le crayon s'il y avait le vide parfait sous le piston p . Quand la vapeur entrera librement dans la partie supérieure du corps de pompe de la machine, elle soulèvera le piston p dans une position telle qu'il y ait équilibre entre sa tension et la résistance du ressort en hélice; et, le tambour A tournant, la pointe r marquera un trait horizontal. A partir du moment où la vapeur cessant d'entrer la détente commencera, le ressort fera descendre le piston p , le crayon s'abaissera et décrira une courbe dont les ordonnées, dépendantes des pressions, iront en diminuant. Quand l'appareil reviendra ensuite sur ses pas, le crayon décrira une droite, placée au-dessous de ab s'il y a condensation, et se confondant avec ab dans le cas contraire. Dans le premier cas, cette droite est un peu au-dessus de om , le vide n'étant jamais parfait.

Le chemin parcouru par le piston étant proportionnel aux distances comptées sur ab , et la pression efficace de la vapeur, aux différences des ordonnées de la courbe comptées à partir de om , le travail accompli pendant une double course du piston sera représenté par l'aire de la courbe fermée décrite par le crayon; ce qui a fait donner à l'instrument le nom de *totalisateur*. — Le travail effectif du piston ainsi mesuré est inférieur au travail théorique comme nous l'avons vu ci-dessus.

1217. Rendement des machines à vapeur. — Le travail effectif du piston est toujours beaucoup plus grand que celui que donne l'arbre du volant d'après le *frein* de De Prony (I, 78). Cela tient aux pertes occasionnées par les résistances passives de la transmission du mouvement, au travail absorbé par le jeu des pompes de la machine, au frottement sur ses coussinets, du volant, dont il est bon de diminuer la masse, tout en augmentant son rayon pour lui conserver le même *moment d'inertie*. Quand les résistances à vaincre varient notablement, comme lorsque la machine est employée à faire marcher des trains de laminoirs, l'arbre sur lequel elle agit porte une roue dentée qui commande un pignon adapté à l'arbre du volant, de manière à lui imprimer une grande vitesse, et à le transformer ainsi en un véritable réservoir de force qui est utilisée au moment des grandes résistances.

Pour avoir le *rendement*, il faut diviser le travail que l'on trouve à l'arbre du volant par le travail du piston. Ordinairement, au lieu de se servir du travail effectif du piston, on emploie le travail théorique donné par la formule (1215). On trouve ainsi, par à peu près, que les machines à basse pression de 10 à 100 chevaux donnent de 0,40 à 0,60 d'effet utile. Les machines à haute pression, marchant sous 5 atmosphères avec une détente de $\frac{2}{3}$ et sans condensation, donnent un des meilleurs rendements.

Tout ce qui tend à simplifier les différentes pièces des machines augmente leur *rendement*; c'est là le but vers lequel tendent aujourd'hui les constructeurs, en même temps qu'à diminuer le volume, le poids et par suite le prix de ces appareils. De grands progrès ont été réalisés, dans ces dernières années, au moyen de machines à haute pression à cylindre horizontal disposées comme celles de la figure 858. M. Flaud en a construit dont les dimensions sont étonnamment

réduites, eu égard au travail qu'elles fournissent, en appliquant l'idée, émise par M. Giffard, d'augmenter la vitesse du piston pour suppléer à ses moindres dimensions. Comme exemple, nous citerons une de ces machines dites *trotteuses*, de la force de 3 chevaux, marchant à 4 atmosphères. Comparée à une autre de même force et placée dans les mêmes conditions, cette machine ne coûte que 1000 fr. au lieu de 3600; n'occupe que 0,55 mètres cubes, au lieu de 16; ne pèse que 60 kil. au lieu de 1800, et ne dépense que les deux tiers du combustible; mais aussi elle donne 600 coups de piston par minute, au lieu de 100. Citons encore une machine de 20 chevaux ne pesant que 1800 kil. et ne coûtant que 5000 fr.; tandis qu'une machine de même force, dans le système ordinaire, coûte de 16 à 18 mille francs.

1218. IMPORTANCE INDUSTRIELLE DES MACHINES A VAPEUR. — Indépendamment des applications au mouvement des navires et aux transports rapides sur les

chemins de fer, les machines à vapeur, en fournissant un moteur économique¹, doué d'une puissance qui dépasse tout ce qu'on peut produire au moyen des autres moteurs, ont permis de mener à bonne fin des entreprises inabordable sans leur secours, surtout dans les localités où il n'y a pas de cours d'eau et où il faudrait employer la force des chevaux. Par exemple, on entreprit, vers 1825, d'exploiter des mines de sel dans le département de la Meurthe; les eaux d'infiltration étaient extraites au moyen de pompes mises en mouvement par un manège à 24 chevaux. Ces animaux avaient à faire de tels efforts qu'ils ne pouvaient travailler qu'une heure par jour, et qu'on en voyait souvent tomber morts subitement. Il fallait donc avoir chaque jour 576 chevaux disponibles; et après des travaux dispendieux, l'abondance des eaux augmentant avec la profondeur de la mine, on fut obligé

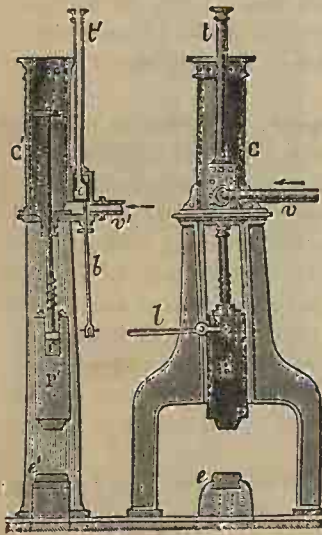


Fig. 366.

de renoncer à l'entreprise. Or un moteur à vapeur de la force de 20 chevaux aurait suffi pour lever la difficulté.

On a calculé que les machines à vapeur répandues en France font le travail de plus de 22 millions d'hommes, et en Angleterre, de plus de 30 millions.

Marteau à vapeur. — Cette machine, imaginée en 1842 par M. Bourdon, au Creusot, et reproduite quelque temps après par M. Nasmyth en Angleterre,

¹ A Paris, le travail d'une machine à vapeur, il y a trente ans, avant les derniers perfectionnements, coûtait déjà cinq fois moins que le même travail fourni par des chevaux.

fournit un exemple frappant des résultats immenses que peut donner la vapeur. Le marteau à vapeur ou marteau-pilon consiste en un lourd mouton de fonte P (fig. 866), suspendu à la tige d'un piston qui se meut dans un corps de pompe C, dont on voit la coupe en C'. Ce mouton est guidé dans sa course verticale par deux coulisses latérales. Une couronne de trous pratiqués à la partie supérieure du corps de pompe laisserait échapper la vapeur si le piston la dépassait. On fait marcher cette machine en soulevant le tiroir o, au moyen du levier l et de la tige b. La vapeur qui arrive à haute pression par le tube v, v' soulève le piston et la masse P. On abaisse ensuite le tiroir o, la vapeur s'échappe par la cheminée t', t, et le mouton retombe sur l'enclume e, e', avec d'autant plus de force qu'il avait été soulevé davantage. — Quand on veut obtenir une suite rapide de coups, on produit le mouvement alternatif du tiroir au moyen de deux mentonnets fixés au mouton P, et qui agissent sur le levier l quand le piston arrive aux limites inférieure et supérieure de sa course. — Au moyen de cet appareil, on forge et on soude avec facilité les plus grosses pièces de fer. Le mouton pèse ordinairement de 6 à 8 tonnes; mais on a beaucoup dépassé ces dimensions. Il existe au Creusot un marteau-pilon, construit en 1875, dont le mouton pèse 60 tonnes et a 4 mètres de chute; cet appareil colossal n'a pas coûté moins de 2 millions.

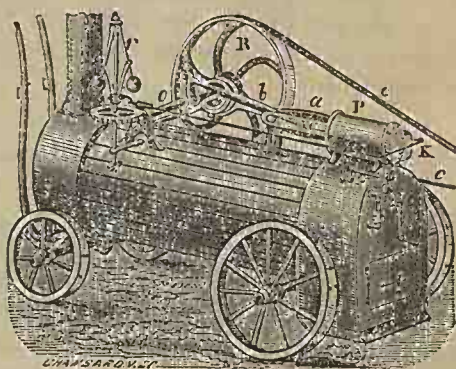


Fig. 867.

Le marteau à pilots n'est autre chose que le marteau à vapeur appliqué à enfoncer les pilots, pour les fondations. Dans ce cas, l'appareil est porté par le pilot même, qui descend avec lui. Le tuyau qui amène la vapeur est articulé de manière à se prêter à cet abaissement. L'économie de temps et d'argent résultant de l'emploi de cette machine est considérable. Dans la construction d'un dock à Devonport, en Angleterre, l'emploi du marteau à pilots a fait économiser deux années de temps, et une somme de 1,250,000 francs. En 10 heures, on enfonçait jusqu'à 32 pilots à une profondeur de 9 à 12^m. L'appareil donnait 60, 70 et même 80 coups par minute. Un seul coup enfonçait souvent un pilot de 5 à 6 mètres, la tête du pilot était si peu endommagée qu'on pouvait se dispenser de la garnir d'un anneau de fer.

Locomobiles. — On emploie beaucoup aujourd'hui des machines montées sur des roues avec leur chaudière, que l'on peut transporter partout où l'on a besoin d'un moteur. Ces machines dites locomobiles sont disposées dans le système à glissière de la figure 858. On en voit un modèle dans la figure 867 :

P est le corps de pompe; la tige du piston fait tourner l'arbre *o* d'un volant R, qui sert en même temps de poulie pour transmettre, au moyen de la courroie *cc*, le mouvement aux appareils que l'on veut faire fonctionner. La vapeur est fournie par une chaudière cylindrique sur laquelle est installé tout le mécanisme, et qui est disposée comme celle des locomotives que nous décrirons plus loin (1233).

Les locomobiles sont souvent employées dans les chantiers de construction, dans les travaux agricoles pour faire marcher des batteuses, pour le labourage à la vapeur. On en construit qui portent de puissantes pompes à incendie qu'elles mettent en mouvement. On emploie beaucoup, dans les ateliers, des moteurs disposés comme les locomotives, mais sans roues, et qui font marcher les *machines-outils*, tours, appareils à forer, à scier, à raboter, etc. On en a imaginé qui tiennent encore moins de place; la chaudière, à foyer intérieur, est verticale; le corps de pompe est placé sur le côté et l'arbre du volant, en dessus. Sur les ports on voit des grues dont la plate-forme tournante porte de petites machines semblables avec leur chaudière, et la vapeur est ainsi employée à charger et à décharger les navires avec une rapidité merveilleuse et une grande économie de main d'œuvre.

II. Chaudières à vapeur.

1219. Une machine à vapeur se compose de deux parties principales : l'une formée des pièces que la vapeur fait mouvoir, l'autre destinée à produire cette vapeur. Cette dernière partie se compose de la chaudière ou *générateur à vapeur*, avec ses annexes, et du fourneau qui reçoit le combustible. La portion de la surface de la chaudière qui est atteinte directement par la flamme du foyer ou par les gaz chauds qui s'en dégagent se nomme *surface de chauffe*.

Les chaudières à vapeur se font en tôle de fer ou quelquefois de cuivre. On en fabrique aussi en acier fondu qui sont très-résistantes, de manière qu'on peut leur donner une épaisseur moitié plus faible que celle du fer. Leur forme est assez variable. Dans les machines à basse pression, on leur donne encore quelquefois la forme d'un hémisphère, ou d'un demi-cylindre horizontal avec un fond concave en dessous. La forme la plus convenable est celle d'un cylindre terminé par deux hémisphères. La capacité étant alors un maximum, la tension de la vapeur ne peut, en modifiant la forme, produire des déchirures par flexion. La pression n'agit que *par traction*, et nous savons que c'est aux efforts exercés de cette manière que les corps résistent le mieux. Nous avons vu (I, 526) qu'une chaudière cylindrique, pour résister à une pression de P atmosphères, doit avoir une épaisseur donnée par la formule $e = PR : t$, dans laquelle t est le coefficient de ténacité de la substance, R le demi-diamètre, et P la pression en kilogrammes sur un centimètre carré. L'épaisseur qu'on donne aux chaudières est telle qu'elles peuvent résister à froid à une pression dix fois plus grande que celle qu'elles doivent supporter de la part de la vapeur. On les essaie en y

comprimant de l'eau au moyen d'une presse hydraulique. En France, une ordonnance de 1828, prescrit de donner aux chaudières de tôle une épaisseur minimum indiquée par la formule $e = \frac{1}{10000} [36 R (H - 1) + 3000]$, dans laquelle e et R sont exprimés en centimètres, et la pression H , en atmosphères. La valeur ainsi calculée représente l'épaisseur, augmentée de 3^{mm}, que devrait avoir la chaudière pour résister à une pression égale à dix fois celle de la vapeur. Dans la pratique, on dépasse toujours cette valeur.

1220. Chaudières à tombeau. — La figure 868 représente une chaudière à basse pression, connue sous le nom de *chaudière à tombeau*, vue, en T par une de ses extrémités, et en ScC, par un côté. V est la prise de vapeur, menant au corps de pompe de la machine. En S sont des *appareils de sûreté*, sur lesquels nous reviendrons (1223), et en H, une large ouverture, nommée *trou d'homme*, fermée par une plaque autoclave (1148), et destinée à laisser entrer un ouvrier dans la chaudière, pour la nettoyer quand elle est vide et froide. La soupape r , qui s'ouvre de dehors en dedans, laisse rentrer l'air pendant que la chaudière se refroidit; sans cette précaution, elle pourrait être déformée par la pression atmosphérique, après la condensation de la vapeur.

La combustion dans le foyer F est réglée par la vapeur même, au moyen de la disposition suivante : un registre r' est soutenu par un cordon m , qui passe sur deux poulies de renvoi, et s'attache à un flotteur n ; ce flotteur suit le niveau de l'eau dans le tuyau t' qui s'enfonce dans l'eau de la chaudière, et dans lequel s'élève une colonne liquide représentant l'excès de la tension de la vapeur sur celle de l'atmosphère. La longueur du cordon m est telle que le registre laisse complètement libre le passage de la fumée, quand la vapeur possède la pression convenable; mais si cette pression augmente, la colonne d'eau t' s'élève, le flotteur monte, et la plaque r' ferme en partie le passage; le tirage est donc diminué et la combustion ralentie.

Alimentation. — Pour renouveler l'eau des chaudières à basse pression, on emploie quelquefois, au lieu de pompe foulante, la disposition suivante. Une partie de l'eau du condenseur est poussée dans un réservoir R (fig. 868), d'où elle peut passer dans la chaudière par le tube t . L'ouverture supérieure de ce tube est fermée par une soupape que presse un poids p fixé à l'extrémité d'un levier $\alpha\beta$. Un flotteur f est lié à l'extrémité β de ce levier, par un fil métallique

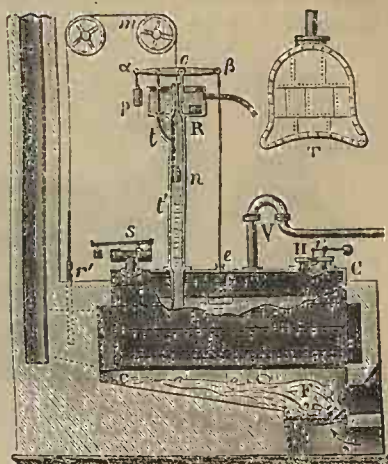


Fig. 868.

qui traverse une boîte à étoupes *e*. Quand le niveau baisse dans la chaudière, le flotteur descend, la soupape s'ouvre, et l'eau s'introduit par le tube *t*.

1221. Chaudières à haute pression. — Ces générateurs présentent ordinairement la forme d'un cylindre terminé par deux hémisphères, et sont munis de *tubes bouilleurs*. La figure 869 représente un de ces appareils, dit *chaudière française*, vu de côté, avec une coupe longitudinale du fourneau, dont la figure 871 montre la partie antérieure, et la figure 870, une coupe transversale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes objets sur les trois figures : *v, v, v* est la prise de vapeur ; le tube *a* amène l'eau de la pompe d'alimentation ; il plonge au fond de la chaudière, pour éviter que l'eau en tombant à travers la vapeur n'en condense une partie. *Bb* (fig. 869) et *b, b* (fig. 871) sont les *bouilleurs* : ils consistent en deux tubes dont le diamètre est plus petit que celui de la chaudière, et qui sont fermés à la partie antérieure, en dehors du fourneau,



Fig. 870.

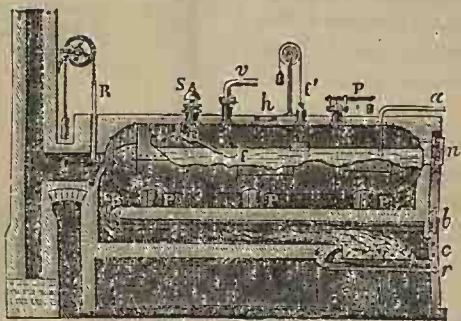


Fig. 869.



Fig. 871.

par des autoclaves. Ils communiquent avec la chaudière par les tuyaux verticaux *P, P, P* nommés *puisards*.

La chaudière est renfermée dans un fourneau de briques, dont les bouilleurs *b, b*, traversent la paroi antérieure (fig. 871), de manière qu'il est facile de les nettoyer en ouvrant les autoclaves. *R* est un registre qui sert à régler le tirage de la cheminée. On jette le combustible sur la grille du foyer par la porte *e*, la flamme chauffe d'abord les bouilleurs en dessous, puis elle passe en *B* (fig. 869), et circule dans l'espace *o* (fig. 870) limité latéralement par deux cloisons de briques construites suivant la ligne des puisards, et fermé en dessous par une cloison horizontale placée à la hauteur des bouilleurs, dont on voit une coupe longitudinale suivant *Bb* (fig. 869) et une coupe transversale (fig. 870). La flamme revient ensuite à la cheminée par les espaces *xx*, où elle chauffe le corps principal de la chaudière. Le niveau de l'eau doit toujours être au-dessus de la surface de chauffe, c'est-à-dire être plus haut que les espaces *xx*. Un petit registre *e* (fig. 869) que l'on peut pousser au moyen de la tige *r*, permet de faire passer de l'air par une fente *e* qui règne dans toute la largeur du fourneau,

quand on veut ralentir le feu, cet air ne traversant pas la grille qui porte le charbon.

Les bouilleurs augmentent beaucoup l'étendue de la surface de chauffe; en outre, comme ils présentent un diamètre moindre que celui du corps de la chaudière, la tôle dont ils sont formés peut être moins épaisse dans le rapport renversé des diamètres. On dépasse toujours l'épaisseur ainsi calculée, le contact direct du feu, exposant les bouilleurs à s'user plus vite que la chaudière, et on les dispose de manière à pouvoir les démonter et les remplacer sans être forcé de démolir le fourneau. Quant au corps de la chaudière, ordinairement il n'a pas plus de 1^m de diamètre. Si l'on a besoin d'une grande capacité, on lui donne une grande longueur, ou l'on réunit plusieurs chaudières. La forme cylindrique s'applique souvent aussi aux chaudières à basse pression, mais le plus souvent il n'y a pas de bouilleurs.

1222. Alimentation. — Les chaudières à haute pression sont alimentées par des pompes foulantes, déjà indiquées (1206). Comme la chaudière ne dépense pas rigoureusement un poids de vapeur égal au poids de l'eau fournie par la pompe, celle-ci peut-être séparée à volonté des leviers qui la font mouvoir. Vers 1760, Brindley a imaginé une disposition au moyen de laquelle l'alimentation est réglée automatiquement. Un flotteur *F* (fig. 872) repose sur l'eau de la chaudière dont il suit le niveau. Ce flotteur fait jouer deux soupapes *r*, *s* qui s'ouvrent de dehors en dedans par rapport à une capacité intermédiaire qui reçoit, par le tube *P*, l'eau de la pompe d'alimentation. Les deux soupapes sont liées par une tige articulée au levier du flotteur *F*. Dans la position de la figure, l'eau de la pompe s'introduit dans la chaudière; mais quand le niveau s'élève, le flotteur en montant fait baisser les soupapes; *s* se ferme, *r* s'ouvre, et l'eau de la pompe, au lieu de passer dans la chaudière, s'échappe par le tube *B*.

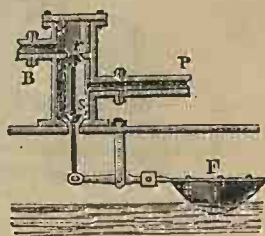


Fig. 872.

Injecteur Giffart. — M. Giffart a imaginé, vers 1861, un appareil d'alimentation très-original dont aucune pièce n'est en mouvement; c'est une annexe de la chaudière pouvant l'alimenter pendant le repos de la machine, dont il est indépendant. La figure 873 représente une coupe de l'injecteur, qui peut être placé horizontalement ou verticalement. Le tuyau *V* communique avec la vapeur de la chaudière, le tuyau *F* avec l'eau qu'elle contient, et le tuyau *A* avec le réservoir de l'eau d'alimentation. La vapeur arrivant en *V* passe dans un tube conique *ono* par les trous *o, o* et sort par l'ouverture *n*, qu'on peut rétrécir plus ou moins au moyen du bouchon conique *a* porté par une vis que l'on fait tourner en *M*. Cette vapeur, sortant en *n*, s'élance dans un espace conique *cc*, et entraîne par communication latérale de mouvement, l'air logé en *cc*. Il en résulte une aspiration, et l'eau arrive par le tube *A*, se mêle à la vapeur, qui se condense,

et est chassée en r dans le tube conique évasé D, par lequel elle est refoulée dans la chaudière. Une soupape s empêche le retour de l'eau quand, le robinet R étant fermé, l'injecteur ne fonctionne pas. On voit que l'effet produit vient de ce que la *force vive* de la vapeur et de l'eau en mouvement en m , peut vaincre la pression *hydrostatique* de la vapeur résistant en DF. Par exemple, si nous supposons une pression de 5 atmosphères, il résulte du calcul que la vapeur mêlée avec une masse d'eau entraînée égale à 15 fois son poids environ, entre dans le tube D avec une vitesse de 34 mètres au moins; tandis que la vitesse d'un jet liquide lancé par une pression de 5 atmosphères, n'est que de 28 mètres environ. Le jet entraîné par la vapeur pourra donc refouler l'eau de la chaudière. — Il est facile de saisir l'analogie qui existe entre le jeu de l'injecteur et celui de l'appareil que nous avons décrit en parlant de la *force-vive* (I, 82).

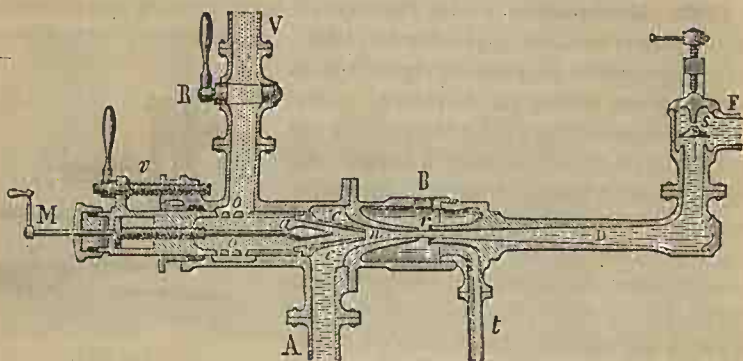


Fig. 873.

Quand la tension diminue dans la chaudière, la quantité d'eau que peut refouler l'injecteur diminue également; mais le rapport entre le poids de cette eau et celui de la vapeur qui l'entraîne augmente. L'appareil peut fonctionner sous une pression de $\frac{1}{3}$ seulement au-dessus de la pression atmosphérique. Plus la pression est faible, plus il faut enfoncer l'orifice n dans le cône cc qui l'enveloppe; ce que l'on fait au moyen de la vis v , qui fait glisser tout le système Mn dans une boîte à étoupes. On reconnaît que l'appareil est bien réglé, quand il ne tombe pas d'eau par le tube de trop-plein t . B est un regard par lequel on peut examiner la forme du jet liquide, pendant qu'on enfonce plus ou moins l'obturateur a , en agissant sur la manivelle M.

L'injecteur Giffart est très-employé, tant dans les machines fixes que sur les locomotives; il économise les 3 ou 4 pour cent de travail que dépense la pompe d'alimentation, dont l'entretien est si incommode. Il peut servir de machine à élever l'eau. Avec une pression de 8 atmosphères, on peut la faire monter à 30 mètres, et dans les cas où l'on a besoin d'eau chaude, l'appareil est très-

économique. Certains navires à vapeur ont été munis d'un semblable appareil, permettant, en cas d'accident, d'extraire de la cale des centaines de mètres cubes d'eau par heure, au moyen de la vapeur des chaudières.

1223. APPAREILS DE SÛRETÉ. — Les chaudières sont accompagnées de divers appareils de sûreté, destinés à empêcher leur rupture. Ces appareils sont les *souppes de sûreté*, les *manomètres* et les *indicateurs du niveau*.

Souppes de sûreté. — Pour limiter la tension de la vapeur, on ménage à la partie supérieure de la chaudière une ouverture, fermée par une soupape chargée, que la vapeur doit soulever dès qu'elle atteint une certaine pression. Si s est l'aire de l'ouverture en centimètres carrés, et P la pression limite en centimètres de mercure, cette pression équivaut à un poids égal à $sP \times 13,6$. Le poids de la soupape et de sa charge devra donc, pour faire équilibre à l'effort de la vapeur, être égal à $s(P - H) 13,6$; H représentant la pression atmosphérique, qui doit être retranchée de P , dont elle contrebalance une partie égale à H .

La valeur qu'il faut donner à l'ouverture s dépend de l'étendue S de la surface de chauffe; on la détermine au moyen de la formule

$$d = 2,6 \sqrt{\frac{S}{P - 0,412}}$$

dans laquelle d est le diamètre

de la soupape supposée circulaire, et P la tension limite de la vapeur en atmosphères. Il résulte de l'expérience, qu'une soupape ayant les dimensions données par cette formule laisse passer, quand elle est soulevée, toute la vapeur qui se produit avec le feu le plus vif. On emploie ordinairement deux soupapes semblables, par excès de précaution.

La soupape de sûreté a été inventée par Papin. On la dispose ordinairement comme dans la figure 874. On l'applique sur le bord bien dressé d'une tubulure placée à la partie supérieure de la chaudière. Un levier cP chargé d'un poids P , et guidé dans ses mouvements par une pièce a , appuie sur la pointe O . La soupape est représentée à part en S ; elle se compose d'un plateau circulaire, qui s'applique exactement sur le bord de l'ouverture, en le recouvrant très-peu, dans une largeur au plus de 2^{mm} pour les plus grandes soupapes. Trois ailettes, disposées au-dessous du plateau, et dont on voit la coupe en r , guident la soupape, et ne lui permettent que les mouvements dans le sens vertical.

Plaques fusibles. — Pour limiter la tension de la vapeur, on peut aussi procéder en limitant sa température. C'est ce que l'on fait en fermant une ouverture de la chaudière au moyen d'une plaque faite d'un alliage d'étain, de bismuth et de plomb, susceptible de fondre à la température que possède la

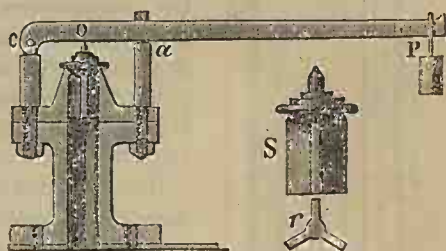


Fig. 874.

vapeur lorsque sa tension atteint la limite qu'on ne veut pas dépasser. La plaque fusible est fixée sur une tubulure, par un anneau de fer retenu par des boulons, et portant un grillage destiné à soutenir la plaque, qui est assez fragile. Dans la figure 868, une plaque fusible est disposée à l'un des bouts de la tubulure *s*, dont l'autre bout porte la soupape de sûreté. — Les plaques fusibles, autrefois imposées en France par l'administration, sont aujourd'hui abandonnées; elles présentent le grave inconvénient de mettre, quand elles fondent, la machine hors de service pendant un certain temps, ce qui peut occasionner des accidents, surtout dans les navires à vapeur qui, privés de leur moteur, peuvent être jetés à la côte par les vents ou les courants.

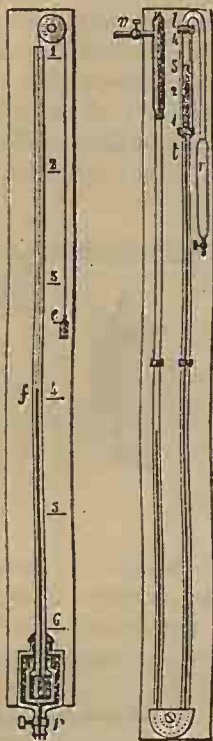


Fig. 875.



Fig. 876.

1224. Manomètres. — La pression de la vapeur est indiquée par des *manomètres* de formes diverses. Dans les chaudières à basse pression, on emploie un tube en U, contenant du mercure, dont une extrémité communique avec la vapeur, et l'autre avec l'atmosphère. La différence de niveau dans les deux branches indique l'excès de pression de la vapeur sur celle de l'air extérieur.

Dans les chaudières à haute pression, on se sert souvent de manomètres à air comprimé (I, 337). Mais ces instruments donnent, au bout de quelque temps, des indications fausses, le mercure chaud absorbant une partie de l'oxygène de l'air qu'ils contiennent. En outre, l'oxyde formé se dépose sur le tube et empêche d'apercevoir le niveau. On pourrait obvier à ces inconvénients en remplissant le tube, d'azote. Il peut arriver aussi que, lors des diminutions brusques de pression, une portion du gaz sortant du tube, la graduation se trouve inexacte. Enfin, les indications du manomètre à air comprimé sont influencées par la température, qui, dans le voisinage de la chaudière, peut s'élever notablement.

Manomètres à air libre. — Le plus simple de ces instruments consiste en un tube ouvert *f* (*fig. 875*) plongeant dans une cuvette de mercure, enveloppée d'un vase hermétiquement fermé qui communique par le robinet *r*, avec la chaudière. La pression de la vapeur soulève le mercure dans le tube, à une hauteur égale à autant de fois 76^{cm} que la vapeur possède d'atmosphères de pression en sus de celle de l'air. Comme le tube est très-long, ce qui rend peu commode l'observation du niveau du mercure, on dispose souvent un flotteur *f* attaché à un fil passant sur une poulie et tendu par un contre-poids *e* qui indique les mouvements de la colonne de mercure, sur une échelle dont il parcourt les

divisions. Le tube peut alors être en fer, et son diamètre doit être assez grand pour que le flotteur ait ses mouvements libres.

Quand la pression doit dépasser 5 atmosphères, on préfère le manomètre à air libre de M. Chaussenot aîné (fig. 876). Un tube de fer replié en U contient du mercure; ce tube est enterré dans le sol, de manière que le robinet du vase de fonte *v* soit à la hauteur de la chaudière. La vapeur de cette dernière presse sur l'eau qui remplit le vase *v* et fait monter le mercure dans un gros tube de verre *ll* fixé à l'extrémité opposée, et portant une graduation établie directement par l'expérience. Le diamètre du tube *ll* étant plus grand que celui du tube de fer, les déplacements du niveau dans le premier sont assez peu étendus pour que l'observation en soit facile. Le vase *r* est destiné à recevoir le mercure qui pourrait être projeté par suite d'une augmentation brusque de pression.

Manomètre à colonnes multiples. — Cet instrument, dû à M. Richard, ne présente pas la hauteur incommode de ceux que nous venons de décrire. On y voit (fig. 877) une série de 4 tubes en U réunis deux à deux par leur partie supérieure. Ces tubes sont à moitié pleins de mercure, et la partie supérieure est remplie d'eau. La vapeur exerce sa pression en *An*, et l'extrémité *B* s'ouvre dans l'atmosphère. Quand la pression est la même en *A* et *B*, les 8 niveaux du mercure sont sur la même horizontale. Mais si la pression en *A* est plus grande qu'en *B*, il s'établit dans chacun des 4 tubes en U une même différence de niveau, et la pression en *An* fait équilibre à la pression de l'atmosphère augmentée de la colonne de mercure *n'n* répétée 4 fois, si l'on néglige les pressions produites par les colonnes d'eau.

Thermo-manomètre. — Au lieu de mesurer directement la pression de la vapeur, on peut observer sa température pour en déduire la pression au moyen des *tables de tension*. Cette température est donnée par un thermomètre pouvant marquer 200°, renfermé dans un tube de fer, qui entre dans la chaudière et est rempli de limaille de cuivre. Cet instrument porte une échelle sur laquelle sont inscrites les pressions de la vapeur pour chaque température; ainsi gradué, il se nomme *thermo-manomètre*.

Manomètres métalliques. — Les appareils les plus commodes pour indiquer la pression dans les chaudières sont les manomètres métalliques (I, 390). On les emploie principalement sur les bateaux à vapeur et les locomotives des chemins de fer; ils sont peu embarrassants et peu fragiles. Il est bon d'en vérifier de temps en temps la graduation, à cause des changements que pourrait éprouver

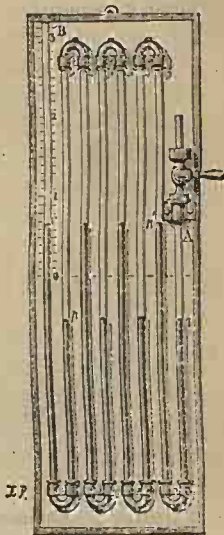


Fig. 877.

l'élasticité des lames métalliques sous l'influence de pressions prolongées, et de changements fréquents de température.

1225. Indicateurs du niveau. — Nous verrons que l'abaissement du niveau au-dessous de la surface de chauffe est une cause grave d'explosion; aussi s'est-on appliqué à perfectionner les appareils d'alimentation et ceux qui font connaître la position du niveau. Dès le principe, on a employé deux tubes à robinet, nommés *jauge à niveau* ou *robinets d'épreuve*, s'ouvrant dans la chaudière très-près de la surface de l'eau, l'un au-dessus et l'autre au-dessous de cette surface. Dans la position normale du niveau, le premier doit donner de la vapeur quand on ouvre le robinet, et le second de l'eau. On voit ces tubes dans la figure 848.

Tube à niveau. — Le plus souvent, les chaudières à vapeur sont munies d'un *tube à niveau*, *n* (fig. 869 et 871), formé d'un tube vertical en cristal, communiquant par le haut avec la vapeur, et par le bas avec l'eau de la chaudière. Le niveau, dans le tube de cristal, est toujours à la même hauteur que dans la chaudière. Des robinets, habituellement ouverts, sont placés aux extrémités du tube de cristal; on les ferme si ce tube vient à être brisé par accident.

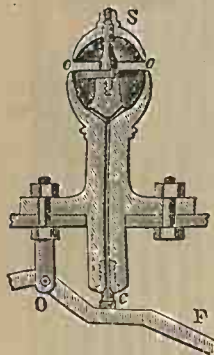


Fig. 878.

Flotteur à indicateur. — Cet appareil imaginé par Brindley, en 1760, se voit en *f'* (fig. 869), il consiste en un flotteur qui suit le niveau de l'eau, et est lié à un contre-poids, par un fil métallique qui traverse une boîte à étoupe *f'* et passe sur une poulie de renvoi. La position du niveau est indiquée, soit par la position du contre-poids, soit par une aiguille fixée à l'axe de la poulie. Souvent, on dispose le flotteur à l'extrémité d'un levier, comme on le voit en *f*.

Flotteur à sifflet d'alarme. — Le défaut d'attention pourrait rendre inutiles les indications des appareils à niveau que nous venons de décrire. Sorel a imaginé une disposition, au moyen de laquelle un chauffeur inattentif est averti du trop grand abaissement du niveau. Le flotteur *f* (fig. 869) est fixé à l'extrémité d'un levier, dont l'extrémité opposée porte un contre-poids. Ce levier, dont le point d'appui est en *O* (fig. 878), porte un bouchon conique en métal qui ferme une ouverture évasée *c*. La vapeur s'échappe par cette ouverture quand le flotteur qui soutient le bras *F*, descend au-dessous de la limite assignée. La vapeur

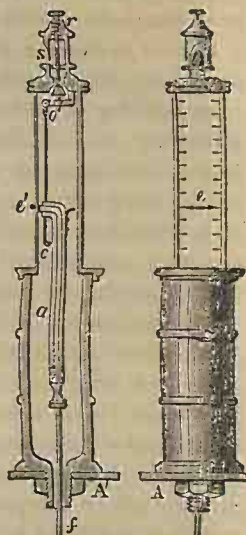


Fig. 879.

produit alors un son intense en traversant un *sifflet à vapeur* *Soo* (I, 676). On voit en *Sf* (*fig.* 869), l'ensemble de l'appareil.

Indicateur magnétique. — Un flotteur soutient, par l'intermédiaire de la tige *f* (*fig.* 879), un aimant *a*, qui peut monter et descendre dans un tube métallique fixé sur la paroi supérieure *A, A'* de la chaudière. Une petite aiguille horizontale d'acier *e, e'*, appuyée sur une face plane du tube, suit les mouvements de l'aimant, et indique par sa position la hauteur du niveau. Si ce dernier s'abaisse trop, l'extrémité de l'aimant agit sur le crochet *e*, et fait ouvrir une soupape *o*, par laquelle la vapeur s'échappe en faisant jouer le sifflet d'alarme *s*. Quand l'aimant remonte, la soupape *s* se ferme par l'effet d'un petit ressort logé en *r*. Cet appareil ingénieux est dû à M. Lethuillier-Pinel.

1226. Des explosions des chaudières à vapeur. — Des accidents graves, de moins en moins fréquents, mais qui viennent encore de temps à autre épouvanter l'industrie, se produisent avec les chaudières à vapeur. On a vu trop souvent ces chaudières éclater, et des fragments quelquefois d'un poids énorme, être lancés à de grandes distances. Certains de ces accidents sont occasionnés par le mauvais état des appareils de sûreté et par l'usure des chaudières, dont les parois perdent, à la longue, de leur épaisseur, soit par l'action corrosive de certaines eaux¹, soit par l'action du feu; il faut donc visiter de temps en temps les générateurs dans toutes leurs parties. D'autres, ont été occasionnés par l'imprudence des ouvriers qui, pour accélérer la marche de la machine surchargent les soupapes, et même, chose à peine croyable, les fixent complètement. Pour empêcher de semblables imprudences, on les recouvre d'un grillage.

D'autres explosions dont les causes sont restées souvent obscures, sont accompagnées de circonstances qu'il faut d'abord signaler; on a observé souvent que la catastrophe avait été précédée d'un ralentissement dans la marche de la machine. On a remarqué encore, principalement sur les bateaux à vapeur, que l'accident avait lieu au moment où la machine arrêtée depuis quelque temps, était mise en marche, c'est-à-dire quand la vapeur accumulée dans le générateur perdait subitement une partie de sa tension en se répandant dans le corps de pompe. Cela posé, nous allons faire connaître les principales causes auxquelles on attribue les explosions.

1° Abaissement du niveau. — L'abaissement du niveau au-dessous de la limite supérieure de la *surface de chauffe* présente de grands dangers. La partie de cette surface qui n'est plus mouillée peut rougir, ce qui diminue énormément la ténacité du fer, et le constitue le long de la ligne de niveau dans un état moléculaire qui change brusquement, des parties rouges aux parties mouillées, d'où résulte un arrangement irrégulier des molécules qui les rend plus faciles à séparer. Cette circonstance explique pourquoi la rupture se fait ordinairement

¹ Dans les mines où l'on n'a à sa disposition que des eaux corrosives, on neutralise leur action en y mêlant de la craie exempte de sable, ou bien des morceaux de zinc, sur lesquels l'eau exerce de préférence son action.

suivant la ligne horizontale de niveau, malgré les inégalités d'épaisseur sur cette ligne. Pour provoquer l'explosion, il suffit d'une diminution de pression, produite, par exemple, par l'ouverture de la soupape de sûreté; il se fait aussitôt une ébullition tumultueuse, l'eau mousse, elle est lancée contre les parois brûlantes et au milieu de la masse de vapeur surchauffée par leur contact; il se forme alors une énorme quantité de vapeur à laquelle la chaudière ne peut résister, surtout dans les parties incandescentes où le fer n'a plus que $\frac{1}{2}$ de sa résistance à froid. Il résulte de cette explication, due à Perkins, qu'il ne faut pas donner aux soupapes de sûreté une trop grande ouverture; pour que, la diminution de pression n'étant pas trop brusque au moment où elles s'ouvrent, l'eau ne mousse pas trop. Ajoutons qu'un changement brusque de tension imprime à la chaudière une secousse qui peut aussi en favoriser la rupture ¹.

2° Dépôts dans les chaudières. — L'incandescence si dangereuse des parois peut être provoquée par une autre cause que l'abaissement du niveau : l'eau de la chaudière dépose à mesure qu'elle se réduit en vapeur, les matières terreuses ou salines qu'elle tient en dissolution. Ces dépôts prennent souvent une structure cristalline et adhèrent aux parois avec une telle force qu'on ne peut les enlever qu'à l'aide d'un ciseau. C'est principalement dans les chaudières à basse pression, où la vaporisation est plus lente, qu'ils acquièrent cette grande dureté; ils ralentissent la production de la vapeur en empêchant le passage de la chaleur. Ainsi séparées de l'eau par un corps mauvais conducteur, les parois peuvent rougir et perdre une grande partie de leur ténacité, ce qui est déjà un danger. Si ensuite quelque fissure se forme dans la croûte, calcinée au contact des parois rouges, l'eau pénètre jusqu'au métal brûlant, il se produit une vaporisation brusque qui fait détacher de grandes plaques de la croûte déposée; et l'eau venant au contact de la surface découverte, produit instantanément une énorme quantité de vapeur. — On évite cette cause d'explosion, en nettoyant souvent les chaudières; tous les huit ou quinze jours, on les vide et on enlève la couche adhérente. En mettant des fragments anguleux de verre ou de métal dans les chaudières, on peut empêcher les dépôts d'adhérer, à cause des mouvements qu'éprouvent ces fragments pendant l'ébullition.

On peut éviter les incrustations, par un moyen que le hasard a fait connaître : des ouvriers avaient déposé dans une chaudière qu'on venait de vider, des pommes de terre pour les faire cuire, puis ils les avaient oubliées. Lorsque plus tard, la chaudière ayant fonctionné, on voulut la nettoyer, on vit avec surprise qu'il ne s'était pas formé de dépôt solide. La pulpe des pommes de terre, délayée et mêlée aux matières déposées, les avait empêché de prendre de la consistance. Depuis, on a employé le son de farine, l'argile, qui se délayent dans l'eau et empêchent les dépôts d'adhérer. On arrive au même résultat en colorant l'eau

¹ Si par une cause quelconque le niveau s'abaisse au-dessous de la surface de chauffe, il faut fermer le registre de la cheminée et ouvrir les portes du fourneau, pour ralentir la combustion, et se bien garder de soulever les soupapes de sûreté.

au moyen de bois de teinture. M. Delandre a recommandé récemment l'emploi du protochlorure d'étain; il suffit, par mètre cube d'eau, de 1^{kil} de ce sel, qui se change en sous-sel basique insoluble et en sel acide soluble qui dissout les sels terreux. Les résultats obtenus par ces divers moyens dépendent beaucoup de la nature des eaux employées. M. E. Lesueur a remarqué que la présence de fragments de zinc dans les chaudières empêche l'adhérence des dépôts. Ce métal est dissous peu à peu en dégagant de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Des expériences faites sur des chaudières chargées d'eau de mer ou d'eau de rivière, ont donné la proportion de 20^{kil} de zinc pour une machine de 100 chevaux marchant pendant trois mois. — Quand on veut nettoyer la chaudière, on ouvre un robinet placé au fond, pendant que la vapeur exerce encore sa pression, et l'espèce de boue ou de vase déposée, est chassée au dehors.

3° **Explosion des chaudières à bouilleurs.** — Quand les puisarts, qui font communiquer les bouilleurs avec le corps d'une chaudière, sont trop étroits, il peut arriver que la vapeur entraîne l'eau hors de ces derniers, et que ce liquide ne puisse redescendre par les mêmes passages. Alors les bouilleurs, en partie vides, peuvent rougir; l'eau qu'ils contiennent cesse d'être en contact avec les parois, et la production de la vapeur devient très-lente (1156). Il arrive nécessairement un moment où la température des parois s'abaissant, l'eau les mouille, et il se produit tout à coup une telle quantité de vapeur, que la chaudière éclate. M. Normandy a constaté qu'une chaudière pleine d'eau peut être chauffée au rouge, en activant suffisamment le feu. Il faut donc que la combustion soit conduite avec attention et régularité pour éviter qu'il en soit ainsi.

4° Enfin, il se produit quelquefois des explosions d'une violence extrême, que l'on désigne sous le nom d'*explosions fulminantes*, et dont la cause est restée longtemps obscure. M. Donny et M. Galy-Cazalat les expliquent en faisant remarquer qu'une ébullition prolongée doit priver d'air, l'eau d'un générateur dont la pompe d'alimentation fonctionne mal. Alors l'ébullition cesse (1151), la machine marche lentement, ce qui porte à activer le feu, et bientôt une explosion violente met la chaudière en pièces, principalement quand la machine après avoir été arrêtée, est remise en mouvement, auquel cas la pompe d'alimentation introduit de l'eau aérée qui rétablit brusquement l'ébullition¹.

Quand une machine doit rester en repos pendant quelque temps, il est donc prudent de faire fonctionner la pompe d'alimentation, soit à bras, soit au moyen d'une petite machine à vapeur spéciale, nommée *petit cheval*, comme il en existe souvent d'annexée à la machine principale. L'injecteur Giffart est ici précieux, car il peut fonctionner pendant le repos de la machine.

¹ On a cherché aussi à expliquer les ruptures des chaudières à vapeur par la détonation d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène qui se formerait dans l'intérieur, le dernier de ces gaz provenant de la décomposition de l'eau. On a aussi invoqué la production de l'électricité par la vapeur. Mais ces deux explications nous semblent dénuées de fondement, et même en opposition avec plusieurs des lois physiques des mieux établies.

On peut aussi introduire de fines bulles de gaz hydrogène dans l'eau de la chaudière, en décomposant ce liquide, soit au moyen d'un courant électrique suivant l'idée de M. L. Dufour (1153), soit au moyen du zinc, dont nous venons de voir le rôle pour empêcher les incrustations quand il est en quantité suffisante.

1227. Résultats pratiques. — La quantité de chaleur produite par la combustion de la houille est loin d'être entièrement utilisée dans les chaudières à vapeur. Les gaz qui sortent par la cheminée devant conserver une température de 200° à 400°, pour le tirage, emportent une partie de cette chaleur; et il y a des pertes par rayonnement et par communication aux massifs des fourneaux. D'un autre côté, la combustion n'est pas complète. Dans les chaudières à bouilleurs, la combustion de 1^{kil} de houille ne vaporise guère que 5 à 7^{kil} d'eau avec les fourneaux les mieux construits. Dans les chaudières cylindriques sans bouilleurs, on peut vaporiser de 8 à 9^{kil}, quand on a soin de jeter le combustible sur la grille par petites portions et d'une manière à peu près continue. Or, l'expérience montre que la combustion de 1^{kil} de houille dégage environ 7500 calories, qui seraient capables de réduire en vapeur un poids d'eau à 100° égal à $\frac{7500}{537} = 13^{\text{kil}},9$, car il faut 537 calories pour vaporiser 1^{kil} d'eau (1184). Il y a donc beaucoup de chaleur perdue.

En outre, une partie de la vapeur se condense, soit sur la voûte de la chaudière, soit dans les conduits qui mènent au corps de pompe, soit enfin dans le corps de pompe lui-même. Pour atténuer autant que possible ces pertes, on garnit de briques la partie supérieure de la chaudière, on enveloppe les conduits d'étoffes de laine, ou bien on les entoure d'un manchon dans lequel on fait passer des gaz chauds provenant du foyer. Le corps de pompe est préservé du refroidissement au moyen d'une garniture de bois, séparée de sa surface par du charbon en poudre ou toute autre matière peu conductrice; ou bien encore au moyen d'une enveloppe métallique sous laquelle on fait circuler la vapeur. Cette précaution est importante, car, l'eau condensée dans le cylindre se réduit en vapeur quand la communication s'établit avec le condenseur, et la pression de cette vapeur s'oppose au mouvement du piston. Il faut donc que le corps de pompe reste constamment sec. M. Combes a reconnu que l'enveloppe peut faire économiser de 15 à 20 pour cent de combustible.

Une autre cause de perte de chaleur provient de l'eau en fines gouttelettes mêlée à la vapeur et entraînée dans le corps de pompe, où elle gêne les mouvements du piston. Pour éviter cet inconvénient, on adapte souvent à la partie supérieure de la chaudière un dôme au sommet duquel se trouve la prise de vapeur. Ce dôme augmente la capacité de la chambre à vapeur c'est-à-dire de l'espace occupé par la vapeur au-dessus de l'eau. — La quantité de liquide entraînée mécaniquement peut être considérable, et l'on a vu quelquefois la pompe d'alimentation ne pouvoir suffire à la remplacer; mais lorsqu'on eut surmonté la chaudière d'un dôme, la perte diminua tellement qu'il y eut une économie de combustible de près de 25 pour cent.

La quantité de combustible *par cheval et par heure* varie beaucoup suivant les espèces de générateurs, et aussi suivant le système de machine. Ordinairement, on dépense par cheval et par heure de 3 à 5^{kil} de houille, qui vaporisent à peu près 35 litres d'eau. La surface de chauffe doit être de 1,70 mètres carrés, et la surface de la grille de 70 centimètres carrés par cheval.

La quantité de combustible qui correspond au travail utile par force de cheval et par heure, varie aussi énormément, avec le système adopté. Par exemple, tandis que les machines à haute pression *avec détente et condensation* donnent 90,000 à 108,000^{km} par heure, avec 4 à 2,5^{kil} de houille par cheval, ces machines ne donnent que 21,500 à 27,000^{km} avec 10 à 8^{kil} de combustible, quand elles marchent *sans détente ni condensation*. Depuis une dizaine d'années, on est parvenu à économiser considérablement le combustible; ainsi, M. Farcot a construit des machines perfectionnées, qui ne dépensent pas 1^{kil},5 de charbon par heure et par cheval.

De même qu'on a cherché à diminuer le poids du mécanisme des machines à vapeur, de même on s'applique aujourd'hui à réduire les dimensions des générateurs, tout en leur conservant la faculté de produire rapidement la vapeur, soit en augmentant relativement l'étendue de la surface de chauffe, soit en activant la combustion dans un foyer de dimensions restreintes. Les *chaudières tubulaires*, dont nous parlerons bientôt, ont déjà fait beaucoup avancer la question. Il faudrait pouvoir, avec une petite quantité d'eau et au moyen d'une vaporisation rapide, fournir au fur et à mesure la quantité de vapeur dont la machine a besoin.

C'est ce que l'on fait au moyen de chaudières très-petites dont le fond est rendu *incandescent*. Un filet d'eau tombe sur ce fond, prend la forme globulaire (1156) et fournit la vapeur. Des machines donnant de bons résultats ont été construites dans ce système par M. Testud de Beauregard. Une de ces machines est de la force de 20 chevaux. Pour éviter la destruction rapide de la chaudière par le refroidissement brusque produit par l'arrivée de l'eau, le fond contient de l'étain fondu sur lequel tombe cette eau. D'après l'inventeur, l'économie de combustible serait de 50 pour cent.

III. Bateaux à vapeur.

1228. HISTORIQUE. — Papin, qui le premier a fait mouvoir un piston au moyen de la vapeur, est aussi l'inventeur de la navigation à vapeur. Indépendamment des indications qu'il donne dans son ouvrage de 1690, on voit dans une correspondance citée plus haut, entre lui et Leibnitz (1196), qu'il a fait construire un bateau d'assez grandes dimensions, essayé avec succès sur la Fulda. En 1707, ayant désiré transporter son appareil en Angleterre pour y répéter ses expériences et montrer comment on peut, au moyen du feu, « rendre un ou deux hommes capables de produire plus d'effet que plusieurs centaines de rameurs, » il

demanda à l'électeur de Hanovre, par l'entremise de Leibnitz, l'autorisation de faire passer son navire par les canaux, de la Fulda dans le Weser; mais les mariners s'y opposèrent, mirent sa machine en pièces et anéantirent ainsi les dernières espérances de l'inventeur, dont les ressources étaient épuisées et qui mourut dans la misère.

En 1753, l'Académie des sciences de Paris ayant mis au concours la question de la propulsion des navires sans l'emploi du vent, Claude Joffroy songea à employer la machine de Newcomen, comme Jonathan Hull l'avait déjà essayé, pour faire tourner une roue à aubes disposée à l'arrière d'un bateau. En 1770, après les perfectionnements apportés par Watt à la machine atmosphérique, et après quelques tentatives faites sur la Seine par le comte d'Auxiron et Follenai, puis par Perrier, Joffroy fit marcher sur le Doubs, à Baume-les-Dames, une barque de 10 mètres de long, portant des rames palmipèdes mues par la vapeur. Il adopta plus tard les roues à aubes, dans des expériences sur la Saône, en 1783; il remonta cette rivière avec un succès complet entre Lyon et l'île Barbe, en présence d'une foule immense. Il demanda alors un privilège au ministre Calonne. Celui-ci crut devoir consulter l'Académie des sciences, qui exigea de nouvelles expériences sur la Seine. Mais Joffroy était à bout de ressources, il ne put satisfaire à cette condition, et la révolution étant survenue, il émigra et abandonna son entreprise.

Divers autres essais, en Écosse et en Amérique, échouèrent soit à cause de l'imperfection des appareils soit à cause de l'indifférence ou même de l'hostilité du public. Fitch, qui, en 1789, faisait naviguer un bateau à vapeur sur la Delaware, ayant prédit qu'un jour on pourrait traverser l'Atlantique au moyen de la vapeur, passa pour fou.

Fulton, en 1807, eut la gloire de résoudre, au point de vue pratique, le problème de la navigation à la vapeur. Déjà, en 1803, il avait fait marcher sur la Seine, en présence des délégués de l'Académie des sciences, un bateau à vapeur de 33 mètres de long, avec une vitesse de plus de 6 kilomètres à l'heure. Il proposa au premier consul de faire hommage à la France de son invention, après essais officiels, mais il fut éconduit et traité de charlatan. Il retourna alors en Amérique, et construisit un nouveau bateau, le *Clermont*, qui fit, sur l'Hudson, un service régulier entre New-York et Albany. Ce n'est qu'en 1812 que le premier bateau à vapeur parut en Europe; il se nommait *la Comète*, et naviguait sur la Clyde, en Écosse. On sait quels progrès immenses a faits depuis, la navigation à la vapeur.

1229. Machines à vapeur des navires. — Ces machines sont le plus ordinairement à condensation, à cause de la facilité d'avoir de l'eau. La marine de l'État, en France et en Angleterre, a adopté généralement la basse pression. La figure 880 représente la machine d'une frégate à roues de la force de 500 chevaux. Deux appareils semblables sont placés l'un à côté de l'autre et agissent sur le même arbre OO, au moyen de manivelles perpendiculaires l'une à l'autre; de manière que l'une soit dans la position la plus favorable quand l'autre

arrive à un point mort. Dans les navires de petites dimensions, on se contente souvent d'un appareil unique.

La machine de la figure 880 est dans le système de Watt, modifié par Fulton de manière que le balancier se trouve au-dessous de l'arbre OO. Q est le corps de pompe, dans lequel la vapeur arrive par le tuyau *v*, circule dans une chemise qui entoure le corps de pompe, et passe ensuite dans la boîte de distribution contenant le tiroir, dont la tige se voit en *t*. La tige du piston porte une traverse T qui soutient deux bielles pendantes *b*, *b'*, dont les extrémités inférieures s'articulent à deux balanciers, l'un se voit en $\epsilon A c$, placés de part et d'autre de

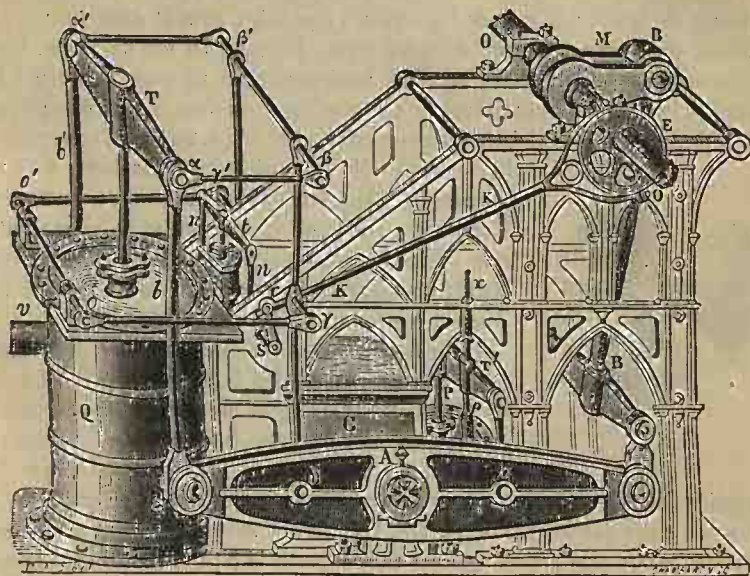


Fig. 880.

l'appareil. Le mouvement de la tige du piston est rendu rectiligne par un double parallélogramme articulé $\alpha\beta\gamma\epsilon$, $\alpha'\beta'...$; dont les barres $\sigma\gamma$, $\sigma'\gamma'$, mobiles autour de l'axe $\sigma\sigma'$, déterminent les inflexions.

Les deux balanciers agissent sur une même bielle BB qui fait tourner la manivelle M adaptée à l'arbre OO, aux extrémités duquel sont fixées les roues à aubes. L'excentrique E règle la distribution de la vapeur; elle fait osciller, par l'intermédiaire de la barre KK, le levier *sr* qui agit sur les bielles pendantes *n*, *n* articulées à la traverse du tiroir, *t*.

P est la pompe à air, mise en mouvement par le balancier, au moyen d'une traverse T' que porte la tige de son piston, et de deux courtes bielles, dont une se voit sur la figure. La traverse T' est guidée en *x*; elle fait aussi fonctionner

la pompe d'alimentation *p* de la chaudière. C est le condenseur, alimenté par un tuyau qui s'ouvre sous l'eau en dehors du navire. Toutes les parties de la machine, soutenues par un bâtis en fonte, sont parfaitement liées entre elles.

Dans les navires de petites dimensions, on emploie assez souvent le système à cylindre oscillant. On emploie encore la machine Maudslay modifiée de manière à ne présenter que peu de hauteur.

1230. Du propulseur des navires à vapeur. — Dès le principe, on a employé, comme appareil de propulsion, des roues à aubes disposées de chaque côté du navire. Les aubes, en frappant l'eau, prennent leur point d'appui dans sa masse, qui résiste par son inertie. Cette application est fort ancienne, car Vitruve dit ignorer le nom de l'inventeur. Les aubes entrent dans l'eau et en sortent obliquement, chacun de leurs points décrivant un arc de cercle. Une composante de l'effort exercé agit donc verticalement et ne peut concourir à la marche. Pour éviter cet inconvénient, divers constructeurs ont imaginé d'employer des aubes mobiles, dont le plan reste vertical pendant tout le temps de l'immersion.

Par exemple, M. Cavé adapte une manivelle à l'axe horizontal de chaque aube; cette manivelle est articulée à une barre qui reçoit un mouvement de va et vient, d'un excentrique fixe qui entoure l'arbre des roues. Malgré ce perfectionnement, les roues à aubes ne donnent environ que 0,66 d'effet utile.

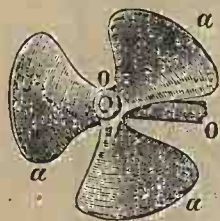


Fig. 881.

Les roues à aubes présentent en mer de grands inconvénients : quand les flots sont agités, elles se trouvent tantôt submergées presque totalement, tantôt entièrement hors de l'eau. D'où il résulte, indépendamment du ralentissement de la marche, que la machine éprouve des secousses brusques qui en ébranlent toutes les parties. — Quand il s'agit des navires de guerre, les roues à aubes présentent des inconvénients encore plus graves : placées dans la partie la plus vulnérable du navire, elles sont exposées à être brisées par les boulets, et elles occupent un grand espace, dans lequel on ne peut installer de canons. L'adoption définitive de la vapeur dans la marine militaire était donc subordonnée à l'adoption d'un nouveau propulseur, l'hélice, qui remplit toutes les conditions désirables¹.

Propulseur à hélice. — Considérons d'abord une vis à filet très-saillant, fixée sous l'eau à l'arrière du navire dans la direction de sa quille. Si l'on imprime à cette vis un mouvement rapide de rotation sur elle-même, l'eau, en vertu de son inertie, se comportera comme un écrou, et en supposant qu'elle ne cède pas, la vis avancera, à chaque tour, d'une quantité égale à son pas. Comme l'eau cède, tout le travail de l'hélice n'est pas utilisé pour la marche; une partie est employée à repousser l'eau en arrière. Le travail utile augmente avec la

¹ Nous avons vu (I, 234) comment J. Rumsey, en 1803, imagina de faire marcher une barque par la réaction de l'eau refoulée par un piston mû par la vapeur.

vitesse de rotation, qui est ordinairement de 4 tours environ par seconde. Ce résultat dont on peut se rendre compte en théorie, a été constaté par des expériences de M. Normand. On se contente ordinairement d'une seule spire d'hélice, et, pour donner moins de longueur à son arbre, on la partage en plusieurs parties que l'on distribue autour de l'arbre, sur une même section. La figure 881 représente en perspective une hélice dont la spire est divisée en trois parties ou ailes, *a, a, a*, disposées autour de l'arbre *OO*. Souvent il n'y a que deux ailes.

L'hélice est installée dans cette partie étroite du navire qui forme à l'arrière, en avant du gouvernail *g*, (*fig. 882*) une sorte de mur vertical *aa*. La figure représente la coupe longitudinale d'une frégate à hélice, par un plan vertical passant par la quille. Une large fenêtre *aa*, garnie d'un cadre de fer, supporte l'arbre de l'hélice *i*. Cet arbre traverse la partie postérieure du navire, par une ouverture garnie d'un presse-étoupe. Un autre arbre *n*, placé sur le prolongement du premier, peut en être rendu dépendant ou indépendant, au moyen du levier *r* qui fait mouvoir un manchon à coulisse garni de chevilles. L'arbre *n* est mis en

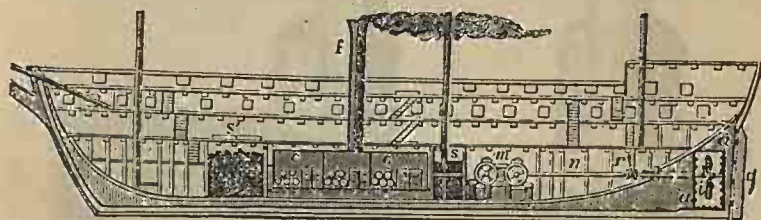


Fig. 882.

mouvement par la machine à vapeur *m*, composée de quatre corps de pompe horizontaux, disposés deux à deux de part et d'autre de l'arbre *n*. Les pistons agissent, par l'intermédiaire de bielles, sur des manivelles que porte l'arbre. — Quelquefois, comme dans le navire l'*Archimède*, l'arbre *n* porte un tambour garni de dents, qui commande un long pignon affermi sur l'arbre de l'hélice. La grande longueur donnée au pignon est destinée à éviter la rupture des dents. Cette disposition permet de donner à l'hélice une plus grande vitesse. *c, c* sont les chaudières; *f* la cheminée; et *s, s'* les soutes à charbon. On voit que tout l'appareil est à fond de cale et par conséquent à l'abri des accidents de guerre.

L'emploi de l'hélice comme propulseur des navires a précédé la découverte de la machine à vapeur. Du Quet, en 1687, a fait le premier quelques essais avec cet appareil. Plus tard, en 1777, David Bushnell réussit, en Amérique, à faire marcher un bateau plongeur au moyen d'une hélice. Après les essais incomplets de Charles Dallery, en 1803, le capitaine français Delisle proposa 20 ans plus tard d'appliquer l'hélice aux navires à vapeur de la marine de guerre. Vers 1843, Sauvage perfectionna beaucoup cette espèce de propulseur, et reconnut que l'effet utile est maximum quand on ne conserve qu'une seule spire. Le premier

navire à hélice expérimenté en France est l'*Archimède*, construit par F. Smith, qui fit enfin adopter ce mode de propulsion.

L'hélice étant placée au-dessous du niveau de l'eau, le mouvement des flots ne gêne pas habituellement son action, et elle est à l'abri des boulets de l'ennemi. On peut lui reprocher l'usure rapide des coussinets qui portent son arbre, à cause de sa grande vitesse de rotation, et la trépidation assez incommode qu'elle produit à l'arrière du navire.

1231. Chaudières des navires à vapeur. — Dans les générateurs des navires, on cherche principalement à diminuer le poids de l'appareil, tout en conservant une grande surface de chauffe. On leur donne ordinairement une forme qui se moule sur les flancs du navire, et les parois planes opposées sont reliées par des tirants allant d'une face à l'autre, pour les empêcher de s'écarter. Ces chaudières renferment un ou plusieurs foyers intérieurs suivis de *carneaux*,

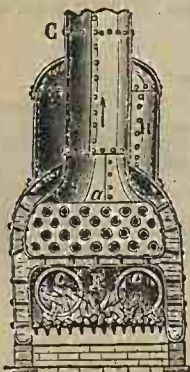


Fig. 883.

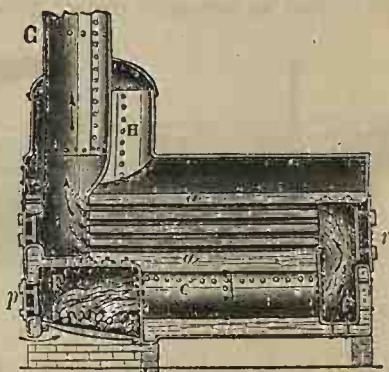


Fig. 884.

c'est-à-dire de gros tuyaux qui aboutissent à la cheminée après avoir fait plusieurs tours à travers l'eau. La bouche du foyer, qui est lui-même entouré d'eau, est fixée par son contour au bord d'une ouverture pratiquée dans une des parois verticales de la chaudière. On évite ainsi d'employer des fourneaux de briques qui surchargeraient le navire. On dispose souvent, dans la chaudière, des cloisons destinées à retenir l'eau quand le navire s'incline.

Chaudières tubulaires. — Pour obtenir une grande surface de chauffe, on emploie les chaudières tubulaires, inventées en 1803 par Charles Dallery, mais sous la forme suivante. Deux réservoirs, placés l'un au-dessus de l'autre, communiquaient entre eux par un grand nombre de tubes verticaux, remplis d'eau, ainsi que le réservoir inférieur. La flamme du foyer circulait autour de ces tubes, dans lesquels il se formait une grande quantité de vapeur qui se rendait dans le réservoir supérieur.

Dans les chaudières tubulaires employées aujourd'hui, qui ont été imaginées

par Marc Séguin, pour les locomotives, la flamme du foyer passe à travers des tubes, dits *tubes à feu*, enveloppés par l'eau. La figure 7 représente une coupe transversale, et la figure 759 une coupe longitudinale d'une de ces chaudières, les mêmes lettres désignant les mêmes objets dans les deux figures. F est le foyer, dans lequel on jette le charbon par la porte *p*. La flamme traverse d'abord deux gros tuyaux *c*, *c* entourés d'eau, arrive dans l'espace *f*, et s'engage dans les tubes nombreux *aa* qui traversent la chaudière, d'où elle se rend dans la cheminée C. On voit que la surface de chauffe est d'autant plus grande que les tubes *aa* sont en plus grand nombre. La prise de vapeur se fait au haut de la *chambre à vapeur* H. En *r* est une porte que l'on ouvre quand on veut nettoyer les tubes *aa*; une autre porte, destinée au même usage, se voit du côté opposé.

En mer, l'eau salée avec laquelle on alimente les chaudières, tendant à se saturer et à déposer du sel, on retire de l'eau de temps en temps, par des robinets placés à la partie la plus basse de la chaudière; c'est ce qui s'appelle *faire l'extraction*. On emploie aussi des pompes qui fonctionnent d'une manière continue; telles sont les pompes à saumure de Maudslay. Enfin, on a imaginé de charger les chaudières avec de l'eau douce, et de les alimenter avec l'eau distillée provenant de la condensation de la vapeur, que l'on fait arriver dans un système de tubes, autour desquels on fait circuler de l'eau froide.

Les perfectionnements notables apportés aux chaudières dans ces dernières années, et la grande économie de combustible qui en est résultée, ont permis de franchir l'Atlantique, avec des navires à vapeur emportant tout le charbon nécessaire à la traversée. C'est en 1838 qu'on a conçu l'idée hardie d'un semblable voyage. Après des hésitations prolongées et des discussions animées, on construisit un navire de fort tonnage, le *Great-Western*, muni de deux machines de la force de 240 chevaux. A l'annonce de ces préparatifs, le *Sirius*, petit navire de 320 chevaux, voulut tenter l'entreprise, et partit le 5 avril de Cork, en Irlande, emportant 450 tonnes de charbon. Le *Great-Western* partit de Bristol trois jours après; les chefs de l'entreprise n'avaient pu trouver que sept passagers, ce qui rappelle que Fulton n'en avait trouvé qu'un seul, lors de son premier voyage sur l'*Hudson*. Le *Sirius* fut atteint au bout de trois jours, par le *Great-Western*, mais quand il eut brûlé une grande partie de son combustible, il reprit les devants, et arriva le 23 avril en vue de New-York. La nouvelle de l'entreprise était parvenue dans cette ville, et la foule se portait chaque jour au bord de la mer, interrogeant avec anxiété l'horizon. L'enthousiasme fut général quand on aperçut au loin le panache de fumée qui annonçait l'arrivée du premier navire à vapeur qui eût franchi l'Océan. Bientôt le *Sirius* jeta l'ancre, les forts tirèrent 26 coups de canon, les navires de la rade se pavoisèrent, et les cloches de la ville furent mises en branle. Quelques heures après, le *Great-Western* abordait à son tour, ranimant un enthousiasme qui était loin d'être épuisé. Depuis, la navigation transatlantique à vapeur s'est régularisée, et quelquefois la traversée se fait en moins de dix jours.

IV. Locomotives.

1432. HISTORIQUE. — Nous avons vu que l'invention de la machine à vapeur a été provoquée principalement par le désir de faciliter l'exploitation des mines. Les chemins de fer et les *machines locomotives*, au moyen desquelles on les parcourt avec rapidité, sont dus à la même préoccupation. Pendant longtemps, les locomotives n'ont donné que des résultats insignifiants, à cause de la difficulté d'obtenir beaucoup de vapeur avec un appareil de dimensions nécessairement restreintes. Ce n'est que depuis qu'on est parvenu à obtenir une grande surface de chauffe dans un très-petit espace, que ces merveilleux appareils ont pu donner les résultats que nous admirons aujourd'hui.

Dès l'année 1759, le Dr Robison, ami de Watt, songea à faire mouvoir des voitures par la force de la vapeur; mais on ne connaissait pas alors les machines sans condensation, et l'appareil n'aurait pu transporter la masse d'eau dont il a besoin. En 1778, un ingénieur français, Cugnot, fit à l'arsenal de Paris le premier essai d'une voiture à vapeur. Cette machine, sans condenseur, destinée aux routes ordinaires, aurait pu faire une lieue à l'heure, mais la quantité de vapeur fournie par la chaudière étant trop petite, la machine s'arrêtait bientôt. Les essais faits depuis sont presque tous relatifs à la locomotion sur les chemins de fer, systèmes de voies qui existaient en Angleterre depuis deux siècles, près des mines, pour le transport du minerai. On employa d'abord exclusivement des chevaux pour trainer les chariots attachés les uns à la suite des autres; plus tard, on se servit de machines à vapeur fixes, qui les tiraient au moyen d'un câble s'enroulant sur un tambour, comme cela se pratique encore aujourd'hui sur certains chemins de fer, dans les endroits où la pente est très-prononcée.

Deux ans après divers essais d'O. Evans, qui fit marcher une voiture à vapeur dans les rues de Philadelphie, Trevithick et Vivian, en 1802, construisirent la première locomotive remorquant des wagons chargés. Elle consistait en une chaudière cylindrique à foyer intérieur et à carneaux, au milieu de laquelle se trouvait un corps de pompe vertical. La tige du piston agissait sur deux manivelles placées aux extrémités de l'essieu de deux roues, par l'intermédiaire de bielles pendantes. Un volant était adapté à l'arbre des roues, pour régulariser le mouvement qui leur était imprimé par la vapeur. En supposant que les roues ne pussent, en tournant, glisser sur les rails, la voiture s'avancait, à chaque tour, d'une quantité égale à la longueur de leur circonférence. Une semblable machine fut employée dans le pays de Galles, sur un chemin de fer de 3 lieues de longueur dépendant d'une mine de charbon. Elle remorquait 100 tonnes de houille avec une vitesse de 2 lieues à l'heure. Mais, à cause de l'insuffisance de la surface de chauffe, il fallait emmagasiner de la vapeur avant de partir, et la ménager pendant le trajet, si l'on ne voulait être forcé de s'arrêter.

On croyait alors que le frottement sur des rails unis ne suffisait pas pour empêcher le glissement des roues. Pour lever cette difficulté, qui pouvait n'être pas chimérique avec les machines de faible poids que l'on construisit d'abord, on cannela les rails, qui alors s'usèrent rapidement. En 1811, Blenkinsop plaça dans toute la longueur de la voie une crémaillère dont les dents s'engageaient dans celles d'une roue mue par la machine. En 1812, Chapmann remplaça la crémaillère par une chaîne sans fin tendue parallèlement aux rails. Brunton, en 1813, fit avancer une locomotive au moyen de barres articulées fonctionnant comme les jambes de derrière d'un cheval. Ce n'est enfin, qu'en 1814, que Blackett, ingénieur anglais, pensa que l'adhérence sur des rails unis, pourrait bien être suffisante pour empêcher le glissement; il fallait seulement charger les roues d'un poids d'autant plus fort, que la machine devait remorquer une plus lourde charge. — L'usage des locomotives fut considérablement simplifié par cette découverte, et dès lors, on travailla activement à en perfectionner toutes les parties. Dodd et Stephenson supprimèrent le volant, en associant deux corps de pompe, agissant sur des manivelles perpendiculaires l'une à l'autre. Hackworth supprima tout engrenage. Plus tard, Stephenson inclina les cylindres à 45°, et l'on en vint peu à peu à les placer horizontalement, ce qu'on n'avait encore osé faire sur aucune machine, pensant que les pistons s'useraient trop irrégulièrement.

Malgré ces perfectionnements, les locomotives ne pouvaient fournir qu'une course peu étendue, à cause de l'exiguïté de la surface de chauffe, à laquelle on n'avait pu faire dépasser 8 mètres carrés, en développant le plus possible les circonvolutions des carneaux. Enfin, en 1827, la solution si longtemps cherchée fut trouvée par Marc Seguin, à la suite d'expériences faites dans les chantiers du chemin de fer de Saint-Etienne à Lyon. Il imagina de disposer à travers l'eau de la chaudière, des tubes dits *tubes à feu*, parcourus par la flamme du foyer, de manière à obtenir ainsi une surface de chauffe considérable. En 1829, cette invention fut appliquée par G. Stephenson, qui, le premier, construisit une locomotive capable de fournir, d'une manière continue, la quantité de vapeur nécessaire à sa marche. Cette découverte coïncida avec la construction du premier chemin de fer mis à la disposition des voyageurs. Pour mettre un frein à l'avidité des propriétaires du canal de Liverpool à Manchester, on construisit entre ces deux villes un chemin de fer, destiné d'abord au transport des marchandises seulement, sur lequel les wagons devaient être remorqués par des machines à vapeur fixes. Quand il fut terminé, les ingénieurs songèrent à employer des locomotives, et ils appelèrent tous les constructeurs à un concours où devait être couronnée la machine la plus parfaite. La locomotive de Stephenson remporta le prix; elle avait quatre roues, 12 mètres carrés de surface de chauffe, et remorquait 13 tonnes sur un plan horizontal, avec une vitesse de 6 lieues à l'heure; isolément, elle faisait 10 lieues à l'heure.

1433. Locomotives à six roues. — On a, depuis, perfectionné les locomotives, tout en leur conservant les dispositions générales adoptées par Stephenson. La figure 886 représente la coupe longitudinale d'une locomotive à

six roues. On y distingue deux parties principales : la chaudière avec son foyer, et le mécanisme que la vapeur fait mouvoir. Le corps de la chaudière présente une forme cylindrique ; à l'une de ses extrémités se trouve une cavité rectangulaire, F, entourée d'eau de tous côtés, excepté en bas : on la nomme *boîte à feu*. Toutes les parties planes sont reliées par des tirants qui s'opposent à la flexion des parois. La porte o sert à jeter le combustible sur la grille, à laquelle l'air arrive par une large ouverture n, qui peut se fermer plus ou moins, au moyen d'une tige qui arrive jusqu'à une galerie, placée près de la boîte à feu. Des tubes e, e, e, qui vont de la boîte à feu à l'extrémité opposée de la chaudière,

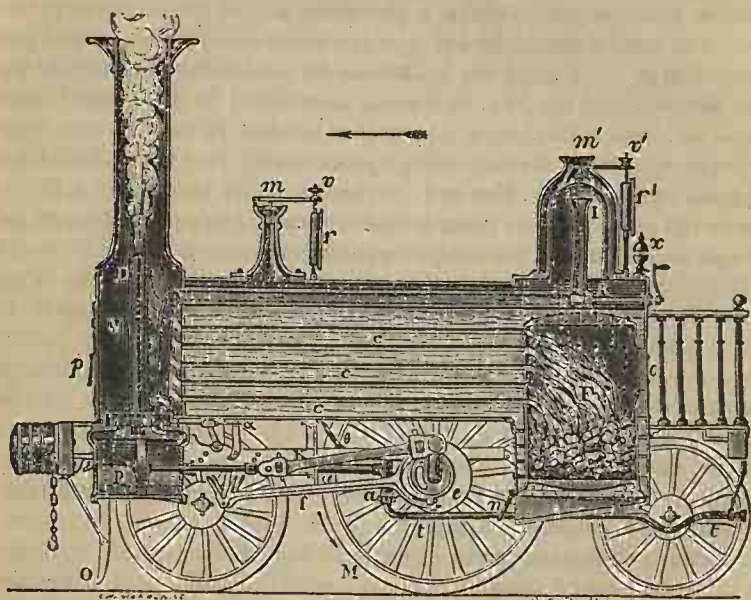


Fig. 885.

sont entourés par l'eau qu'elle contient. La flamme les traverse et se rend dans la *boîte à fumée* DV que surmonte la cheminée. En p est une large porte que l'on ouvre pour nettoyer les *tubes à feu*, dont on voit les extrémités dans la coupe transversale à travers la boîte à fumée (fig. 886). En m, m' (fig. 885) sont les soupapes de sûreté, pressées par des ressorts r, r', dont on peut graduer la tension au moyen de vis v, v'. En x est un sifflet à vapeur, pour les signaux, muni d'un robinet placé à la portée du mécanicien. P est un des deux corps de pompe qui sont placés l'un à côté de l'autre au-dessous de la boîte à fumée. L'extrémité de la tige du piston, guidée par une glissière fixe, agit, par l'intermédiaire de la bielle K, sur l'une des manivelles de l'arbre des roues motrices, M. La distribution de la vapeur se fait au moyen d'un tiroir à coquille, dont on voit

la coupe au-dessus du corps de pompe P. La tige de ce tiroir est guidée en α et reçoit son mouvement, d'un levier conduit par la bielle f et l'excentrique e . aa est la pompe d'alimentation, dont le piston plongeur est lié à l'extrémité de la tige du piston P. L'eau est refoulée dans la chaudière par le tube θ , et vient, par le tube tt , d'un réservoir placé sur un wagon d'approvisionnement, nommé *tender*, qui suit la locomotive.

La prise de vapeur se fait par l'extrémité I d'un tuyau, qui s'élève dans l'intérieur d'un dôme, afin de diminuer la quantité d'eau entraînée. Ce tuyau, coudé en R, traverse la chambre à vapeur de la chaudière et, arrivé à la boîte à fumée, se bifurque et envoie ses deux branches aux deux corps de pompe. Ces branches se voient en oo (fig. 886). En R (fig. 885) est un robinet, destiné à régler l'entrée de la vapeur; sa tige passe au dehors à travers une boîte à étoupes, et porte un levier au moyen duquel on la fait tourner. Au lieu d'un robinet, on emploie souvent différents systèmes de vannes, comme en V (fig. 888).

La vapeur, après avoir agi dans les corps de pompe, s'échappe par les tubes cv , $c'v$ (fig. 886), et V (fig. 885), qui la conduisent dans la cheminée, par le *tuyau soufflant* D. Cette vapeur sortant à haute pression, et à coups précipités, puisqu'à chaque tour de roue il y a quatre sorties, il se fait une espèce de tirage artificiel qui supplée au défaut de longueur de la cheminée, et force la flamme à franchir les tubes à feu. Ce tirage artificiel ne se produit que pendant la marche; en même temps, le choc de l'air en n (fig. 885) produit une véritable insufflation,

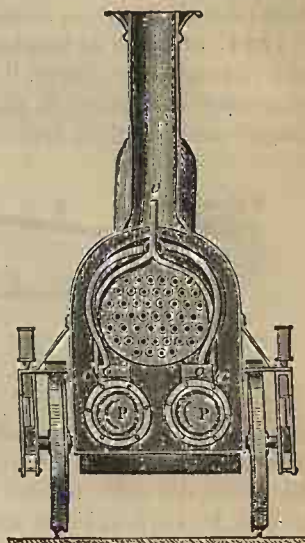


Fig. 886.

et ces deux effets sont d'autant plus prononcés que la locomotive marche plus vite, c'est-à-dire que la vapeur est plus rapidement dépensée.

L'idée d'employer un jet de vapeur pour activer le tirage est très-ancienne. Philibert Delorme conseille, d'après Vitruve, de placer dans les cheminées, des éolipyles dont le vent entrainera vivement la fumée. En 1818, Manoury d'Ectot construisit une machine soufflante dans laquelle un jet de vapeur entraînait l'air à travers un tuyau. Pelletan se servit de ce moyen pour augmenter le tirage dans les cheminées de certaines machines à vapeur; et G. Stephenson l'appliqua le premier aux locomotives.

Châssis. — La chaudière et tout le mécanisme de la locomotive sont fixés à un cadre de fer, ou de bois garni de fer, qu'on appelle le *châssis*. On voit (fig. 886) les bandes de fer obliques, ou orcilles, qui servent à relier la chaudière

au châssis. Ce dernier, qui soutient ainsi tout l'appareil, s'appuie sur les essieux tournants des roues, par l'intermédiaire de puissants ressorts d'acier. En O (fig. 885) est le *chasse-pierre*, destiné à écarter les obstacles qui pourraient se trouver sur les rails.

Dans la locomotive que nous venons de décrire, les corps de pompe P, P (fig. 886), sont placés entre les roues, dont l'essieu doit être deux fois coudé en forme de manivelle, ce qui présente quelques difficultés dans les appareils de grandes dimensions. De plus, les boîtes de distribution et la plus grande partie du mécanisme se trouvant au-dessous de la chaudière, la surveillance et le graissage ne peuvent se faire pendant la marche, et sont assez difficiles pendant le repos. Aujourd'hui, on place le plus souvent les cylindres en dehors des roues; alors le châssis est notablement modifié.

1231. Glissière de Stephenson. — Une locomotive doit pouvoir à volonté aller en avant ou en arrière. Il faut de plus que le mécanicien puisse opérer le changement sans quitter la place qu'il occupe derrière la boîte à feu. On a imaginé pour cela divers systèmes, qui ont été successivement abandonnés, et

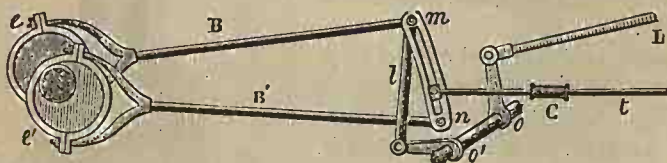


Fig. 887.

remplacés par la *glissière* ou *coulisse* Stephenson, qui permet en outre de faire varier la *détente* pendant la marche. Deux excentriques e, e' (fig. 887) sont calés sur l'arbre des roues motrices de manière à pousser en sens contraire les bielles B, B'. Ces deux bielles sont articulées aux extrémités d'une *glissière* mn en forme d'arc de cercle, dont le centre est sur l'axe des roues. Cet arc oscille autour d'un point idéal placé vers son milieu. t est la tige du tiroir dont l'extrémité porte un bouton engagé dans la glissière. Cette tige, guidée en C, reçoit ainsi de la glissière mn , un mouvement de va-et-vient dont l'étendue et le sens dépendent de la position du bouton sur mn . On fait varier cette position, en soulevant plus ou moins l'arc mn au moyen de la barre articulée l et d'un levier mobile autour de l'axe oo' , qu'on fait tourner en agissant sur la barre L. A l'extrémité de cette barre, se trouve un levier à verrou qu'on fixe dans la position voulue, au moyen d'un arc à crans disposé comme celui de la figure 862.

Souvent, comme dans cette dernière figure, le point d'articulation de l'extrémité inférieure de la barre l est fixe, et le levier oo' soulève plus ou moins l'extrémité d'une bielle B qui agit sur la tige du tiroir. La figure 888 représente cette disposition dans une locomotive où tout le système mobile est extérieur. Le châssis porte sur les essieux par l'intermédiaire de ressorts situés entre les

roues; et les excentriques, *e*, sont fixés en avant de la manivelle, en un point placé sur le prolongement de l'arbre des roues motrices. Ces excentriques agissent par l'arc *a*, soutenu par le levier *l* articulé au point fixe *o*. Cet arc fait mouvoir la bielle *e* du tiroir. Cette bielle, dont l'extrémité porte un bouton qui glisse dans l'arc *a*, est articulée à une barre courbe *nL*, que le mécanicien peut soulever plus ou moins par l'intermédiaire du bras de levier *L*, sur lequel il agit au moyen d'une longue tringle qui tire un autre bras fixé au même arbre que le bras *L*. *P* est la pompe d'alimentation, mue par la tige du piston. En *s* et *s'* sont les soupapes. *m* est la bielle qui transmet le mouvement du piston à la manivelle de l'arbre de la roue motrice¹.

1235. Vaporisation. — La chaudière des locomotives se compose de deux parties, la *caisse à feu*, et le *corps cylindrique* dans lequel se trouvent les

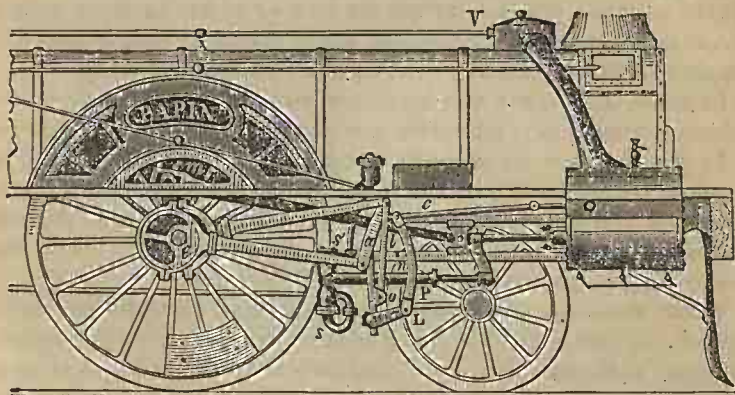


Fig. 888.

tubes à feu, souvent au nombre de 100 à 125, et dont le diamètre intérieur varie de 4 à 5^m. La surface de la caisse à feu se nomme *surface de chauffe directe*. C'est sur elle que se produit la vaporisation la plus active, lorsque la machine est en repos; mais quand elle est en marche, la surface des tubes donne autant de vapeur, à aire égale, parce que la flamme les traverse et arrive jusqu'à leur extrémité. De Pambour a reconnu que la vaporisation, pendant la

¹ Le renversement de la vapeur pendant la marche a été longtemps une opération à laquelle on ne se résignait que dans les cas très-graves, la vitesse acquise maintenant le mouvement dans le même sens un certain temps, pendant lequel le piston aspirait par le tuyau soufflant. Les parcelles de charbon mêlées à la fumée s'introduisaient alors dans le corps de pompe, et, en le rayant, le mettaient hors de service. Aujourd'hui, on évite cet inconvénient au moyen d'un jet de vapeur qui balaye l'espace autour de l'orifice du tuyau soufflant, et le renversement de la vapeur est employé journellement pour arrêter promptement les trains, et même pour ralentir leur marche sur les fortes pentes.

marche, est environ cinq fois plus rapide qu'à l'état de repos, et qu'elle augmente avec la vitesse, ce qui s'explique facilement (1233). Pour obtenir le plus de vapeur possible, il faut que l'orifice du tube soufflant qui produit le tirage de la cheminée, soit tel que la flamme arrive jusqu'aux extrémités des tubes à feu, sans les dépasser.

La quantité de vapeur produite *par heure* et par mètre carré de surface de chauffe est généralement de 60 à 65^{kil} pendant la marche; 1^{kil} de coke vaporisant 5 ou 6^{kil} d'eau. L'effet utile du combustible augmente, quand la surface des tubes augmente elle-même par rapport à la surface de la caisse à feu. C'est pourquoi Stephenson a allongé le corps cylindrique de manière à porter la surface de chauffe à près de 75 m. carrés, sans augmenter les dimensions du foyer. Mais alors, la locomotive acquérant une grande longueur, il a fallu rapprocher les six roues sous le corps cylindrique, pour éviter une trop grande résistance dans les courbes des chemins de fer. La caisse à feu se trouve alors soutenue en porte-à-faux par le châssis. Depuis, la surface de chauffe a été encore augmentée : on l'a portée à plus de 200^m carrés.

La tension de la vapeur dans les locomotives, dans le principe de 3 atmosphères seulement, varie aujourd'hui généralement entre 5 et 10 atmosphères.

La prise de vapeur est placée au haut d'un dôme, afin d'avoir moins d'eau entraînée mécaniquement; les uns la placent au-dessus de la boîte à feu, les autres tout près de la boîte à fumée, où le bouillonnement est moins prononcé. La quantité d'eau entraînée est, généralement, de 30 pour cent de la vaporisation totale; elle peut, dans certains cas, dépasser 50 pour cent.

1236. Puissance des locomotives. — La vapeur, dans les locomotives, agit pour faire tourner les roues. Si la machine avance, c'est qu'il y a adhérence aux rails; si elle était retenue par un obstacle fixe, les roues glisseraient en tournant sur place, et il n'y aurait pas de mouvement de translation. On conçoit qu'il en sera de même si la résistance à vaincre est trop grande.

Traction. — L'adhérence des roues motrices aux rails est proportionnelle à la charge qu'elles supportent. Dans les expériences de de Pambour, la résistance suffisante pour qu'elles tournent sur elles-mêmes est $\frac{1}{6}$ du poids qu'elles supportent, quand les rails sont secs; elle peut descendre à $\frac{1}{20}$ quand ils sont très-humides. Le poids de la locomotive a donc une grande influence sur la charge qu'elle peut remorquer. La *Fusée* de Stephenson ne pesait pas 5 tonnes. Aujourd'hui, les locomotives pèsent de 15 à 30 tonnes et l'on en a fait allant jusqu'à 700 tonnes; du reste, les roues motrices ne portent qu'une partie de cette charge.

Il résulte des expériences de de Pambour que l'effort de traction à exercer pour faire marcher un wagon sur des rails de niveau est indépendant de la vitesse et égal $\frac{1}{233}$ de son poids, c'est-à-dire à 4^k environ par tonne¹. Supposons, que les

¹ Cet effort est d'environ 16 kil. sur un pavé uni, de 30 à 60 kil. sur une route ferrée, suivant qu'elle est en bon ou mauvais état.

roues motrices de la locomotive supportent un poids de 10 tonnes, la machine pourra exercer un effort de $\frac{10000}{9} = 1666$ kil sur des rails secs. Or, un convoi, pour résister avec une force égale, sur des rails horizontaux, devrait peser un nombre de tonnes x donné par l'équation $x = \frac{1666}{4} = 416,8$, puisqu'une tonne correspond à une résistance de 4 kil. Cette valeur correspond à l'état d'équilibre; la charge à remorquer devra donc être au-dessous de cette limite, et d'autant plus que la vitesse demandée sera plus grande. Du reste, il y a toujours un peu de glissement, et l'espace parcouru est toujours moindre que le produit de la circonférence d'une des roues motrices par le nombre de tours. Cette perte dépend de l'état des rails; elle est très-marquée quand ils sont humides; on dit, dans ce cas, que la locomotive *patine*.

Quand on veut remorquer de lourds convois, ou franchir de fortes rampes, on donne le même diamètre aux six roues, et on les réunit trois à trois par des bielles articulées à des manivelles égales, de manière que, les pistons imprimant le mouvement aux six roues, il y ait six points d'adhérence sur les rails, au lieu de deux. Souvent, on réunit ainsi deux couples de roues seulement. On a fait des locomotives à petite vitesse, ayant 8, 12, et même 14 roues égales de faible diamètre, ainsi réunies, pour franchir les fortes rampes.

Pour calculer, *en chevaux*, la puissance que doit avoir une locomotive pour remorquer en plaine n tonnes, avec une vitesse de K kilomètres par heure, il faut évaluer le travail correspondant. Or, l'effort de traction est égal à $n \times 4$ kil; la vitesse ou l'espace parcouru en 1^s est, *en mètres*, $K \frac{1000}{3600} = \frac{5}{18} K$. Le travail est donc $\frac{5}{18} K \times n \times 4$ ou $\frac{10}{9} nK$. Autant il y aura de fois 75 kilogrammètres dans cette quantité, autant la machine représentera de chevaux-vapeurs. On voit que la puissance de la machine doit être proportionnelle à la vitesse et à la charge qu'elle doit remorquer. Si nous supposons cette charge égale à 100 tonnes, et la vitesse K égale à 40 kilomètres par heure, la force de la machine devra être de $\frac{4000}{75}$, ou 59 chevaux à peu près. En général, une locomotive dépense 2 kil de coke par heure et par cheval.

1237. Locomotives à grande vitesse. — Les locomotives des trains de voyageurs, beaucoup moins puissantes que celles des marchandises, doivent, pour fournir de grandes vitesses, avoir les roues motrices d'un grand diamètre, afin qu'à chaque tour corresponde un déplacement considérable. Cette condition a été pendant longtemps difficile à réaliser, parce que, l'essieu étant au-dessous du corps cylindrique, il fallait trop élever le centre de gravité de la machine, ce qui nuisait à sa stabilité. En 1851, M. Crampton a levé cette difficulté en plaçant les roues motrices derrière la chaudière.

Locomotives Crampton. — Les roues motrices de cette machine (*fig.* 889) peuvent avoir un diamètre de plus de 2^m, et fournir des vitesses de plus de 120 kilomètres par heure. En outre, ces locomotives, dont le centre de gravité peut être facilement abaissé, sont construites sur un plan nouveau dont nous indiquerons les principaux traits. Tout le mécanisme est extérieur, de manière qu'on peut le surveiller et graisser, même pendant la marche; disposition souvent

imitée depuis, et dont nous avons vu plus haut un exemple (fig. 888). S (fig. 889) est la soupape de sûreté, V la prise de vapeur, et *v* la boîte de distribution placée au-dessus du corps de pompe. Le tube *o* conduit dans la cheminée la vapeur qui a agi. *a* est la pompe d'alimentation qui reçoit l'eau du tender par le tube *a'*. M indique la place du mécanicien entre les roues motrices. On voit, dans la figure, la bielle qui imprime le mouvement aux roues, et une partie de la glissière de Stephenson. La machine pèse 26 tonnes, et sa chaudière est munie de 120 tubes à feu. En avant des roues motrices, sont quatre autres roues plus petites, et la charge est répartie de manière que les roues motrices portent 16 tonnes, et les quatre autres, 10 tonnes. Il en résulte que ces dernières, fortement chargées, ne sont pas exposées à éprouver des ressauts, et par suite à *dérailer*, par la rencontre d'un corps étranger sur les rails; ce qui peut avoir

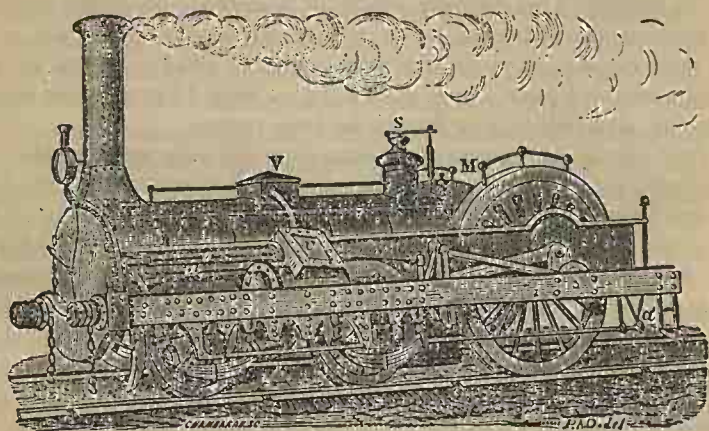


Fig. 889.

lieu quand l'arbre des roues motrices est placé à peu près au-dessous du centre de gravité, auquel cas il se fait, autour d'une ligne qui passe par ce centre de gravité, des oscillations facilitées par la flexibilité des ressorts (*mouvement de galop*), et qui peuvent faire sauter les roues antérieures hors des rails.

L'invention des locomotives est toute récente; ce n'est qu'en 1829 que la première machine à chaudière tubulaire a été construite. En 1800, il n'y avait pas un seul chemin de fer sur le globe, et aujourd'hui ils sont répandus dans toutes les parties du monde. Il n'est donc pas étonnant de voir chaque jour les locomotives se perfectionner, et leur construction présenter des dispositions aussi variées. On voit en Angleterre, sur le chemin de fer le *Great-Western*, dont les rails sont écartés de 2^m,134, des machines de la force de 100 chevaux remorquant 120 tonnes avec une vitesse de 80 kilomètres à l'heure, et pesant 35 tonnes, quand elles ont leur provision d'eau et de charbon, qui représente

4 tonnes. Les roues ont 2^m,50 de diamètre et la longueur de la machine est de 7^m,30. Il y en a de plus puissantes pour les trains de marchandises.

En Amérique, on est allé encore plus loin. On cite le *Modoc*, locomotive monstre dont la puissance est double de celle des locomotives ordinaires, et qui remorque 80 wagons chargés, là où les machines ordinaires n'en peuvent remorquer que 50. Une autre machine, essayée en 1875 sur le chemin de fer de Pensylvanie en remorque 100. Ces énormes appareils ne peuvent être supportés que par des rails d'acier, dont l'usage tend à se répandre de plus en plus.

1238. Locomotives routières. — On a tenté à plusieurs reprises de construire des locomotives roulant sur les routes ordinaires. Dans ce cas, il y a deux roues motrices placées à l'arrière, et ordinairement une seule en avant, dont l'essieu peut tourner autour d'une cheville ouvrière pour faire marcher l'appareil dans différentes directions. Les premières machines de ce genre n'ont pu fonctionner que pendant peu de temps; elles étaient mises rapidement hors de service par les secousses résultant des inégalités du terrain. On s'est donc appliqué à perfectionner le mode de suspension, et depuis quelque temps, on emploie en Angleterre à l'agriculture et aux transports de l'artillerie, des locomotives routières, que l'on voit aussi circuler dans les rues de Londres. En France, on en fait également usage, par exemple à Tarbes, où elles sont employées à trainer les lourds fourgons de l'arsenal.

En 1869, on a vu à Paris une de ces locomotives, à chaudière verticale, remonter la rampe du Trocadéro, en remorquant des omnibus. Cet appareil combiné par M. Thomson, est muni de trois roues, dont la jante, de 25^{cm} de largeur, est garnie d'une bande de caoutchouc qui n'a pas moins de 15^{cm} d'épaisseur, et qui est protégée par des lames de fer articulées les unes aux autres. La bande de caoutchouc s'aplatit sous le poids de la machine, qui pèse 6 tonnes, ce qui fait que le sol n'est que peu déprimé, la pression étant répartie sur une surface assez grande pour qu'elle ne soit que de 2^{kil} par centimètre carré. L'élasticité de ces bandes est telle qu'il n'est pas besoin de ressorts de suspension. Cette machine, sous une pression de 8 atmosphères, représente 6 chevaux-vapeur; elle remorque, en plaine, 16 à 18 tonnes avec une vitesse de 16 kilomètres à l'heure, et peut tourner facilement dans un rayon de 2 mètres.

M. Fortin Hermann a fait marcher, en 1875, sur le chemin de fer de l'Est un appareil, destiné aux routes ordinaires, dans lequel la vapeur fait mouvoir des pieds articulés, qui viennent les uns après les autres s'appuyer sur le sol, comme ceux d'un lourd et massif éléphant. Un modèle, notablement perfectionné, a fonctionné depuis devant l'Académie des sciences de manière à faire augurer favorablement de l'avenir de cette singulière locomotive, qui rappelle à la mémoire les premiers essais de Brunton (1232).

1239. Locomotives sans feu. — On emploie aujourd'hui sur les *tramways*, chemins de fer qui sillonnent les rues des villes et qu'on nomme aussi *chemins*

¹ Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. LXXX, p. 1198.

de fer Américains, de vastes voitures munies de petites machines à vapeur à chaudière verticale. Mais l'inconvénient de la fumée et du feu au milieu des rues, a fait imaginer les locomotives sans feu, employées depuis quelques années à la Nouvelle-Orléans, et que M. L. Franck a notablement perfectionnées et fait circuler à Paris, sur le tramway de Saint-Augustin à Neuilly. Dans ces machines, la chaudière et son foyer sont remplacés par un réservoir en forte tôle, préservé du refroidissement par une enveloppe non conductrice, de 15^{cm} d'épaisseur, et contenant de l'eau. Avant le départ, on chauffe cette eau jusqu'à 200° en y faisant passer, pendant 5 à 6 minutes, un courant de vapeur à 15 atmosphères fournie par une chaudière fixe. Cette eau surchauffée donne de la vapeur, qui se renouvelle aux dépens de la chaleur accumulée, à mesure que la pression diminue pendant la marche, et se rend dans un dôme supérieur, d'où elle passe dans les corps de pompe. Après un parcours de 15^{kil}, qui se fait en une heure, la température de l'eau est encore de 115°, et la tension de la vapeur, de 5,5 atmosphères. Il paraît que l'économie est de 70 pour cent sur les frais de traction qu'entraînerait l'emploi des chevaux.

V. Machines dont le jeu se rapporte à celui des moteurs à vapeur.

1210. On a fait de fréquentes tentatives pour remplacer la force expansive de la vapeur par celle de différents gaz. On a essayé le gaz hydrogène, dont on se débarrassait à la sortie du corps de pompe en l'enflammant; l'acide carbonique, le gaz ammoniac, que l'on faisait disparaître, l'un en le dissolvant dans l'eau de chaux, et l'autre, dans l'eau pure. On a voulu aussi revenir à l'emploi de la poudre, anciennement essayée par Huyghens et Papin. Mais tous ces essais n'ont donné que des résultats incertains.

1211. Moteurs à air comprimé. — Nous avons vu (I,415) comment on a utilisé l'air comprimé, pour faire mouvoir des machines, dont le jeu est semblable à celui des moteurs à vapeur. Ces machines n'engendrent pas de travail; elles ne font que reproduire une partie de celui qu'il a fallu dépenser pour comprimer préalablement l'air dans un réservoir, qui contient alors une provision de travail que la machine pourra ensuite utiliser. Mais ce travail emmagasiné est toujours inférieur à celui qui a été dépensé pour faire mouvoir les pompes à comprimer, à cause de la chaleur que dégage la compression de l'air; chaleur qui se dissipe ensuite et représente un travail perdu, qui peut aller à 40 pour cent du travail fourni. On atténue cette énorme perte en comprimant l'air avec lenteur, ce qui diminue la force vive et la chaleur développées.

Les moteurs à air comprimé offrent l'avantage considérable de permettre de transporter au loin, au moyen de tubes de communication, le travail employé pour comprimer l'air par des moyens peu coûteux, comme des chutes d'eau, ainsi qu'on l'a fait lors du percement du mont Cenis (I,415). Elles permettent aussi, aux machines qui se déplacent, d'emporter avec elles le réservoir de

force, destiné à les faire mouvoir, comme nous l'avons vu dans les essais de M. Andraud, sur les locomotives à air comprimé.

L'établissement de tramways dans une foule de villes, en France et à l'étranger, a ramené l'attention sur ces sortes d'appareils. De nombreux perfectionnements leur ont été successivement apportés, et l'on est parvenu à combattre divers inconvénients que des expériences multipliées ont fait remarquer.

Une première difficulté vient du froid résultant de la détente de l'air dans les corps de pompe. Ce froid est tel, quand le gaz est fortement comprimé, que les huiles et l'humidité se congèlent et arrêtent le mouvement du piston. M. Mekarski évite cet inconvénient en faisant passer l'air, avant son entrée dans les corps de pompe, à travers de l'eau à 150°, contenue dans un récipient que l'on remplit avant le départ, au moyen de la chaudière du moteur à vapeur qui fait mouvoir les pompes de compression. L'air s'échauffe dans ce récipient, et, de plus, se sature de vapeur, qui, en se condensant pendant la détente, dépose sa chaleur de volatilisation.

Une autre condition importante était de régler le passage de l'air de manière à obtenir un travail uniforme, malgré la diminution continue de la pression à

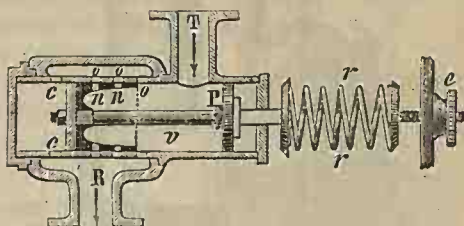


Fig. 890.

mesure que l'air s'échappe du réservoir. M. Ribourt a appliqué à des locomotives à air comprimé, employées aux travaux de la percée du Saint-Gothard, un régulateur automatique, qui remplit bien cette condition et dont on voit une coupe (fig. 890). L'air arrive du réservoir, par le tube T, et passe dans un cylindre contenant deux pistons P, n, reliés par une même tige v, et égaux entre eux, de manière que la pression de l'air ne peut les déplacer. L'air passe ensuite par des ouvertures o, o, o dans un espace annulaire, d'où il se rend par le tube R dans les corps de pompe. Sur les ouvertures o, o, o s'applique, en dedans, un rebord cylindrique porté par le piston de gauche et percé d'ouvertures qui peuvent coïncider avec les ouvertures o, o, o, ou les obstruer plus ou moins, suivant la position du système des pistons. Un ressort r r, dont on peut régler la tension au moyen de la vis e, les repousse vers la gauche; mais quand l'air comprimé s'introduit, il communique sa pression par les ouvertures e, e à la face extérieure du piston, le pousse vers la droite jusqu'à ce que le ressort r r résiste à son effort, et les ouvertures o, o, o sont en grande partie obstruées. Quand ensuite la pression de l'air diminue en T, et par conséquent en e e, le ressort r r repousse les pistons, dégage les ouvertures o, o, o et, l'air moins comprimé, affluant plus abondamment, l'effet produit reste le même, si l'appareil a été bien réglé.

1242. Moteurs à air dilaté. — On a songé de bonne heure à remplacer la tension de la vapeur par la force expansive de l'air échauffé. On se propose principalement, dans cette substitution, d'économiser la grande quantité de chaleur qui passe à l'état latent dans la formation de la vapeur. Montgolfier, le premier, a fait usage de la force élastique de l'air dilaté. J. Niepce a tenté depuis, quelques essais à ce sujet. Enfin, M. Ericsson a construit, en Amérique, une machine à air chaud, destinée à faire marcher un grand navire, et que nous allons décrire comme exemple de ce genre de moteurs.

Moteur Ericsson. — Dans un large corps de pompe à fond courbe *o* (fig. 891), ouvert tout autour en *e e*, se meut un piston *P*, formé de matières non conductrices de la chaleur. Le mouvement de ce piston se communique, par la tige *B*,

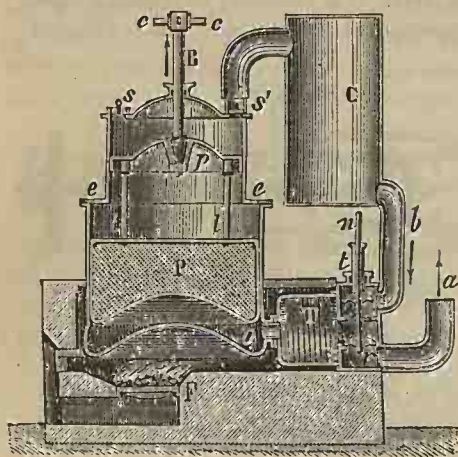


Fig. 891.

à un balancier articulé en *c e*. De l'air comprimé, renfermé en *C*, se rend au-dessous du piston *P*, par le tube *b*, la boîte de distribution *tr* contenant des soupapes, dont les tiges, *t*, *n*, doivent leurs mouvements à la machine, et enfin à travers un système de toiles métalliques *T*. Arrivé en *o*, cet air se dilate au contact du fond du corps de pompe fortement chauffé en dessous. Quand le piston, soulevé par la force expansive de l'air dilaté, est arrivé au haut de sa course, la soupape *r* s'ouvre, pendant que la soupape supérieure se ferme, et le piston *P*

descend, par son poids ou par des contrepoids convenablement disposés, et l'air, logé au-dessous, s'échappe par le tube *a*, après avoir traversé les toiles métalliques *T*, auxquelles il a cédé la plus grande partie de la chaleur qui lui restait. Quand ensuite les soupapes, *t*, *r*, reprennent la position première, l'air comprimé en *C* traverse ces toiles brûlantes, et arrive en *o*, après s'être ainsi fortement échauffé.

Il nous reste à indiquer comment l'air est comprimé en *C*. Au-dessus du corps de pompe qui contient le piston *P*, s'en trouve un autre de moindre diamètre contenant un autre piston *p*, qui est mis en mouvement par le premier auquel il est lié par les tiges *l*, *l*. Ce piston constitue avec les soupapes *s* et *s'* dont la première s'ouvre de dehors en dedans et la seconde de dedans en dehors, une pompe de compression qui refoule de l'air dans le réservoir *C* pendant la marche de la machine.

Le moteur de M. Ericsson n'a pas répondu aux espérances de l'inventeur, et il a fallu y renoncer. Pour obtenir des résultats importants, il faut donner à l'air une très-haute température et les métaux s'altèrent rapidement au contact de cet air brûlant. L'emploi des toiles métalliques, si rationnel en théorie, et qui constitue la partie la plus originale de cette machine, n'a donné que de faibles résultats, si bien qu'on y a renoncé dans tous les moteurs thermiques inventés depuis.

Machine de M. Laubereau. — Comme second exemple, nous citerons le moteur à air chaud de M. Laubereau, qui présente cette particularité que c'est toujours la même masse d'air qui s'échauffe et se refroidit alternativement. La figure 892 représente une coupe de cet appareil. En *c* est un corps de pompe dans lequel se meut un piston *p*, dont la tige *b* agit sur la manivelle *m*, et fait tourner l'arbre, *oo'*, d'un volant. Dans un second corps de pompe, se meut une masse de plâtre *P* à contour cylindrique, qui ne touche pas les parois, et reçoit un mouvement brusque de haut en bas et de bas en haut alternativement, d'une came fixée à l'arbre *oo'*. Le couvercle *aa* et la partie supérieure de ce corps de pompe sont à double enveloppe et constamment traversés par un courant d'eau froide. Le fond est au contraire maintenu à une haute température ou par un foyer par une flamme *f*. Supposons la masse *m* soulevée, l'air qui est au-dessous se dilate au contact du fond, passe par le tube *t* sous le piston *p* et le soulève. Quand ce piston est arrivé au haut de sa course, la masse *P* s'abaisse tout à coup, l'air refoulé dans la partie supérieure *a* se contracte au contact des parois froides, et la pression atmosphérique fait descendre le piston *p*. Alors la masse *P* est brusquement soulevée; l'air vient de nouveau se dilater au contact du fond, et le piston *p* est soulevé, et ainsi de suite. Cet appareil, très-ingénieux, ne peut guère être employé que sur une assez petite échelle.

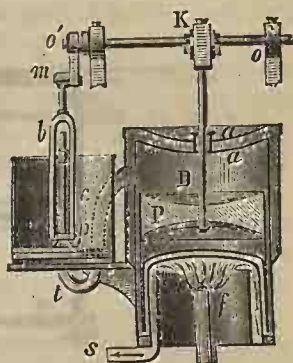


Fig. 892.

1243. Moteurs à gaz inflammable. — Dans ces appareils, qui réalisent de la manière la plus avantageuse l'emploi des gaz dilatés pour produire le mouvement, le gaz s'échauffe par sa propre combustion, dans le corps de pompe même où on l'enflamme. Après de nombreux essais faits principalement par M. Hugon, M. Lenoir, à force de persévérance, et avec l'aide d'un constructeur habile, M. Marinoni, est parvenu à établir, en 1860, la machine qui porte son nom.

Moteur Lenoir. — La figure 893 représente une coupe horizontale de cette machine. *P* est le piston, dont la tige agit, par l'intermédiaire d'une bielle *b*, sur l'arbre d'un volant *V*. Deux tiroirs *T*, *T'*, placés de chaque côté du corps de

pompe, sont mis en mouvement par des excentriques m, m' calés sur l'arbre du volant. Un de ces tiroirs, T, règle l'introduction du mélange gazeux; l'autre, T', laisse sortir les gaz qui ont produit leur effet. Pour faire partir la machine, on commence par agir sur le volant de manière à déplacer le piston, par exemple, dans le sens de la flèche; l'air est alors aspiré par l'ouverture o , qui communique avec l'atmosphère, et le gaz inflammable, par le canal e , qui vient se placer en face d'une ouverture du tuyau G qui amène ce gaz. Les ouvertures sont telles que ce gaz se mêle à l'air dans la proportion de 1 à 9. Bientôt le mouvement du tiroir ferme tous les passages, et alors une série d'étincelles électriques jaillit en e , et enflamme le mélange, qui imprime une impulsion énergique au piston, à cause de la température très-élevée produite par la combustion. Pendant ce temps, l'air logé en C' s'échappe en o' . — Quand le piston est arrivé à l'extrémité de sa course, il revient sur ses pas

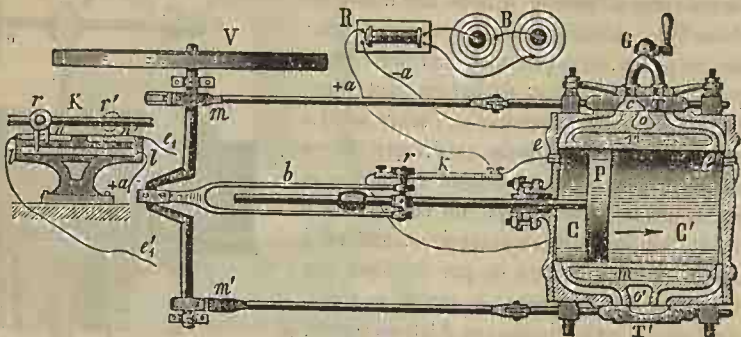


Fig. 893.

en vertu de la vitesse acquise du volant, le tiroir T s'est déplacé, et l'air et le gaz sont aspirés en C', jusqu'à ce que le tiroir fermant tous les passages, et les étincelles jaillissant en e' , le mélange gazeux s'enflamme et donne au piston une nouvelle impulsion qu'il communique au volant, pendant que les gaz logés en C s'échappent par le tiroir T' qui s'est placé de manière à leur donner une issue.

La proportion de gaz mélangé à l'air a une grande importance. Tel qu'il est constitué, le mélange ne donne pas pour ainsi dire d'explosion; il n'y a ni choc ni secousse. La force d'expansion, qui représente environ 6 atmosphères, n'est ni plus grande ni plus subite que celle que produit la vapeur à la même pression en se précipitant dans un corps de pompe. On a eu l'idée d'injecter à chaque coup de piston, dans le corps de pompe, quelques gouttes d'eau, qui, se réduisant en vapeur, augmentent la détente, et ajoutent au travail produit, sans frais nouveaux.

M. Hirn a donné le calcul du travail dynamique de cet appareil ¹.

¹ Cosmos, *Revue des sciences*, t. XVII, p. 617 et t. XVIII, p. 12.

Comme le corps de pompe s'échauffe rapidement, on l'entoure d'une enveloppe *mm* dans laquelle circule de l'eau, qui entre par le bas et remonte d'elle-même par un tube à part, après s'être échauffée.

Il nous reste à indiquer comment on produit les étincelles électriques destinées à enflammer le mélange gazeux. L'électricité est fournie par deux couples à charbon *B* et agit sur une bobine de *Ruhmkorff* *R*, d'où partent deux fils métalliques; l'un, — *a*, aboutissant au corps de pompe, et l'autre, + *a*, à un commutateur *k* placé au-dessous de la tige du piston, et dont on voit à part une élévation *rKr'*. En *e*, sont des fils de platine dont les extrémités très-rapprochées sont en dedans du corps de pompe, avec lequel l'un d'eux communique tandis que l'autre, qui sort à travers un trou garni d'un mastic isolant, aboutit à une bande de cuivre *n*. La même disposition existe en *e'*, seulement le fil isolé communique avec une autre bande *n'* séparée de la première et isolée comme elle. Le fil + *a* aboutit à une troisième bande isolée *ll* parallèle aux deux premières. La tige du piston porte une lame de cuivre en forme d'U renversé, dont une branche plus longue que l'autre glisse sur la bande *ll*, et l'autre sur les bandes *n* ou *n'*. Quand la lame en U prend la position *r*, l'électricité passe de *ll* en *n* et les étincelles jaillissent en *e*; et quand le piston dans son mouvement, amène cette lame en *r'*, l'électricité passe de *ll* en *n'*, et les étincelles jaillissent en *e'*.

M. Hugon a simplifié cette partie de l'appareil en déterminant l'inflammation au moyen d'un bec de gaz mobile qui s'approche alternativement d'ouvertures pratiquées aux deux extrémités du corps de pompe, et qui se ferment aussitôt par une coulisse déplacée par un excentrique.

Le moteur Lenoir offre de grands avantages partout où l'on a le gaz d'éclairage à sa disposition. Toujours prêt à être mis en marche, il ne produit aucune dépense dès qu'il est arrêté. Plus de fourneau avec sa longue cheminée, plus de danger du feu; plus de chaudière avec ses chances d'explosion; plus de provision encombrante de charbon, plus de chauffeur ni d'appareil de sûreté à surveiller. Le moteur peut être installé dans un coin de l'atelier, et être mis en mouvement en un instant dès qu'on en a besoin.

Dans es grandes usines, on pourra fabriquer le gaz à bas prix, n'ayant pas de frais de canalisation et n'ayant pas à se préoccuper de ses qualités éclairantes. M. Isoard tire de la vapeur d'eau surchauffée unie au goudron de houille et décomposée dans des tubes de fer portés au rouge, un gaz ne revenant pas à 1 centime le mètre cube. Enfin, l'on peut remplacer le gaz par des vapeurs d'huiles essentielles provenant de la distillation des goudrons ou des schistes bitumineux; une fois la machine en train, la chaleur de l'eau qui circule autour du corps de pompe suffit pour vaporiser l'huile. Les bateaux, les locomotives, se chargeraient de ces huiles au lieu d'emporter du charbon. M. Lenoir a construit une voiture marchant au moyen de son appareil, et sur laquelle il a employé de ces huiles.

Quant à la dépense comparée à celle de la machine à vapeur de même force,

les évaluations varient beaucoup. Les uns admettent que le moteur à gaz n'exige par heure et par cheval, que 1^{me} de gaz coûtant 30 centimes à Paris. Les autres estiment qu'il en faut 3^{me}. Une machine à vapeur de la force de 4 chevaux consomme, par heure et par cheval, environ 5^{kil} de charbon coûtant 20 centimes. Mais les dépenses accessoires sont telles que le moteur à gaz aurait l'avantage s'il se contentait de 1^{me}.

MM. Otto et Langen, en faisant agir la pression atmosphérique, ont imaginé une machine à gaz inflammable à simple effet trois fois moins dispendieuse. Le gaz introduit sous le piston est enflammé par un bec allumé, et refoule le piston jusqu'au haut de sa course; c'est ensuite la pression atmosphérique qui le fait descendre, quand le gaz chaud et la vapeur produite par la combustion se sont condensés.

CHAPITRE VII

SOURCES DE CHALEUR

.... Videmus quemadmodum apud nos fieri solet ignis.... Duobus modis : uno, si excitatur sicut ex lapide percusso : altero, si attritu invenitur, sicut cum duo ligna inter se diutius trita sunt. (SENEC, *Quest. nat. lib. II, cap. 22.*)

12-11. La chaleur ne peut exister sans la matière pondérable (815); elle provient toujours d'un corps dans lequel elle prend naissance sous l'influence de différentes causes, et que l'on nomme *source de chaleur*. Un corps chaud qui cède de la chaleur par rayonnement ou par contact aux corps environnants se trouve constitué momentanément, par rapport à ces derniers, à l'état de source de chaleur. Toute cause qui enlève, au contraire, de la chaleur aux corps, est une *source de froid*. Un corps dont la température est très-basse se comporte donc comme source de froid par rapport aux objets environnants.

On peut diviser les diverses sources de chaleur en quatre classes : 1^o les *sources actuellement permanentes*, comme le soleil, et le globe terrestre qui possède une chaleur propre passant lentement de l'intérieur dans les couches superficielles. 2^o Les *sources physiologiques*; les animaux et même les végétaux produisent de la chaleur pendant leur vie. 3^o Les *sources accidentelles* ou *artifi-*

cielles, comme les actions mécaniques, les actions chimiques. On peut dire, en général, que toutes les fois qu'on change l'état d'équilibre des molécules d'un corps, on produit de la chaleur ou du froid. 4° Enfin, il est encore une source de chaleur, l'électricité, que nous devons mentionner quoique nous ne devions nous en occuper que dans le livre suivant.

§ 1. — SOURCES PERMANENTES DE CHALEUR

I. Chaleur solaire.

1245. Du soleil. — La source la plus abondante de chaleur, non-seulement pour notre globe, mais encore pour l'immense espace dans lequel circulent les corps de notre système planétaire, est le *soleil* qui lance autour de lui des torrents de chaleur dont la surface de la terre ne reçoit qu'une très-faible partie. Cet astre radieux placé au centre de notre monde, constitue pour nous un foyer ardent, toujours présent, toujours actif, qui donne naissance au plus grand nombre des phénomènes que nous observons à la surface du globe, y développe et entretient la vie végétale et animale, préside aux fluctuations de l'atmosphère et soulève ces vapeurs invisibles, qui ensuite condensées en nuages, versent sur la terre les pluies destinées à l'arroser.

Le soleil se présente à nous sous l'apparence d'un disque soutendant un angle de 32' environ; son diamètre est égal à 1,377450 kilomètres, 108 fois celui de la terre, et, par conséquent son volume, à 1,259712 fois celui de ce dernier globe. Le soleil tourne sur lui-même en 25 jours 8^h environ.

Examiné au télescope, le soleil se montre parsemé de rides ou de points, nommés *lucules*, plus brillants que le reste de la surface, que l'on a comparée, pour l'aspect, à la peau d'une orange.

Souvent, on remarque sur le soleil des taches sombres, irrégulières, quelquefois assez grandes pour être distinguées sans instrument grossissant. Elles ont alors un diamètre apparent de 30" au moins, ou $\frac{1}{60}$ de celui du soleil; ce qui correspond à 1 ou 2 fois le diamètre de la terre, ou environ 13,000 kilomètres. Le nombre des taches est très-variable; quelquefois on n'en voit pas pendant plusieurs mois de suite. Elles changent continuellement de forme; on en voit se transformer à vue d'œil et disparaître; d'autres fois elles persistent assez longtemps, tout en se modifiant plus ou moins, pour qu'on puisse les observer pendant cinq ou six révolutions consécutives du soleil. Elles sont fréquemment réunies par groupes. On n'en voit que très-rarement au delà de 35° de part et d'autre de l'équateur du soleil, et rarement près de cet équateur. La figure 894 représente le disque solaire avec diverses taches.

Quand les taches ne sont pas trop petites, on y distingue deux parties: l'une très-sombre à contours nets, l'autre qui entoure la première, moins foncée, et d'une teinte à peu près uniforme, si ce n'est près du contour intérieur, où elle

semble un peu plus claire; on la nomme *pénombre*. Vue avec un grossissement suffisant, elle paraît comme tourmentée; on y distingue des stries rayonnantes (fig. 895) ou disposées en spirales fort irrégulières changeant peu à peu d'aspect, de manière à attester l'existence de mouvements d'une intensité prodigieuse.

Quand une tache se rapproche du bord du disque, on remarque que la pénombre disparaît du côté du centre de l'astre, et persiste du côté du bord, d'où l'on a

conclu que les taches sont d'immenses cavités dont la surface latérale intérieure vue plus ou moins obliquement, forme la pénombre. Cette conclusion est confirmée par la formation d'une échancrure sur le bord du disque au point où arrive une grosse tache.

De plus, si, comme l'a imaginé M. W. de la Rue, on prend deux photographies d'une même tache à un jour d'intervalle, temps pendant lequel la tache a tourné de 15° sur la surface du

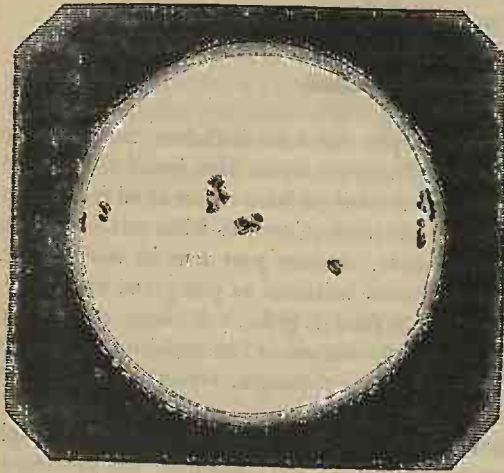


Fig. 894.

soleil, et qu'on les examine dans un *stéréoscope*, on distingue parfaitement la forme d'une cavité, dont les bords paraissent relevés.

La surface du soleil présente très-souvent des parties en forme de traînées irrégulières plus brillantes que le reste, et nommées *facules*. Les facules précèdent et annoncent souvent les taches, elles sont ensuite placées derrière elles par rapport au sens de la rotation, les envahissent peu à peu et enfin les effacent en marchant plus vite qu'elles. Parfois les facules se montrent au point où une tache vient de disparaître.



Fig. 895.

1246. Constitution physique du soleil.

— Pour expliquer les faits qui précèdent, Wilson et Herschell avaient supposé le soleil composé d'un globe sombre G (fig. 896), enveloppé d'une couche plus brillante *cc*, recouverte elle-même d'une atmosphère gazeuse *pp* d'un éclat éblouissant, à surface ondulée, nommée *photosphère*. Des courants violents de gaz, émis par

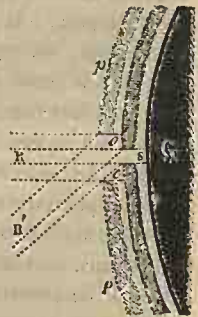


Fig. 896.

le noyau obscur, produiraient dans ces deux enveloppes des ouvertures correspondantes *s*, *oo*, dont la seconde serait plus grande que la première. Un observateur placé en *R* verrait alors la partie *s* du noyau, et tout autour, une portion de la couche *ce*, qui formerait la pénombre. En regardant obliquement suivant *R'*, une tache placée près du bord *pp*, il n'apercevrait de pénombre que du côté de ce bord. Les facules seraient dues à l'accumulation de la matière lumineuse refoulée autour de l'ouverture.

Cette hypothèse ne rend pas compte du déplacement des taches et des facules, ni de certaines propriétés de la lumière solaire dévoilées par l'analyse spectrale, comme nous le verrons en optique. M. Faye en a proposé une autre qui satisfait à toutes les conditions du problème ¹. Dans cette nouvelle théorie, le soleil, dont la densité moyenne n'est que 1,5, est une masse gazeuse, au moins dans ses couches les moins profondes, les parties centrales pouvant être maintenues à l'état liquide par l'énorme pression qu'elles supportent de la part des parties extérieures. Cette masse gazeuse paraît être nettement limitée à cause de l'éloignement, comme cela a lieu pour certains nuages. La chaleur excessive qu'elle possède empêche les actions chimiques de s'exercer entre ses éléments, suivant les expériences de M. S. C. Deville sur la dissociation, excepté dans les couches superficielles où la chaleur se perd activement par rayonnement vers l'espace. Là, une foule d'actions chimiques se produisent, dégagent de la chaleur qui ralentit le refroidissement, et donnent naissance à une précipitation de particules solides incandescentes qui émettent des rayons intenses de chaleur et de lumière. Des mouvements verticaux troublent continuellement l'équilibre des couches, ramènent de l'intérieur vers la surface, des masses gazeuses transparentes, à travers lesquelles on voit, sous forme de tache, la masse centrale dépourvue de pouvoir lumineux à cause de son état gazeux. Ces masses gazeuses, qui remontent au milieu de ces immenses fluctuations, dépassent la surface par vitesse acquise, se refroidissent par leur expansion, et forment les facules par précipitations surabondantes de poussières lumineuses dues aux actions chimiques. Elles restent en arrière des taches parce qu'elles partent de points inférieurs, où la vitesse absolue de rotation est moindre qu'à la surface; puis elles s'affaissent, s'étendent sur les parties transparentes, et effacent peu à peu les taches. — L'absence de polarisation (889), constatée par Arago dans les rayons solaires, se conçoit facilement dans cette belle théorie, à laquelle nous verrons que l'analyse spectrale fournit de nouveaux arguments.

1247. Atmosphère solaire. — En dehors et tout près du globe proprement dit du soleil, il se produit divers phénomènes qui ont été découverts pendant les éclipses totales, et qui attestent l'existence d'une immense atmosphère, dont nous étudierons, dans l'optique, les propriétés lumineuses. Au moment où l'éclipse devient totale, on aperçoit un disque noir qui se détache sur le fond du ciel légèrement éclairé, et autour duquel on aperçoit une couronne, de teinte rosée,

¹ Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. LX, pp. 89 et 138.

ayant de 15 à 20" d'épaisseur. Cette couronne, dont l'éclat, qui décroît rapidement à partir du bord du disque, a été comparé à celui d'une éclatante pleine lune, se nomme la *chromosphère*. Au delà, s'étend une auréole ou *gloire* beaucoup moins brillante, de 4 à 5' d'épaisseur, et d'où partent d'immenses gerbes irrégulièrement distribuées, différentes d'une éclipse à l'autre, et pouvant présenter une hauteur de 30' et plus.

Protubérances. — Dans l'auréole, et partant de la chromosphère, on remarque des appendices de couleur pourpre, variables, et pouvant atteindre une hauteur égale au quart du rayon solaire, c'est-à-dire 54 fois le diamètre de la terre. Ce sont les *protubérances*, qui, vues au télescope, présentent l'apparence de gerbes contournées, de panaches, de spirales, ou de nuages souvent complètement séparés du bord du disque. M. Janssen a trouvé moyen de les observer en tout temps, en l'absence d'éclipses. On a pu dès lors les étudier à loisir, et l'on a reconnu qu'elles sont animées de mouvements tellement intenses que leur aspect peut notablement changer en quelques minutes. Les procédés de l'*analyse spectrale*, que nous étudierons dans l'Optique ont permis de reconnaître qu'elles

sont formées principalement de gaz hydrogène. Elles sont produites par de prodigieuses éruptions sortant des gouffres immenses que nous représentons les taches; et toutes les fois qu'une protubérance notable apparaît à l'orient du disque, une forte tache ne tarde pas à s'y montrer amenée en avant par le mouvement de rotation de l'astre. Nous reviendrons, dans l'Optique, sur ces phénomènes lumineux, ne devant nous occuper ici que des effets calorifiques.



Fig. 897.

1248. Quantité de chaleur fournie par le soleil. — L'exposition aux rayons solaires se nomme *insolation*. — La quantité de chaleur que le soleil fournit, dans un temps donné, à une surface placée à la surface de la terre et frappée normalement par ses rayons, dépend de la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon, et de la pureté de l'atmosphère. On sait que les rayons lumineux du soleil sont assez faibles, quand il est près de l'horizon, pour que nos yeux puissent en supporter l'éclat. Il en est de même des rayons de chaleur. Ce résultat s'explique facilement : l'air et surtout l'air humide (869) absorbe une partie de la chaleur qui le traverse, et s'échauffe à ses dépens; or la couche d'air traversée est d'autant plus humide et d'autant plus épaisse, que le soleil est plus près de l'horizon, comme cela se voit sur la figure 897 : les rayons qui viennent suivant *mn*, *sn*, *hn* traversent des épaisseurs d'atmosphère *en*, *an*, *cn*, très-différentes.

De Saussure, un des premiers, a cherché à déterminer la quantité de chaleur que le soleil fournit en une minute à l'unité de surface. Il employait, sous le nom d'*héliothermomètre* (980), un thermomètre renversé, dont le réservoir noirci occupait l'intérieur d'une boîte de liège garnie en dedans de noir de fumée, et fermée en dessus par des lames de verre. L'appareil étant orienté de manière à

recevoir les rayons solaires normalement aux lames de verre, il observait l'échauffement du thermomètre pendant une minute. Il y avait à tenir compte de la chaleur rayonnée par l'appareil. Nous allons voir (1249) comment se font ces sortes d'expériences.

Herschell a imaginé un appareil, qu'il nomme *actinomètre*, analogue à celui de Saussure. Ces instruments, moins exacts que ceux que nous allons décrire, ont permis néanmoins de suivre le décroissement des rayons, à mesure que le soleil s'écarte du méridien.

1249. Expériences de Pouillet. — On doit à Pouillet une longue série d'expériences sur la chaleur solaire, faites au moyen de deux appareils qu'il nomme *pyrhéliomètre direct*, et *pyrhéliomètre à lentille*¹.

Le pyrhéliomètre direct (fig. 898) consiste en un vase cylindrique v, v' en argent, très-mince, rempli d'eau, et dont la base supérieure de 10^{cm} de diamètre, est recouverte de noir de fumée. Ce vase contient la boule d'un thermomètre fixé au moyen d'un bouchon, dont on voit la disposition en t . Tout l'appareil est soutenu par un support articulé c , dans lequel on peut le faire tourner sur lui-même. Le disque d reçoit l'ombre du vase, et sert à l'orienter de manière que les rayons solaires dirigés suivant rr tombent normalement sur sa base supérieure.

Pour opérer, le vase étant à peu près à la température ambiante, on met l'appareil à l'ombre, très-près du lieu où l'on doit observer, de manière qu'il voie toujours la même étendue du ciel, et l'on note pendant 4^m, et de minute en minute, son échauffement ou son refroidissement. On porte ensuite l'appareil au soleil, en l'abritant avec un écran, et on l'oriente; cette manœuvre emploie la cinquième minute. On enlève l'écran, et le thermomètre monte sous l'influence des rayons solaires, pendant qu'on fait tourner le vase sur lui-même pour agiter l'eau. Au bout de 5^m, on reporte l'appareil à l'ombre dans sa première position, et l'on observe de nouveau son refroidissement pendant 5^m. — Si r est le refroidissement observé, et r' celui qui s'est produit lors des premières observations faites à l'ombre, on voit que la moyenne $\frac{1}{2}(r + r')$ représentera la perte de l'appareil par rayonnement pendant l'action solaire. Si donc s est son échauffement pendant l'exposition aux rayons solaires, l'élévation de température t produite par le soleil, sera $t = s + \frac{1}{2}(r + r')$;

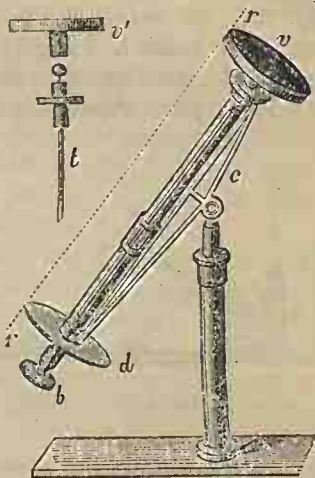


Fig. 898.

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. VII, p. 24.

et si l'on représente par P le poids de l'eau et de l'équivalent du vase en eau, la quantité de chaleur correspondante sera tP . Enfin, la surface du vase étant $\frac{4}{5}\pi d^2$, la quantité de chaleur reçue, pendant 1 minute, sur 1 centimètre carré, sera représentée par

$$c = \frac{4}{5} \frac{tP}{\pi d^2} = \frac{4P}{5\pi d^2} t = 0,2624 \cdot t. \quad [1]$$

Le coefficient de t convient à l'appareil particulier qu'employait Pouillet.

Pyrhéliomètre à lentille. — L'air doit être calme pendant l'expérience, sans cela il enlèverait une quantité notable de chaleur au vase v , qui ne contient que 100^{gr} d'eau. Quand il fait du vent, on emploie le pyrhéliomètre à lentille (fig. 899), qui contient plus de 600^{gr} d'eau. Les rayons solaires sont concentrés par une lentille L , à support articulé qui permet de lui donner différentes positions. Le vase d'argent rempli d'eau, rb , est conformé de manière que l'axe de la lentille puisse toujours se placer normalement à la face noircie ab , quelle

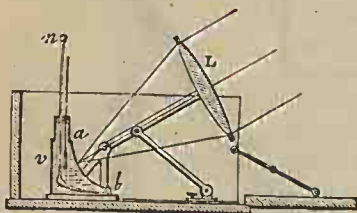


Fig. 899.

que soit la position de la lentille, que les rayons solaires doivent toujours traverser parallèlement à son axe. Un agitateur n rend la température de l'eau uniforme. On détermine, avec cet appareil, la quantité de chaleur reçue pendant 1 minute sur 1 centimètre carré, en suivant la marche indiquée pour le pyrhéliomètre direct. La formule est aussi la même; il y a seulement à tenir compte de la chaleur qu'absorbe la lentille; ce qui se

fait en comparant entre eux les résultats obtenus au moyen des deux pyrhéliomètres dans un air calme. Pouillet a reconnu ainsi, que les lentilles du verre le plus pur absorbent $\frac{1}{5}$ de la chaleur incidente.

1250. Résultats trouvés par Pouillet. — En observant au moyen des deux appareils ci-dessus, à différentes heures du jour et par un temps pur, Pouillet constata que la chaleur reçue pendant une minute est d'autant plus petite que le soleil est plus près de l'horizon. Ayant alors comparé les résultats obtenus d'heure en heure, pendant un grand nombre de jours et dans différentes saisons, il trouva que les élévations de température t du pyrhéliomètre étaient représentées par la formule

$$t = ap^{\varepsilon}, \quad \text{d'où } Q = 0,2624 ap^{\varepsilon}. \quad [2]$$

a et p sont des constantes que l'on détermine au moyen de deux valeurs de t obtenues directement dans une même journée; l'épaisseur ε , se calcule au moyen de la formule de Lambert

$$\varepsilon = \sqrt{2rh + h^2 + r^2 \cos^2 z} - r, \quad [3]$$

dans laquelle r est le rayon de la terre, h la hauteur de l'atmosphère, et z la distance zénitale du soleil. Pouillet a adopté $r = 80$, en prenant la hauteur h pour unité.

En déterminant les constantes a et p à différents jours, la valeur de a s'est toujours trouvée la même et égale à $6^{\circ},72$ centigrades; c'est la *constante solaire*; de sorte que la formule [2] devient $Q = 1,7633 p^2$. Au contraire, p change d'un jour à l'autre; c'est la *constante atmosphérique*; elle dépend de la pureté de l'air.

Pouillet a trouvé que cette formule représentait bien les résultats de diverses séries d'observations qu'il a faites à différentes heures, quand p restait constant pendant toute la journée, c'est-à-dire quand l'état de l'atmosphère ne variait pas. Nous verrons bientôt qu'elle est loin de toujours se vérifier.

La formule $t = ap^2$ peut servir à calculer la proportion de chaleur qu'absorbe l'atmosphère: Si l'on fait $\varepsilon = 1$, ce qui revient à supposer le soleil au zénith, les valeurs de p sont entre elles comme les quantités de chaleur reçues en 1 minute sur 1^{cc} ; et en appelant 1 la quantité de chaleur qui se présente pour entrer dans l'atmosphère, $1 - p$ est la proportion absorbée. Pouillet l'a trouvée égale, le 28 juin, à $1 - 0,7244 = 0,2756$; elle peut donc former plus du quart de la chaleur qui se présente pour entrer verticalement.

La chaleur transmise obliquement est absorbée en bien plus grande proportion. En faisant la somme des quantités de chaleur qui arrivent aux différents points de l'hémisphère terrestre, sous des obliquités qui varient de 0° à 90° , Pouillet a trouvé que, pour $p = 0,75$, la proportion absorbée par l'air est comprise entre 0,5 et 0,4, c'est-à-dire égale à la moitié environ de la chaleur envoyée par le soleil¹. L'autre moitié est reçue par la surface de la terre, et distribuée inégalement suivant l'obliquité des rayons.

Quantité de chaleur envoyée par le soleil à la terre. — Si dans la formule [2], on fait $\varepsilon = 0$, ce qui revient à supposer que l'atmosphère n'existe pas, on obtiendrait la quantité de chaleur envoyée en 1 minute par le soleil sur 1^{cc} . Pouillet a trouvé ainsi $Q = 1,7633$.

On déduit de là la quantité de chaleur que reçoit *par minute* un hémisphère de la terre privée de son atmosphère. Cette quantité n'est autre que celle que recevrait le grand cercle sur lequel se projette l'hémisphère, c'est-à-dire $\pi R^2 Q$, et chaque centimètre carré de la surface de l'hémisphère considéré, recevra pendant une minute, en supposant la chaleur répartie uniformément, la quantité $\frac{\pi R^2 Q}{2 \cdot R^2} = 0,4408$, en remplaçant Q par la valeur 1,7633 trouvée par Pouillet.

Comme la terre tourne en 24 heures, cette quantité, multipliée par 60×24 , représente en moyenne la quantité reçue *dans un jour* par chaque centimètre carré de la surface du globe; d'où l'on déduit, en multipliant par le nombre 365

¹ Ce calcul dépend d'une intégrale de la forme $Q \int \frac{p^2 dz}{\varepsilon^2}$, qu'on obtient par diverses méthodes d'approximation.

des jours de l'année, que la quantité de chaleur reçue pendant une année par la terre dépourvue d'atmosphère, est la même que si chaque centimètre carré recevait, en nombre rond, 231000 calories.

Ce nombre représente également la quantité de chaleur qui entre annuellement par un centimètre carré dans l'atmosphère, en supposant la chaleur répartie uniformément sur le globe. Pour donner une idée de cette quantité, Pouillet remarque qu'elle suffirait pour fondre, en une année, une couche de glace, qui recouvrirait la terre, et aurait environ 31 mètres d'épaisseur.

Pour connaître la quantité de chaleur qui arrive à la surface du sol, il faut retrancher du nombre 231000, la quantité absorbée par l'air. Pouillet a trouvé que, d'après ses observations faites à Paris, la surface du sol reçoit 0,7390 de la chaleur qui pénètre dans l'atmosphère. Des expériences faites à Orange au moyen du pyrhéliomètre, par de Gasparin, ont donné, pendant les mois d'août et de juillet, une moyenne de 0,4904. M. Forbes est arrivé, en Suisse, au nombre 0,608; et M. Quételet, à Bruxelles, à 0,615. Le désaccord entre ces divers résultats tient surtout aux différences dans la pureté de l'air.



Fig. 900.

Chaleur totale émise par le soleil. — Considérons une surface sphérique ayant pour rayon la distance moyenne D du centre du soleil à la terre. Chaque centimètre carré de cette surface reçoit par minute $1,7633^{\text{cal}}$, et la surface entière, $1,7633 \times 4\pi D^2$ calories. Cette quantité de chaleur représente la totalité de la chaleur émise par le soleil dans toutes les directions. Chaque

centimètre carré de la surface solaire rayonne donc, pour sa part, cette même quantité divisée par $4\pi R^2$, R étant le rayon du soleil; ce qui fait $1,7633 \frac{D^2}{R^2}$.

Or, si nous menons du centre de la terre T (fig. 900) une tangente au disque solaire s , le triangle rectangle Tsr nous donnera, $\frac{D}{R} = \frac{1}{\sin \alpha}$. En faisant le calcul, on trouve 84888 calories. Cette quantité de chaleur serait capable de fondre en une minute, une couche de glace qui recouvrirait la surface du soleil, et aurait $11^{\text{m}},80$ d'épaisseur; ou en un jour une couche de 4 lieues et $\frac{1}{2}$, et en une année une couche de 1547 lieues.

Tels sont les résultats trouvés par Pouillet, ils ne s'appuient sur aucune hypothèse et ne dépendent que de l'exactitude des indications données par le pyrhéliomètre; mais ces indications sont beaucoup trop faibles, comme nous allons le voir (1253), et quand on multiplie le résultat obtenu pour 1^{cc} , par le nombre qui représente la surface immense que l'on considère ensuite, l'erreur est multipliée par ce même nombre. Les résultats calculés par Pouillet, quoique très-remarquables, ne font donc que donner une idée affaiblie des quantités de chaleur envoyées par le soleil à la terre.

1251. Autres expériences. — Depuis les recherches de Pouillet, on en a

fait un grand nombre d'autres, au moyen de divers appareils. MM. Forbes et Kaemtz, Waterston, Frankland, ont employé l'héliothermomètre de Saussure, ou des appareils analogues.

De Gasparin employait une boule de cuivre mince ayant 10^{cm} de diamètre recouverte de noir de fumée, et au centre de laquelle était la boule noire d'un thermomètre¹. Cet instrument, qui n'a pas besoin d'être orienté, a donné des résultats d'accord avec ceux du pyréliomètre. De Gasparin a trouvé, près de Tarascon, en février 1853, pour la quantité de chaleur solaire arrivant à la terre, 0,68 de celle qui pénétrait dans l'atmosphère. M. Haëghens, au moyen du même instrument, trouvait, le 1^{er} mai, à Versailles, 0,431 à 8^h du matin, et 0,276 à 11^h 50^m.

MM. Waterston, Ericsson, Soret, le P. Secchi, ont opéré dans une enceinte à température constante. Un thermomètre noirci est placé dans un cylindre à double enveloppe, dans laquelle on fait passer un courant d'eau dont on connaît la température. Ce tube, muni d'un diaphragme à ouverture variable, est dirigé vers le soleil, son extrémité inférieure étant fermée par une lame de verre, et l'on observe la différence entre la température que prend le thermomètre et celle de l'enceinte. — Le P. Secchi a trouvé, à Rome, que cette différence est indépendante de la température de l'enceinte, ce que M. Waterston a vérifié jusqu'à 220°, en faisant passer un courant d'air chaud dans la double enveloppe. Nous devons ajouter que M. Violle, dont nous allons citer les expériences, n'a pas retrouvé cette constance. Il est à remarquer aussi que la différence varie beaucoup moins, d'une saison à l'autre qu'on n'aurait pu le supposer. Ainsi, elle est, à midi, de 12° environ pendant l'hiver, et de 13° à 14° seulement pendant l'été, quoique la hauteur du soleil à midi soit alors de 47° supérieure à ce qu'elle est en hiver. Cela tient à la plus grande quantité, pendant l'été, de la vapeur d'eau dont nous avons vu la grande faculté d'absorption (869). Quand on opère sur les montagnes, on se débarrasse de cette influence, d'autant plus qu'on opère à une plus grande altitude; c'est ainsi que M. Soret a trouvé, près de Genève, aux altitudes de 400^m, 2500^m, et 4800^m sur le Mont-Blanc, les différences moyennes, 15°,5; 18°,6; 21°,13. M. Waterston a trouvé dans l'Inde 27°,8 par un temps très-sec, le soleil étant à 70° au-dessus de l'horizon.

M. P. Desains a fait de nombreuses expériences sur la radiation solaire, tant à Paris que dans les Alpes, au moyen d'un appareil analogue à celui que nous venons de décrire, dans lequel il introduisait, au lieu du thermomètre, une *pile thermo-électrique* (841) dont une des bases était frappée par les rayons solaires². Après avoir constaté que les déviations de l'aiguille du *rhéomètre* qui accompagne la pile, sont proportionnelles aux indications d'un thermomètre noirci mis à la place de cette pile, il a, entre autres résultats, constaté l'énorme influence de la vapeur d'eau répandue dans l'air.

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XXVI, p. 676.

² *Comptes rendus des séances de l'Acad. des sciences de Paris*, t. LXIX, LXXVIII et LXXX.

1252. Thermochrose de l'air. — MM. Forbes et Kacmztz, à la suite de nombreuses observations faites de 1832 à 1842, sont arrivés aux conclusions suivantes¹ : — 1° La radiation solaire est beaucoup plus forte sur les montagnes que dans les plaines. Ce résultat déjà constaté par De Saussure et souvent vérifié depuis, a été déduit de mesures prises à Brienz et sur le Faulhorn, dont les altitudes diffèrent de 2119^m; il s'explique par la diminution, à mesure qu'on s'élève, de l'épaisseur, de la densité et de l'humidité de la couche atmosphérique supérieure.

2° La proportion absorbée par une couche d'air est d'autant plus faible que les rayons ont déjà traversé une couche plus épaisse; ce qui vient de ce que certains rayons, les rayons obscurs, sont absorbés par l'air en plus grande proportion que les rayons lumineux. Les premiers forment à peu près les 0,8 de la totalité. Cela revient à dire que l'atmosphère est *thermochoïque* (874), de même qu'elle est légèrement *colorée*. La proportion de chaleur que conserve, par un temps clair, un rayon qui traverse verticalement l'atmosphère est comprise entre la moitié et le quart de celle qu'il possédait avant d'y entrer.

3° L'intensité diminue sensiblement en progression géométrique quand l'espace d'air traversé ne dépasse pas 4 fois l'épaisseur verticale de l'atmosphère.

La *thermochoise* de l'air a été constatée par MM. Melloni, Soret, Desains, ... en plaçant des lames diathermanes sur le trajet des rayons solaires qui frappent l'actinomètre, et constatant que la proportion absorbée par ces lames varie suivant l'épaisseur atmosphérique traversée. Par exemple, Melloni a vu une lame d'eau qui laissait passer 0,60 de la chaleur incidente à midi, n'en laisser passer que 0,32, une heure avant le coucher du soleil; et le cristal de roche enfumé, laisser passer, au contraire, 0,32 à midi et 0,62 une heure avant le coucher du soleil. M. Volpicelli a fait beaucoup d'expériences semblables au moyen d'un grand nombre de lames différentes.

1253. Expériences de M. Violle. — M. Violle a fait un grand travail sur la radiation du soleil en vue de déterminer la température de sa surface². Il commence par discuter les méthodes et les appareils employés antérieurement. Il remarque que les pyréliomètres disposés comme celui de Pouillet (1249), donnent des résultats trop faibles; la température de l'eau étant toujours inférieure à celle de la base noircie du vase d'argent; car si, après l'avoir laissé au soleil, on porte l'appareil à l'ombre, on voit son thermomètre continuer de monter pendant plus d'une minute, ce qu'explique l'existence de la mince couche d'eau stagnante adhérent à la lame d'argent, et dont Peclet a signalé la grande influence (958). Ajoutons que la surface noircie n'absorbe pas toute la chaleur incidente, une petite portion étant diffusée par le noir de fumée (885). L'héliothermomètre, la boule de Gasparin, peuvent donc, comme l'appareil de Pouillet, servir à comparer les radiations à différentes heures de la journée, mais ils ne peuvent donner de valeur

¹ *Phil. Magaz.* (1842), et *Biblioth. de Genève* (arch. des sc.), 1842, t. XLI, p. 179.

² *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. X, p. 289.

absolue, les moindres changements dans la forme, la masse, les dimensions de l'appareil apportant de notables différences dans les résultats. Quant aux actinomètres à enceinte de température constante, ils ne conduiront à des résultats comparables qu'autant qu'on suivra les indications données par Dulong et Petit, et qu'on tiendra compte des observations de MM. de la Provostaye et Desains sur l'influence de la forme et de la grandeur de l'enceinte (944). C'est ce qu'a fait M. Violle dans la construction de l'appareil que nous allons décrire.

Actinomètre de M. Violle. — Cet appareil (*fig. 901*), dont la figure 902 représente une coupe par un plan vertical, se compose de deux enveloppes



Fig. 901.

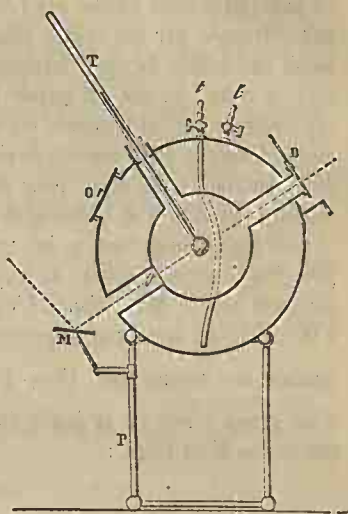


Fig. 902.

sphériques, dont l'intérieure, qui est noircie en dedans, a 15^{cm} de diamètre. Au centre, se trouve la boule noircie d'un thermomètre T. Dans l'espace compris entre les deux enveloppes, on introduit de la glace fondante par l'ouverture o, qu'on ferme ensuite, ou l'on y fait passer un courant d'eau par les tubes t, t'. Les rayons solaires sont projetés sur la boule du thermomètre à travers l'ouverture D, de 17^{mm},5 de diamètre, munie d'un diaphragme à trous variables. On reconnaît si les rayons enveloppent la boule, en observant son ombre sur une plaque de verre dépoli g, soit directement, soit dans le petit miroir articulé M. On oriente l'appareil en déplaçant la sphère dans l'anneau sur lequel elle repose.

Voici comment on opère : Quand l'appareil fermé et bien orienté est en équilibre de température, on laisse entrer les rayons solaires en D, et l'on observe de minute en minute la température croissante du thermomètre, jusqu'à ce qu'il soit stationnaire; ce qui demande environ 15^{min}. On ferme ensuite l'ouverture D, et l'on observe, de même, les abaissements de température.

Pour déduire de ces observations, la *quantité de chaleur reçue*, on s'appuie sur cette remarque de M. Desains que, si l'on ajoute la vitesse V du réchauffement pendant l'insolation du thermomètre noirci indiquant 0°, à sa vitesse de refroidissement U pour la même température, la somme $V + U$ est sensiblement constante en un même lieu et dans les mêmes conditions atmosphériques. En effet en multipliant cette somme par l'équivalent en eau, M, de la partie du thermomètre frappée par les rayons solaires, on obtient la quantité de chaleur qu'il reçoit par minute lorsqu'il marque 0°. Or, cette quantité est égale, d'un autre côté, à celle, S, que lui envoie la source, diminuée de celle qu'il perd par rayonnement; et, si la source est *incandescente*, la chaleur perdue sera négligeable devant S, et la quantité de chaleur reçue sera constante comme l'intensité de la source. Ainsi donc, pour chaque série d'expériences, $V + U$ reste constant, quoique V et U changent séparément avec θ .

Ce résultat important a été vérifié directement par M. Violle, assisté de MM. Margottet et Rigollot, au moyen de nombreuses observations faites principalement sur le Mont-Blanc. L'équivalent en eau du thermomètre était égal à 0^{sr},222, de sorte que la quantité de chaleur reçue sur un centimètre carré pendant une minute était $(V + U) \frac{0,222}{s}$; en représentant par s la surface d'un grand cercle de la boule du thermomètre. — Voici quelques résultats obtenus au Mont-Blanc :

		Altitude	U + V	Chal. reçue en 1 ^m sur 1 ^{ce}
16 avril 1875	} Au sommet.....	4810 ^m	6,552	2,392
10 ^h 22 ^m		1200 [•]	5,540	2,022
17 août 1875	} Aux Grands-Mulets....	3050 ^m	5,635	2,057
10 ^h 40 ^m		1200	4,978	1,817

$U + V$ représente l'excès t de température que recevrait un thermomètre noirci au bout d'une minute d'insolation, s'il n'éprouvait aucune perte extérieure.

Pouillet exprimait cet excès, t , par la formule $t = ap^{\epsilon}$, (1250). Mais il résulte d'expériences de MM. Soret, Desains, Violle, que la *constante solaire* a , prend souvent des valeurs différentes, même dans les plus belles journées, à cause de l'absorption par la vapeur d'eau que contient l'atmosphère en quantité variable. De plus, l'épaisseur de la couche d'air, ϵ , ne peut être calculée par la formule [3] (1250), sans tenir compte de la pression P de l'atmosphère.

M. Violle la remplace par l'expression $e = \epsilon \frac{P}{760}$, et il substitue à la formule

de Pouillet celle qui suit, qu'il a vérifiée par un grand nombre d'observations

$$[a] \quad t = ap \frac{1}{760} \varepsilon [P + (H - h) kf],$$

a, p, k sont des constantes absolues; ε , l'épaisseur de la colonne traversée par les rayons, l'épaisseur au zénith étant prise pour unité; P la pression barométrique; H , la hauteur de la couche d'air à partir de laquelle il n'y a plus de vapeur sensible; h l'altitude du lieu d'observation, et f la moyenne tension de la vapeur d'eau dans la colonne d'air de hauteur $H - h$. Dans cette formule, $P\varepsilon$ représente l'effet de l'air sec, et $(H - h) kf\varepsilon$, celui de la vapeur d'eau, qui est, comme on voit, considérable. Dans une expérience faite à Paris, par un temps moyennement humide, f étant égale à 14^{mm},2, l'absorption due à la vapeur d'eau était les $\frac{2}{3}$ de l'absorption totale.

La formule rentrerait dans celle de Pouillet, si l'on supposait P et f constants pendant toute la série des observations.

M. Violle a été conduit à la formule $[a]$, en considérant l'air humide comme composé de deux couches superposées : l'une d'air sec à la pression $P - f$ produisant une première absorption, qui se déduit de la formule $t_1 = ap_1 \frac{1}{760} P\varepsilon$, en négligeant f devant P ; l'autre de vapeur à la pression f , agissant sur les rayons déjà affaiblis, de sorte que l'effet thermométrique devient $t = t_1 p_2 \frac{1}{760} (H - h) k_1 f\varepsilon$, ou $t = t_1 p_1 \frac{1}{760} (H - h) k_1 f\varepsilon$, en posant $p_2 = p_1 \frac{1}{760} k_1$. En remplaçant t_1 par sa valeur, et supposant $k_1 = k$, ce qui est vrai très-approximativement, on trouve la formule $[a]$.

Pour calculer, au moyen de cette formule, la quantité de chaleur reçue sur 1^{cc}, à la limite de l'atmosphère, il faut connaître les quantités H et f . M. Violle est parvenu à les déterminer, dans les conditions exceptionnellement favorables de ses observations du Mont-Blanc citées plus haut. Au sommet, la tension de la vapeur était inférieure à 1^{mm}; on pouvait donc supposer sans erreur sensible que l'humidité était insensible à une hauteur H double de l'altitude du Mont-Blanc. Quant à la tension f , comme l'air était très-calme et que cette tension était très-faible au glacier des Bossons et aux Grands-Mulets, on a pu lui attribuer dans les deux couches d'air comprises entre le sommet, les Bossons et les Grands-Mulets, une valeur égale à la moyenne des tensions observées aux deux limites de chaque couche. En opérant ainsi, M. Violle a trouvé pour les constantes de la formule

$$a = 6^{\circ},958, \quad p = 0,946, \quad k = 0,148; \quad \text{d'où } Q = 2^{\text{cal}},54,$$

pour le nombre de calories reçues en 1^{min} par 1 centimètre carré, à la limite de l'atmosphère; la calorie étant rapportée au gramme. On voit combien cette valeur de Q est supérieure à celle qu'avait trouvée Pouillet (1250).

On peut, au moyen de la formule [a], calculer l'excès t à différentes altitudes, au moment des observations faites à la cime du Mont-Blanc, c'est-à-dire le 16 août 1875 à 10^h 22^m du matin. On a formé ainsi le tableau suivant :

	Altitude	P _z	(H — h) kfe	t	q	$\frac{q}{Q}$
Limite de l'atmosphère...	» ^m	0	0	6°,958	2°,540	1
Cime du Mont-Blanc....	4810	541,8	309,3	6°,552	2°,392	0,94
Grands-Mulets.....	3050	672,2	964,8	6°,199	2°,262	0,89
Glacier des Bossons.....	1200	832,9	2393,3	5°,540	2°,022	0,79
Paris.....	60	956,0	4481,0	4°,780	1°,745	0,68

1254. De la température du soleil. — On a fait beaucoup de tentatives pour obtenir une évaluation au moins approchée de la température de la surface du soleil. Mais les résultats auxquels sont arrivés les physiciens diffèrent énormément les uns des autres. Par exemple, tandis que M. Waterston trouve 9 à 10 millions de degrés; le P. Secchi, 1 à 2 millions ¹, et M. Ericsson 2,290000°; M. Zaelner n'arrive qu'à 27700°; et MM. Fizeau, H. S. C. Deville admettent que la température de la surface solaire est comprise entre 2500° et 2800°. Pouillet était arrivé à 1700°, et M. Vicaire, après discussion des résultats trouvés avant lui, a proposé 1398°.

L'immense écart qui existe entre ces nombres vient des différences entre les données fournies par les observations actinométriques, des hypothèses faites sur le pouvoir émissif du soleil, et surtout du mode de calcul employé pour passer des effets de la radiation à la température du corps rayonnant. Tandis que les uns, qui ont obtenu les résultats les plus élevés, sont partis de la loi de Newton (894), quoiqu'il soit bien prouvé qu'elle ne s'applique qu'au cas de faibles différences de température, d'autres se sont appuyés sur la loi du rayonnement de Dulong et Petit, loi qui a été vérifiée par Pouillet jusqu'à 1000°.

C'est de cette loi qu'est parti M. Violle, et voici comment il a procédé. Supposons d'abord la boule noire du thermomètre de l'actinomètre (fig. 902) réduite à un point; cette boule reçoit, de la surface S de l'enceinte noire dont t est la température, une quantité de chaleur, qu'elle lui renvoie, égale à Sa^t , a étant égal à 1,0077 (934). Si maintenant les rayons solaires entrent par une ouverture circulaire, ω , telle qu'elle soit vue du centre sous le même diamètre apparent que le soleil, leur effet sera le même que celui d'un disque fermant cette ouverture et possédant le même pouvoir émissif et la même température, x , que la surface du soleil (920). Soit 0 la température stationnaire qu'atteint alors le thermomètre, il rayonnera vers l'enceinte, au lieu de Sa^t , la quantité de chaleur Sa^0 qui sera égale à la somme des quantités qu'il reçoit de l'enceinte et de la surface ω ; on aura donc

$$Sa^0 = Sa^t + \omega a^x \quad [b]$$

équation semblable à celle qu'avait posée M. Vicaire.

¹ *Le Soleil*, par le P. A. Secchi (1877), 2^e partie, pp. 231 et 253.

Supposons maintenant que la boule du thermomètre ne soit plus réduite à un point, et qu'on fasse entrer les rayons par une ouverture Ω assez grande pour que toute la boule reçoive les rayons solaires. Chaque point de cette boule pourra être considérée comme recevant, indépendamment des rayons envoyés par la partie non enlevée de l'enceinte, et par le soleil ou le disque de surface ω , la radiation de la partie du ciel voisine du soleil. Cette dernière agit comme une surface $\Omega - \omega$ ayant une température inconnue y , et l'on aura

$$Sa' = Sa' + \omega a^x + \Omega a^y. \quad [c]$$

En appliquant cette équation aux valeurs de t déduites de ses observations du Mont-Blanc faites le 16 août 1875 (1253), M. Violle a pu négliger le troisième terme du deuxième membre; car, lors de ces observations, il pouvait faire varier l'ouverture Ω sans que l'excès t fût modifié. En outre, les vitesses de refroidissement dans le vide du thermomètre employé, ont été trouvées par l'expérience égales à $0,22 \cdot t$, quand t était peu élevé. En supposant donc que le thermomètre exposé dans le vide aux rayons solaires, soit arrivé à l'état stationnaire, l'effet de la radiation qui produit, en 1^{min} , l'élévation de température t , est compensé par la perte par rayonnement; et l'on a $t = 0,22 \cdot t'$, d'où $t' = \frac{0,22}{t}$. A la limite de l'atmosphère, on a $t' = 31^{\circ},63$, d'où $q = 2^{\text{cal}},540$, et en portant ces quantités dans l'équation (b), il vient $x = 1500^{\circ}$ pour la température effective de la surface du soleil, c'est-à-dire la température que devrait avoir un disque de même diamètre apparent que le soleil, et ayant un pouvoir émissif égal à l'unité, pour nous envoyer une quantité de chaleur égale à celle que nous envoie réellement le soleil.

Méthode par comparaison. — On a cherché aussi à évaluer la température de la surface du soleil, en comparant sa radiation à celle de sources incandescentes, de température connue. MM. Waterston, Soret, Violle, le P. Secchi, ont fait des expériences dans cette direction. M. Violle a opéré, aux forges d'Alleverd, sur un jet d'acier en fusion, sortant d'un appareil Martin-Siemens, et tombant dans un moule de 500^{mil} pendant $1^{\text{min}} \frac{1}{2}$. La température du jet était très-approximativement de 1500° , et les rayons entrant dans l'actinomètre, par une ouverture présentant un diamètre apparent égal à celui du soleil, produisaient au bout d'une minute, un excès de température de $1^{\circ},3$. Sous l'influence des rayons solaires, l'excès donné par le même thermomètre était de $4^{\circ},2$, 3 fois $\frac{1}{2}$ plus fort. En admettant que les intensités des radiations soient proportionnelles aux excès produits, ce qui ne peut être éloigné de la vérité quand ces excès sont peu élevés, et appliquant la formule [b], on a trouvé $x = 1600^{\circ}$ environ, pour la température effective du soleil; nombre d'accord avec celui qu'avait donné la méthode précédente.

Si maintenant on voulait obtenir la température vraie de la surface du soleil, c'est-à-dire la moyenne des températures des différents points de cette surface,

telles que les donnerait un thermomètre à air qui y serait plongé, il faudrait connaître son pouvoir émissif. M. Violle, après avoir déterminé le pouvoir émissif, 0,037 de l'acier en fusion, en partant de sa radiation et en s'appuyant sur la loi de Dulong et Petit, a été conduit, par des expériences encore inachevées sur la radiation des sources à enveloppe gazeuse incandescente, à regarder le pouvoir émissif du soleil, comme notablement inférieur à celui de l'acier en fusion, et à adopter pour la température vraie de la surface solaire, 2500° environ.

Remarque. — Ce nombre paraît bien faible, il dépasse à peine le point de fusion du fer, et la marche suivie pour l'obtenir comporte plus d'une incertitude. Mais M. Violle remarque que pour le faire varier de 100°, il faudrait adopter un pouvoir émissif trois fois plus faible que celui dont on est parti pour le calculer. De plus, il résulte des expériences de M. H. Sainte-Claire Deville, sur la dissociation, que les éléments ne peuvent se combiner qu'au-dessous d'une certaine température très-élevée; et, comme l'analyse spectrale montre que les éléments qui composent la photosphère du soleil sont en général les mêmes que ceux que nous voyons sur notre globe, la température de cette photosphère, composée, d'après la belle hypothèse de M. Faye (1246), de poussières incandescentes formées par précipitation chimique, ne peut dépasser la limite des températures que nous pouvons produire par réactions chimiques dans nos laboratoires. Mais nous verrons que cette limite peut être considérablement élevée par une forte pression, et celle qu'exerce l'immense atmosphère du soleil doit être énorme.

D'un autre côté, le P. Secchi remarque que l'analyse spectrale fait apercevoir, dans un creuset rempli de platine incandescent, les bandes du calcium; tandis que la lumière solaire donne les raies du calcium. Cette même lumière présente les raies du fer en vapeur, raies que le fer en fusion ne produit pas, si ce n'est, dans le convertisseur Bessemer, pour la fabrication de l'acier, au moment où commence la combustion du métal. Il faut donc que la température du soleil soit au moins égale à celle de la volatilisation du fer.

On peut du reste s'expliquer la faiblesse des nombres obtenus par les meilleures méthodes, en remarquant que l'on part toujours de la radiation solaire, et que celle-ci est énormément affaiblie par l'absorption des rayons à travers l'immense atmosphère qui enveloppe l'astre; et nous pouvons juger de l'étendue de cette absorption par celle que produit la mince atmosphère de la terre (1250).

On voit par ce qui précède, que les recherches si remarquables tendant à déterminer la température de la surface solaire, n'ont conduit qu'à des résultats très-incertains. Si l'on doit renoncer aux millions de degrés, il faut convenir que la température en question doit être bien supérieure à la limite assignée par la dissociation sous les pressions que nous réalisons à la surface de la terre. En admettant une température de quelques centaines de mille degrés, il nous semble qu'on aura un aperçu, très-vague mais vraisemblable, de la température du soleil. Malgré l'incertitude de ce résultat, on peut dire que c'est déjà une

belle conquête pour la science que d'avoir relégué au rang des fables cette chaleur excessive que l'on attribuait autrefois au globe solaire, et qui était tellement au-dessus de tout ce que l'on connaissait, que l'imagination ne pouvait en concevoir l'immensité.

1255. Température des différents points du disque solaire. — L'éclat est un peu moins vif près des bords du disque solaire que dans les parties centrales. Ce résultat, constaté par différents observateurs, se voit immédiatement sur des images photographiques du soleil obtenues par MM. Fizeau et Foucault, si l'on admet que les intensités lumineuses des rayons augmentent en même temps que les effets chimiques. Le P. Secchi a reconnu, en 1852, qu'il en est de même de la chaleur, c'est-à-dire que les rayons qui partent des bords du disque sont plus faibles que les autres ¹. Pour le constater, il disposa la pile d'un thermomultiplicateur sur le prolongement de l'axe d'une lunette astronomique montée parallaxiquement, c'est-à-dire menée par une horloge qui lui fait suivre le soleil dans son mouvement diurne. La pile, qu'un large écran, porté par la lunette, abritait des rayons directs du soleil et du rayonnement de l'atmosphère, était garnie de doubles diaphragmes présentant une fente horizontale qui laissait huit soudures à découvert. Il se forme au-delà de l'oculaire d'une lunette, comme nous l'expliquerons dans l'optique, une image du soleil, que l'on peut recevoir sur un écran. La pile était placée de manière à recevoir sur sa base la partie de cette image qui correspondait au point du disque solaire que l'on voulait observer.

Le P. Secchi a reconnu, par ce moyen, que : 1° la température va en diminuant du centre du disque solaire au bord, où la température est presque moitié de celle du centre. Ce résultat vient de ce que les rayons qui partent des bords ont à traverser une bien plus grande épaisseur de l'atmosphère solaire que ceux qui partent du milieu du disque. 2° La température n'est pas la même partout à égale distance du centre; les régions polaires sont moins chaudes que les régions équatoriales. 3° Il semble aussi que les différentes faces que le soleil nous présente successivement dans son mouvement de rotation n'ont pas la même température. Ce fait avait été déjà reconnu par M. Buys-Ballot, à l'Observatoire d'Utrecht. 4° Dans le voisinage des taches, la chaleur est plus faible, et elle ne paraît pas plus forte sur les facules.

Il semble enfin résulter de la comparaison des années pendant lesquelles le soleil a présenté beaucoup de taches, à celles où il n'en avait que très-peu, que la température moyenne des premières est un peu plus basse que celle des autres. Mais la différence étant très-peu prononcée, ce résultat a besoin d'être confirmé par de nouvelles observations.

¹ *Comptes rendus des séances de l'Acad. des sciences de Paris*, t. XXXIV, XXXV et XXXVI.

II. Chaleur propre du globe terrestre.

1256. Le globe terrestre possède une chaleur propre intérieure, qui fait que la température s'élève à mesure qu'on s'enfonce plus profondément au-dessous de sa surface. Cet accroissement, observé depuis longtemps dans les mines, fut attribué d'abord à la chaleur dégagée par les mineurs et par leurs lampes. Plus tard, le phénomène ayant été observé dans des mines abandonnées, on l'expliqua par des fermentations locales, par la décomposition de pyrites. On a fait beaucoup d'expériences à ce sujet, soit en observant la température des mines à différentes profondeurs, soit en mesurant celle de l'eau des puits artésiens.

Température des mines. — Les premières observations précises ont été faites en France, en 1740, par Gensanne, dans les mines de plomb du Giromagny, près de Belfort. Parmi les nombreuses observations faites depuis, nous citerons celles de d'Aubuisson, en 1806, dans les mines de Poullaouen et d'Huelgoet, en Bretagne; de Saussure dans les mines de sel de Bex, canton de Berne; de Humboldt en Saxe et dans plusieurs mines du Pérou et du Mexique. En Angleterre, beaucoup d'observateurs, en particulier M. W. Fox, ont expérimenté dans les mines de houille du Nord et de Cornouailles. En 1827, Cordier a rassemblé et discuté les résultats connus, et y a ajouté ses propres déterminations, après avoir perfectionné les méthodes d'observation ¹.

Dans le principe, on se contentait de prendre la température de l'air au fond des mines, moyen peu sûr, car Cordier a trouvé quelquefois 6° de différence entre cette température et celle de la roche. L'influence de la présence des mineurs est aussi évidente : d'après Despretz, un homme de moyenne taille dégage environ 180 calories par heure, quantité qui peut élever 542^m cubes d'air, de 1°; une lampe, brûlant 15^{sr} d'huile par heure, produit le même effet sur 409^{mc}. Il résulte de là que 10 mineurs, munis chacun d'une lampe et répartis dans une galerie de 1^m de largeur sur 2^m de hauteur, pourraient échauffer de 1° l'air contenu dans un espace de 4650^m. Dans les travaux abandonnés, on a à craindre l'introduction de l'air extérieur, le refroidissement dû à l'évaporation des eaux d'infiltration. On a essayé de prendre la température des eaux jaillissant au fond des mines; mais ces eaux proviennent le plus souvent de couches supérieures à celles où l'on observe.

Cordier a imaginé un procédé simple et précis : on fore un trou oblique dans la paroi de la mine, on y enfonce un thermomètre entouré de papier fin et protégé par un étui de fer-blanc, et l'on ferme l'ouverture du trou, pour que l'air extérieur ne puisse y circuler. L'expérience doit se faire dans l'angle du front de taille, c'est-à-dire de l'extrémité de la galerie où l'on vient d'enlever la roche, dont la température n'a pas eu le temps d'être modifiée par le contact prolongé de l'air.

¹ Mémoires de l'Académie des sciences de Paris, t. VII, p. 473.

Pour connaître l'accroissement de température à partir de la surface du sol, on retranche de celle qu'on observe à cette surface, celle que l'on a trouvée à une certaine profondeur. La première est très-variable; mais l'observation prouve qu'à une certaine profondeur on trouve une température constante qui coïncide avec la *température moyenne* du lieu. C'est cette température constante qu'on retranche de celle qu'on trouve au fond de la mine. En divisant la profondeur par le nombre de degrés ainsi obtenu, on a la quantité dont il faut s'enfoncer pour que la température augmente de 1°. Cordier a obtenu ainsi, dans les mines de houille de Decise, de Littry et de Carmaux, les nombres 15^m, 20^m et 35^m. Ces résultats, très-différents, dépendent de la nature du sol et de sa conductibilité pour la chaleur.

Température des puits artésiens. — La température de l'eau des puits artésiens fait connaître celle de la nappe d'eau qui les alimente. Le thermomètre doit être porté au fond du trou de sonde, la température de l'eau à sa sortie pouvant être modifiée par le contact des couches de terrain qu'elle a traversées. On se sert, dans ces expériences, de thermomètres à maximum à déversement que nous décrivons plus loin, renfermés dans des tubes métalliques assez forts pour résister à la pression.

Les observations faites dans les puits artésiens de Paris et de ses environs, particulièrement dans celui de l'abattoir de Grenelle, à une profondeur de 547^m au-dessous du sol, ont donné un accroissement de 1° pour 30^m de profondeur, la température de la couche invariable étant de 10°,7. De Humboldt en partant d'observations faites dans le puits artésien de Neue-Salzwerke en Westphalie, à 607^m au-dessous du niveau de la mer, et M. Wallerdin, au moyen d'expériences faites dans le puits foré de Saint-André (Eure), et dans celui de Mondorff, dans le grand-duché de Luxembourg, où la sonde a pénétré à 730^m de profondeur, sont arrivés à peu près au même résultat. Depuis, M. Wallerdin a trouvé, près du Creusot, 38°,31, à 816^m de profondeur et 495^m au-dessous du niveau de la mer. Dans un autre puits voisin, à 554^m de profondeur, il a trouvé 27°,22; ce qui donne une différence de 11°,09, pour une différence de profondeur de 262^m, ou 1° pour 23^m,6. L'accroissement dans ces localités paraît donc plus rapide vers 500^m, que près de la surface du sol. Il serait intéressant de mesurer la température à de plus grandes profondeurs. Les sondes à tige flexible imitées des Chinois par M. Jobard, permettraient de pénétrer sans trop de dépenses, deux fois plus bas qu'on ne l'a fait jusqu'à ce jour.

En admettant un accroissement de 1° pour 30^m, et en supposant la température de 10° à la surface, on trouve qu'il faudrait descendre à 2700^m pour trouver la température de l'eau bouillante, en admettant que la loi reste la même à toutes les profondeurs. A 12 lieues, on trouverait la température du fer fondu, et à une vingtaine de lieues, toutes les matières minérales connues seraient en pleine fusion, s'il n'y avait pas à tenir compte de la pression, dont nous avons vu l'influence sur le point de fusion (1104).

1257. Origine de la chaleur propre du globe. — On a soupçonné depuis

les temps les plus reculés, que l'intérieur de la terre est rempli de matières incandescentes. Cette opinion d'un *feu central*, dont on trouve des traces dans les mythologies de presque tous les peuples, n'était d'abord fondée que sur des conjectures, ou sur une sorte d'intuition vague née de l'observation imparfaite de certains phénomènes intenses, comme les éruptions volcaniques. Mais ce n'est qu'à partir du commencement du dernier siècle que l'hypothèse du feu central a pris une tournure scientifique, après la découverte de l'aplatissement de la terre, que l'on a expliqué, en supposant que le globe a été primitivement à l'état de fusion ignée. Buffon a soutenu particulièrement cette opinion; mais comme elle n'était pas appuyée sur des observations assez nombreuses, ni surtout assez directes, elle ne tarda pas à tomber dans le discrédit. C'est alors que domina le système neptunien, dans lequel on attribuait à l'eau, la fluidité primitive du globe, qui se serait solidifié du centre à la surface par voie de cristallisation aqueuse.

L'opinion d'une chaleur centrale reprit bientôt faveur; on remarqua la similitude des produits rejetés par les volcans dans toutes les parties du monde. On reconnut que ces produits viennent de profondeurs situées au-dessous des terrains primordiaux, dont la nature fut mieux connue. Enfin, les expériences faites à différentes profondeurs ramenèrent les esprits les plus prévenus.

Formation du globe. — On admet généralement aujourd'hui que la terre, à l'origine des choses, formait un amas de vapeurs qui se sont condensées peu à peu par refroidissement, en une masse liquide qui a pris d'elle-même la forme sphérique, forme un peu modifiée par le mouvement de rotation. Cette masse, formée des substances les plus réfractaires, principalement de métaux, était enveloppée d'une atmosphère épaisse de vapeurs et de gaz, parmi lesquels l'oxygène et l'acide carbonique. Le refroidissement ayant continué, la surface s'est oxydée aux dépens de l'oxygène, et plus tard l'acide carbonique a été absorbé à son tour. En même temps, il s'est formé une croûte solide, soit parce que les oxydes formés sont moins fusibles que les métaux, soit par suite de la continuation du refroidissement. Cette croûte n'a pas tardé à se briser et à se plisser en divers sens, en formant les chaînes de montagnes, parce que le noyau liquide se contractait par le refroidissement plus que ne le faisait l'enveloppe solide (1011). Les eaux provenant de la vapeur d'eau condensée se sont alors précipitées dans les parties les plus basses, entraînant avec elles des débris de toutes sortes, qu'elles ont ensuite déposés. Ces phénomènes se reproduisant par intermittences, à mesure que le globe se refroidissait, il en est résulté les différents systèmes de montagnes et la distinction des époques géologiques. Cependant, l'enveloppe solide continuait à s'accroître de dehors en dedans. Le diamètre de la terre ayant diminué, en même temps que sa masse restait constante, le mouvement de rotation a dû s'accélérer, et l'aplatissement augmenter, circonstances qui ont aussi concouru à la dislocation de la croûte solide.

Dans ces époques primitives de l'âge du monde, la chaleur de la surface provenait principalement du feu intérieur; la température devait donc être à peu

près la même à toutes les latitudes. Mais la croûte augmentant d'épaisseur, la chaleur centrale se fit sentir de moins en moins, et l'atmosphère diminuant d'épaisseur, l'action solaire devint peu à peu prépondérante; et comme elle n'agit pas également à l'équateur et dans le voisinage des pôles, les climats commencèrent à se dessiner. En même temps, les êtres organisés firent leur apparition sur le globe et se répandirent sur cet amas de ruines qui en compose la surface; mais cela ne put avoir lieu qu'après un nombre immense de siècles.

1258. État actuel du globe. — Si l'on admet la loi d'une augmentation de température de 1° pour 30^m de profondeur, la couche solide qui existe actuellement autour du globe ne doit pas avoir plus d'une dizaine de lieues d'épaisseur, c'est-à-dire moins de $\frac{1}{150}$ du rayon de la terre. Mais, d'après la remarque de M. Hopkins, l'épaisseur doit être beaucoup plus grande, à cause de l'abaissement du point de solidification par la compression des matières qui se contractent en se solidifiant (1104). Malgré cela, la couche solide est relativement très-mince, et serait représentée par une feuille de papier, sur un globe de 20^{cm} de diamètre. Nous vivons donc sur une mince pellicule flexible et fragile dont l'épaisseur doit être très-différente dans les divers pays. Les sources thermales nous apportent des indices de la haute température des parties profondes, et les volcans amènent à la surface des spécimens des matières en fusion que recouvre la croûte extérieure.

Tremblements de terre. — La masse fluide intérieure tend à obéir aux actions attractives de la lune et du soleil, et à éprouver des changements périodiques de forme, analogues à ceux que nous présente la mer dans les marées. La croûte solide est donc soumise à des efforts intérieurs qui tendent à la déformer alternativement, et auxquels elle résiste ordinairement. Mais, quand les actions de la lune et du soleil s'ajoutent, ce qui a lieu aux syzygies, lorsque les centres des deux astres sont en ligne droite avec celui de la terre, l'enveloppe solide peut être ébranlée là où la croûte a moins d'épaisseur ou est moins solidement assise. C'est là une des causes des tremblements de terre. Il résulte, en effet, du relevé fait par M. Perrey de ces désastreux phénomènes produits pendant un demi-siècle, qu'ils sont plus fréquents aux époques des syzygies qu'aux quadratures, au périhélie qu'à l'apogée, et aux heures voisines du passage de la lune au méridien, qu'au moment où cet astre s'en trouve à 90°¹.

1259. Résultats du calcul. — L'existence d'une chaleur centrale est confirmée par les calculs mathématiques de Fourier, qui ont conduit aux conséquences suivantes :

1° Si la chaleur de l'intérieur de la terre provenait de l'action prolongée du soleil, la température, en avançant vers le centre, irait en diminuant ou serait constante, suivant que l'état d'équilibre final aurait été atteint ou ne le serait pas encore.

2° La croûte solide reçoit actuellement de la chaleur lancée par le soleil, et

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XXXVIII, p. 1038.

d'autre venant de l'intérieur du globe. Cette dernière élèverait de $\frac{1}{4}$ de degré la température de la surface, si la terre avait la conductibilité du fer ; mais elle ne l'élève au plus que de $\frac{1}{36}$ de degré, si l'on estime, avec de Saussure, que la conductibilité moyenne des matières qui la composent est $\frac{1}{9}$ de celle du fer. L'état actuel diffère donc peu de l'état définitif qui tend à s'établir.

3^o L'abaissement actuel de température de la surface n'est que de $\frac{1}{37600}$ de degré par siècle. Il n'a été que de $\frac{1}{288}$, au plus, depuis Hipparque. Le refroidissement, d'abord rapide, est donc devenu excessivement lent.

4^o Cependant la chaleur intérieure se perd toujours, en traversant la croûte solide sans en modifier sensiblement la température. Fourier trouve que la quantité de chaleur perdue serait capable de fondre, pendant un siècle, une couche de glace de 3 mètres d'épaisseur.

La perte de chaleur du noyau liquide est accompagnée d'une contraction qui doit changer l'équilibre de l'enveloppe solide, et déterminer un jour des dislocations d'autant plus intenses que, l'épaisseur étant devenue très-grande, ces phénomènes ne peuvent se produire qu'après un changement notable des conditions de l'équilibre primitif. On doit donc penser que de nouvelles révolutions de la surface du globe sont probables ; mais elles ne pourront avoir lieu qu'après un nombre immense d'années, car Laplace, en partant des observations d'Hipparque, a établi que la durée du jour n'a pas diminué de $\frac{1}{300}$ de seconde depuis l'époque de ce célèbre astronome : d'où l'on doit conclure que le retrait éprouvé par le globe, depuis cette époque, a été trop faible pour augmenter sensiblement la vitesse de rotation.

Hypothèse de Poisson. — L'accroissement de la température quand on s'enfonce dans l'intérieur du globe, a été expliqué par Poisson en supposant que la terre aurait traversé, il y a des milliers de siècles, une partie de l'espace où régnerait une très-haute température. Là, elle se serait échauffée jusqu'à une certaine profondeur, et maintenant elle perdrait peu à peu cette chaleur d'emprunt. Poisson avait été conduit à formuler cette hypothèse en remarquant que, d'après la loi de l'accroissement de la température avec la profondeur, les matériaux intérieurs du globe devraient être à l'état de vapeur, ayant une tension énorme à laquelle la croûte du globe ne pourrait résister. Mais il est bien évident que la loi, en supposant qu'elle soit exacte, ne peut plus s'appliquer dès qu'on arrive à la matière en fusion. Il en est comme d'un creuset rempli de plomb fondu ; la température des parois augmente de l'extérieur à l'intérieur, mais elle est à peu près constante dans toute la masse liquide. De plus, il faut tenir compte de l'énorme pression que supportent les parties profondes de la part de celles qui sont au-dessus. Aussi, l'hypothèse de Poisson n'a-t-elle pas été adoptée par les géologues et les physiciens ; nous la citons seulement à cause du renom de son inventeur.

§ 2. — SOURCES PHYSIOLOGIQUES DE CHALEUR.

1260. CHALEUR ANIMALE. — Les animaux dégagent continuellement de la chaleur pendant leur vie. Chez les animaux à *sang chaud* (mammifères, oiseaux), cette chaleur compense à chaque instant les pertes extérieures, de manière que leur température reste sensiblement constante. Chez les autres, dits à *sang froid*, la température n'a plus rien de fixe : elle suit les variations du milieu ambiant. Cependant, ces animaux engendrent de la chaleur, car leur température dépasse presque toujours un peu celle du fluide dans lequel ils vivent ; seulement, la chaleur se produit si lentement, qu'elle est enlevée à chaque instant par ce fluide. Ce qui distingue réellement les animaux à sang chaud, des animaux à sang froid, c'est que la température des premiers est sensiblement constante, tandis que celle des autres peut éprouver de grandes variations sans que leur existence soit compromise.

1261. Température des animaux. — Pour mesurer la température d'un mammifère, on introduit un thermomètre très-sensible dans une partie de son corps placée assez profondément pour ne pas subir l'influence du milieu ambiant. J. Davy engageait l'instrument sous la langue de l'animal. Cependant, là encore, surtout quand l'air est froid, la température est un peu plus faible que dans les régions profondes. Ce n'est que pour celles-ci que la température des animaux à sang chaud est vraiment constante. La température des régions superficielles, particulièrement de celles qui sont saillies (mains, pieds, nez, oreilles), peut être beaucoup plus basse, comme chacun a pu l'observer quand il fait très-froid.

Pour explorer les parties profondes des animaux vivants, sans pratiquer des incisions qui produiraient une irritation capable de modifier la température, MM. Becquerel et Breschet¹ ont employé deux systèmes d'aiguilles très-fines, formées chacune d'un brin de fil de cuivre et d'un brin de fil d'acier soudés bout à bout. On introduit l'une de ces aiguilles, *ab* (fig. 903), par la pointe d'acier *b*, dans l'organe que l'on veut explorer, de manière que la soudure soit au point dont on veut obtenir la température. L'extrémité *b* est mise en communication avec l'extrémité d'acier de l'autre aiguille *ce'* au moyen d'un fil de même substance *be*. Enfin, les extrémités de cuivre des deux aiguilles sont mises en communication avec les bouts du fil d'un *rhéomètre multiplicateur* R (841). La différence de température des soudures des aiguilles *ab*, *ce'*, est mesurée par la déviation de l'aiguille aimantée de cet instrument, qui doit être assez sensible pour tourner de 1° quand la différence de température des soudures est de 0°,1. La soudure *e'* de l'aiguille *ce'* est maintenue à une température constante, soit dans de la glace fondante, soit dans la bouche de

¹ *Traité de phys. dans ses rapp. avec la chimie et les sc. naturelles*, par M. Becquerel, t. II.

l'expérimentateur, soit encore dans l'étuve de Sorel, AB (1055), réglée de manière que la différence entre les températures des soudures des deux aiguilles soit assez petite pour que les déviations du rhéomètre ne dépassent pas 20°. Du reste, l'irritation que produit la présence de l'aiguille ne semble pas modifier la température de l'organe, car des aiguilles de différentes grosseurs donnent les mêmes résultats, et cependant l'irritation doit être différente.

Pour les organes qu'on ne peut perforer sans danger, on emploie des systèmes d'aiguilles dont les deux parties sont appliquées l'une contre l'autre, comme on le voit en *r* et *r'* (fig. 903), et soudées par l'une des extrémités sur une longueur de 2 ou 3^{mm}. Elles sont séparées partout ailleurs par une lame mince d'une substance non conductrice de l'électricité. L'aiguille forme alors une espèce de sonde, *r*, *r'*, à laquelle on donne une forme appropriée à la cavité que l'on veut explorer.

L'usage des aiguilles thermo-électriques exige quelques précautions : il faut les envelopper de laine pour éviter le refroidissement des parties de ces aiguilles qui sont exposées à l'air. Il faut aussi, pour que les résultats soient comparables, que la longueur totale des fils qui composent le circuit reste constante dans une même série d'expériences.

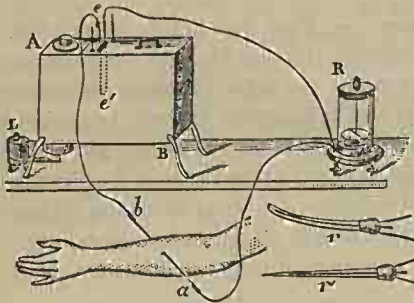


Fig. 903.

1262. Températures comparées dans un même individu.

— Il résulte des expériences de MM. Becquerel et Breschet que les muscles de l'homme présentent 1°,25 à 2°,25 de plus que le tissu

cellulaire sous-cutané. Les contractions des muscles élèvent leur température : si l'on plie plusieurs fois de suite l'avant-bras, pendant que la soudure de l'une des aiguilles se trouve plongée dans le muscle *biceps*, l'aiguille du rhéomètre indique un accroissement de température qui, au bout de 5 minutes, peut aller à 5°. L'agitation et tout ce qui détermine un afflux de sang élèvent la température. Au contraire, la compression d'une artère est suivie d'un refroidissement dans les muscles où elle se ramifie.

Le sang artériel est plus chaud que le sang veineux. M. Becquerel, en enfonçant des aiguilles en forme de sonde à pointe très-fine dans les vaisseaux, a trouvé, sur des chiens, une différence de 1°,01 en moyenne entre le sang artériel de l'aorte et le sang veineux de la *veine cave ascendante*, et cependant les poumons ne fonctionnaient que très-imparfaitement, la poitrine ayant été ouverte pour découvrir ces vaisseaux. A mesure qu'on s'éloigne du cœur, on trouve une diminution de quelques dixièmes de degré, tant dans les veines que dans les artères.

L'état de fièvre, chez l'homme, est accompagné d'une élévation de température qui peut aller à 3°. L'état de paralysie d'un membre ne paraît pas en modifier la température.

Influence de la température ambiante. — La température de l'homme, observée dans les muscles, est de 37° environ; elle ne varie guère que de 1° d'un individu à un autre. C'est ce qui résulte d'observations faites dans toutes les parties du monde par J. Davy, qui a constaté aussi que la température d'un même individu peut s'élever de 1° quand il se transporte dans des pays où la température est supérieure à celle de son corps. Cet effet paraît plus sensible chez les Européens que chez les habitants des pays chauds; des enfants nés à Colombo ont donné à J. Davy 38°,9, tandis que des Hottentots ne donnaient que 35°,8.

Franklin a expliqué la résistance à l'échauffement des animaux à sang chaud, par le froid que produit l'évaporation qui se fait à la surface de leur peau; et nous avons vu (1135) comment des observateurs ont pu séjourner pendant 10 à 15 minutes dans des étuves bien desséchées à température élevée. Dobson a pu supporter ainsi 99°, Berger 109°, Blagden 127°,6, Tillot et Duhamel 128°,7, Le pouls battait alors 164 fois par minute, au lieu de 60, et la température du corps s'élevait de 4° ou 5°. Un pareil excès ne peut être supporté que pendant peu de temps, car des animaux soumis aux mêmes expériences périrent dès que leur température eut dépassé notablement celle qu'ils possédaient habituellement. Si l'air est humide, la mort arrive très-promptement, comme l'a vu Delaroche sur des animaux renfermés dans des étuves saturées d'humidité, quoique la température de l'étuve dépassât très-peu celle de leur corps.

Du reste, la résistance à l'échauffement n'est peut-être pas aussi prononcée qu'on le croit; car, dans certaines expériences, la température du corps s'est élevée de quelques degrés, quoiqu'on n'eût pas suffisamment attendu pour qu'une aussi grande masse se mit en équilibre avec la température ambiante. La résistance au refroidissement est plus marquée; ce qui s'explique facilement, le corps renfermant une source permanente de chaleur. Cependant, on ne peut résister aux froids intenses des régions polaires, qu'en augmentant la chaleur des muscles au moyen d'un exercice violent. Si l'on reste immobile, l'équilibre tend à s'établir, et un engourdissement suivi de torpeur amène insensiblement la mort, surtout chez les enfants et les vieillards.

1263. Température des divers animaux. — Voici quelques résultats généraux trouvés par J. Davy. La température des mammifères est comprise entre 37° et 40°. Le pangolin a donné cependant 26°,7 seulement, l'air étant à 27°. Les oiseaux, dont le système respiratoire est si développé, ont donné des températures généralement comprises entre 38° et 43°,9.

Il y a des animaux à sang chaud dont la température ne peut se maintenir qu'à 12° à 15° au-dessus de celle de l'air; pendant l'hiver, cette température s'abaisse notablement: ils tombent dans l'engourdissement, et restent dans un état de sommeil léthargique. On les nomme *animaux hibernants*: ils forment

en quelque sorte le passage des animaux à sang chaud aux animaux à sang froid. Les mammifères et les oiseaux très-jeunes ne produisent aussi que peu de chaleur, et se refroidissent facilement; c'est pourquoi, quand ils sont privés des soins de leur mère, qui les réchauffe, ils ne tardent pas à périr, à moins que la température de l'air ne reste assez élevée pendant la nuit.

Chez les animaux à sang froid, la température n'est plus constante : elle dépend de celle du milieu ambiant. Les reptiles donnent le plus souvent quelques degrés de plus que l'air, et les poissons 1° de plus que l'eau qui les environne. Comme exception, nous citerons la bonite, dont la température, dans les muscles profonds, a été trouvée de 37°,2, l'eau de la mer n'étant qu'à 27°,2.

On a fait peu d'observations sur les mollusques et les crustacés. L'huître, l'écrevisse et le crabe ont donné à J. Davy la même température que l'eau. Mais les insectes dégagent assez de chaleur pour se maintenir souvent au-dessus de

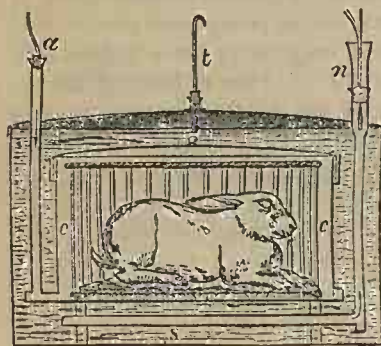


Fig. 904.

la température extérieure. Les essais d'abeilles peuvent faire monter le thermomètre à 49°, et cet instrument s'est quelquefois élevé à 36° dans des ruches, l'air extérieur étant très-froid. J. Davy a trouvé 22°,5 sur un grillon, l'air n'étant qu'à 16°,7. Le sphynx du caille-lait est souvent chaud à la main; Dugès a trouvé sa température à 36°, pendant que l'air était à 28°. Nous avons dit (841) par quel moyen Melloni a pu reconnaître que les insectes dégagent de la chaleur.

1264. Mesure de la chaleur animale. —

Les travaux entrepris pour évaluer la quantité de chaleur dégagée par les animaux ont toujours eu pour objet principal de la comparer à la quantité d'oxygène absorbée dans la respiration, afin de rechercher l'origine de la chaleur animale.

C'est à Lavoisier et Laplace que sont dues les premières expériences sur ce sujet. Ils se servaient de leur calorimètre de glace, dans lequel ils plaçaient une boîte métallique contenant l'animal soumis à l'expérience. De l'air à 0° arrivait continuellement dans la boîte, et les gaz provenant de la respiration étaient recueillis pour être analysés. — Crawford et Black ont fait des expériences analogues, mais elles sont regardées comme peu précises.

Despretz, en 1822, et Dulong, vers la même époque, ont mesuré la chaleur dégagée par différents animaux, au moyen d'appareils à peu près identiques. La figure 903 représente le calorimètre de Dulong¹. L'animal est renfermé dans une caisse de cuivre plongée dans l'eau d'un calorimètre et fermée par

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. I, p. 440.

un couvercle dont les bords rabattus s'enfoncent dans une rigole pleine de mercure. Des baguettes d'osier empêchent qu'il n'y ait contact entre les parois de cette caisse et le corps de l'animal. L'air entre dans la caisse par le tube *a*; il est chassé d'un gazomètre fixe, par de l'eau qu'on fait arriver avec une vitesse constante dans la cuve qui le contient. Les produits de la respiration s'échappent par le tube *n*, après avoir parcouru le serpentin horizontal *s*. Ils sont reçus dans un autre gazomètre fixe, dans lequel le niveau de l'eau baisse uniformément, cette eau s'écoulant par un siphon à flotteur. Un disque de liège, garni sur son contour d'un taffetas imperméable très-flexible, sert à préserver les gaz du contact de l'eau. Les expériences ont été faites sur divers animaux : chiens, chats, cabiais, lapins, pigeons, crécerelle.

Dans l'appareil de Despretz¹, l'air était fourni par un gazomètre gradué, et les gaz modifiés par la respiration, sortaient par un tube ou serpentin qui les conduisait dans un second gazomètre, dans lequel était un flotteur en fer-blanc. Plus tard, Despretz a recueilli ces gaz sur le mercure. Les expériences ont été faites sur des lapins, cochons d'Inde, chiens, chats, pigeons, canards, grand-duc, chouettes, pies, poules, goëlands, buses.

Depuis ces remarquables expériences, MM. Regnault et Reiset ont repris le même sujet en suivant une marche différente². L'animal est renfermé dans une grande cloche de verre, dans laquelle on fait arriver de l'oxygène, de manière à y maintenir l'air à son état normal. Aucun gaz ne sort de la cloche, et l'acide carbonique formé est absorbé par une dissolution de potasse. A la fin de l'expérience, on analysait le gaz contenu dans la cloche, et l'on dosait l'acide carbonique absorbé par la potasse.

1265. Origine de la chaleur animale. — On entrevoit tout d'abord que la chaleur animale est due aux actions chimiques très-nombreuses qui se produisent pendant la vie. Longtemps, on a admis que les poumons étaient le foyer unique où la chaleur se produisait tout entière par l'acte de la respiration, le sang étant ensuite chargé de la transporter dans toutes les parties du corps.

Les anciens philosophes considéraient la respiration comme destinée seulement à rafraîchir le sang par une sorte de ventilation. Crawford paraît avoir admis le premier, en s'appuyant sur la théorie du phlogistique, que cette fonction est la cause de la chaleur animale; mais ce n'est qu'après que Lavoisier eut expliqué la combustion qu'on put se faire des idées nettes à ce sujet. Cet illustre chimiste établit alors une théorie de la calorification qui a pendant longtemps réuni tous les suffrages. Dans cette théorie, on suppose que l'oxygène de l'air se combine dans les poumons avec le carbone et l'hydrogène du sang. Lavoisier et Laplace avaient, en effet, trouvé que la chaleur dégagée dans la formation de l'acide carbonique exhalé était à peu près égale à celle que fournit l'animal. Mais l'acide carbonique avait été donné par un animal, et la chaleur dégagée,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXVI, p. 337.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVI, p. 505.

par un autre. Despretz et Dulong, chacun de leur côté, avaient trouvé que la chaleur produite par la formation de l'acide carbonique, jointe à celle que le reste d'oxygène employé eût dégagée en se combinant avec de l'hydrogène, ne représentait que 75 à 90 pour cent de la chaleur animale. Mais, en calculant les résultats au moyen du pouvoir calorifique plus exact de l'hydrogène, trouvé depuis par Dulong, on reconnaît que la chaleur fournie par la combinaison de l'oxygène *dépasse notablement* la quantité de chaleur dégagée par l'animal.

Done, loin d'admettre un pouvoir calorifique occulte venant ajouter ses effets à ceux de la respiration, il faut chercher à expliquer ce que devient l'excès de chaleur qui n'est pas communiqué au calorimètre. M. Dumas pense que, *pendant le repos*, la quantité de chaleur que l'animal perd au dehors est moindre que celle qu'il produit; l'excès se dissimule, reste à l'état latent, pour se manifester pendant le travail musculaire. De sorte que, dans l'état de mouvement, la quantité de chaleur qui se répand au dehors est plus grande que celle que produit la respiration, quoique celle-ci devienne momentanément plus active, ainsi que la circulation.

Nouvelle explication de la chaleur animale. — La théorie précédente a été profondément modifiée. On n'admet plus qu'il se fait une combustion dans les poumons; on a reconnu qu'il y a simplement échange de gaz à travers les parois des cellules pulmonaires, suivant le mode que nous avons expliqué précédemment (I, 460). Cet échange se fait très-rapidement, parce que les membranes que les gaz doivent traverser sont excessivement minces et présentent une grande étendue, car, chez l'homme, la surface totale des cellules pulmonaires est égale à 30 fois environ la surface extérieure du corps. Pour établir cette théorie, qui a été développée principalement par le Dr Edwards, on prouve d'abord que l'acide carbonique existe tout formé dans le sang veineux. En effet, on peut l'en extraire facilement; et, de plus, les animaux qui peuvent vivre quelque temps dans l'azote ou l'hydrogène exhalent autant d'acide carbonique que s'ils respiraient dans l'air. En partant de là, Desgranges a fait voir que c'est dans les dernières ramifications des vaisseaux sanguins que l'oxygène dissous dans le sang artériel agit chimiquement; le sang veineux est chargé de transporter les fluides qui doivent être exhalés, dans les poumons, où ils sont rejetés au dehors, pour être remplacés par l'oxygène, qui pénètre dans le sang et le régénère; et, en effet, Magnus a trouvé de l'oxygène dans le sang artériel, en même temps que de l'acide carbonique dans le sang veineux. La chaleur animale prend donc naissance dans toutes les parties du corps; mais elle est toujours en rapport avec la quantité d'oxygène absorbée dans les organes respiratoires, puisque c'est, en définitive, cet oxygène qui produit des actions chimiques partout où le sang circule.

Maintenant, en quoi consistent ces actions chimiques? Il est beaucoup plus difficile de répondre à cette question qu'on ne l'avait cru d'abord. En effet, suivant la remarque de M. Regnault, le phénomène est très-complexe: les substances que contient le sang veineux, et qui doivent se combiner avec l'oxy-

gène dans les vaisseaux capillaires qui pénètrent dans la profondeur des organes, proviennent des aliments transformés dans l'acte de la digestion. Ces substances sont formées, en général, de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène. Quand certains de ces éléments se combinent avec l'oxygène, la chaleur est bien différente de celle qui se dégagerait dans la combinaison du carbone et de l'hydrogène libres. De plus, ces substances ne sont pas toutes brûlées; une partie se transforme en d'autres produits : les uns destinés à constituer les matériaux du corps, les autres destinés à fournir aux sécrétions de divers organes, ou à être rejetés au dehors sous différentes formes. Toutes ces réactions sont accompagnées d'absorption ou de dégagement de chaleur, et il est facile de concevoir que le résultat final soit une quantité de chaleur supérieure à celle que l'oxygène absorbé dégagerait en brûlant du carbone et de l'hydrogène supposés libres. D'après les expériences de MM. Regnault et Reiset, il y a d'autant plus d'oxygène transformé en acide carbonique, que le régime de l'animal est plus exclusivement végétal.

Dans tous les cas, la quantité de chaleur dégagée par un animal croît avec la quantité d'oxygène absorbée. Legallois, ayant plongé des animaux dans des atmosphères artificielles renfermant proportionnellement moins d'oxygène que l'air, a toujours vu ces animaux se refroidir notablement, et d'autant plus qu'ils absorbaient moins d'oxygène. Il résulte des expériences de MM. Regnault et Reiset que les animaux les plus petits absorbent, à poids égal, plus d'oxygène que les plus gros appartenant à la même classe. Par exemple, le moineau et le verdier en absorbent 10 fois plus que la poule. Or les causes de refroidissement agissent bien plus efficacement sur les animaux qui présentent le moins de masse. Les insectes consoiment, à poids égal, autant d'oxygène que les mammifères de petite taille, comme le chien, le lapin... Si leur température ne s'élève pas notablement au-dessus de celle de l'air, cela tient au refroidissement rapide qui résulte de leur très-faible masse.

Nous devons ajouter que les actions chimiques qui donnent naissance à la chaleur animale n'ont lieu que sous l'influence du système nerveux. Ce n'est donc pas sans motif qu'on a pu dire que la calorificité dépend de l'influence nerveuse; mais il faut bien remarquer qu'elle n'agit qu'en provoquant les actions chimiques, sans lesquelles il n'y aurait pas de chaleur produite. Les expériences faites par M. Brodie et par M. Chossat¹ sur des animaux décapités chez lesquels on produisait une respiration artificielle au moyen de l'insufflation, et qui se refroidissaient plus vite que lorsqu'on abandonnait le cadavre à lui-même, ne sont pas concluantes; car il ne suffit pas que l'air pénètre dans les poumons pour qu'il y ait respiration : il faut encore que le gaz introduit éprouve les altérations qui accompagnent cette fonction. Or, dans ces expériences, les gaz rejetés n'ont pas été examinés.

1266. CHALEUR DÉGAGÉE PAR LES VÉGÉTAUX. — Les végétaux étant le siège

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XV, p. 37.

de phénomènes chimiques compliqués, on est porté à penser qu'ils sont capables de produire de la chaleur. Il y a certains cas où le dégagement de chaleur est assez prononcé pour être sensible au thermomètre à mercure. Par exemple, la température du spathe de l'*arum vulgare*, à une certaine époque de sa floraison, peut dépasser de 7° celle de l'air. Ce phénomène, qui a lieu de trois heures à sept heures du soir, atteint son maximum à 5 heures. Chez l'*arum cordifolium* de l'île de France, la température peut s'élever à 49°, celle de l'air n'étant que de 19°. Saussure a reconnu un excès d'une fraction de degré au-dessus de l'air ambiant dans certaines fleurs, à l'époque de la fécondation. Mais ce sont là des cas particuliers.

Ce n'est que depuis l'invention des appareils thermo-électriques qu'on a pu étudier le phénomène dans son ensemble. On se sert, dans ce cas, d'aiguilles formées de cuivre et d'acier, recouvertes de vernis pour les empêcher d'être altérées par les sucs de la plante, et disposées comme celles que nous avons décrites plus haut (1261). Pour se mettre à l'abri de l'influence refroidissante de l'évaporation, on enfonce l'aiguille dont la température doit rester constante, dans un tronçon de branche de même espèce et de même grosseur que celle que l'on veut explorer.

M. Dutrochet a trouvé, par cette méthode, un faible excès de température sur l'air ambiant, dans les jeunes tiges, les feuilles des plantes grasses, les racines, les fruits, les fleurs en bouton, celles-ci n'indiquant d'élévation de température que lorsque la soudure est enfoncée dans l'ovaire. Du reste, cet excès est toujours très-petit, au plus de 0°,5, et d'autant plus marqué qu'il fait plus chaud ; et ne se manifeste que sous l'influence de la lumière, excepté dans les fleurs et les boutons. C'est, en effet, sous l'influence de la lumière que les parties vertes des plantes sont le siège des phénomènes chimiques particuliers qui constituent la respiration des végétaux.

§ 3. — CHALEUR PRODUITE PAR LES ACTIONS MÉCANIQUES

1267. Les moyens artificiels de produire de la chaleur, ceux que l'homme a dû découvrir pour suppléer aux sources naturelles, qui ne peuvent ordinairement fournir par elles-mêmes les hautes températures nécessaires à l'industrie et aux usages domestiques, sont, en-dehors de l'électricité, les *actions mécaniques* et les *actions chimiques*, au moyen desquelles on peut rendre les corps *incandescents*, c'est-à-dire les porter à une température assez élevée pour qu'ils rayonnent de la lumière en même temps que de la chaleur. Le plus souvent, c'est aux actions mécaniques que l'on a recours pour *allumer* les corps combustibles, dont l'action chimique entretient ensuite la haute température. Les peuples primitifs avaient beaucoup de peine à se procurer la parcelle incandescente destinée à allumer *le feu* du foyer. De là, vraisemblablement, l'institution des vestales chargées d'entretenir le feu sacré, dont on rencontre des traces chez

presque tous les peuples de l'antiquité, que les Espagnols ont retrouvée chez les Incas du Pérou, et dont la lampe du sanctuaire de nos églises semble être une réminiscence.

Nous allons nous occuper d'abord des moyens mécaniques de produire de la chaleur.

I. Solides et liquides.

1268. FROTTEMENT. — Les sources mécaniques de chaleur sont : le *frottement*, la *compression*, et toutes les opérations par lesquelles on déforme les corps solides. Occupons-nous d'abord du frottement.

Quand on presse deux corps solides l'un contre l'autre, les aspérités dont sont recouvertes les surfaces en contact, quelque polies qu'elles soient, s'engagent les unes dans les autres ; d'où résulte une résistance au glissement d'autant plus grande que les aspérités sont plus prononcées et la pression plus forte. Pour que le glissement ait lieu, il faut que les parties engagées les unes dans les autres se séparent, ce qui ne peut avoir lieu sans un ébranlement des couches superficielles, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. Par exemple, on chauffe ses mains en les frottant l'une contre l'autre. Si l'on frotte avec force deux morceaux de bois l'un sur l'autre, si l'on fait tourner rapidement avec un archet un fuseau de bois dont on appuie la pointe sur une planche, il se dégage une épaisse fumée. Les sauvages parviennent à allumer du feu en faisant tourner entre leurs mains une baguette de bois dur, dont ils enfoncent l'extrémité taillée en pointe dans une cavité d'un morceau de bois d'une autre espèce. Sénèque rapporte que les bergers de son temps obtenaient du feu par le même procédé, et il ajoute qu'il faut, pour réussir, employer des bois d'espèce particulière, comme le laurier et le lierre. C'est par le frottement qu'on obtient ces filets bruns que l'on voit sur certains objets travaillés au tour : on appuie fortement l'angle d'un fragment de bois sur la pièce tournant rapidement, et le bois fume et se charbonne le long de la circonférence frottée.

Un bouton de métal enchâssé dans du liège devient brûlant quand on le frotte vivement sur du bois. La scie s'échauffe par le frottement, ainsi que les faces de la section du bois qu'elle divise. — Les tourillons des machines, les essieux des voitures deviennent brûlants quand on néglige de les graisser ; et l'on voit quelquefois le moyeu des roues prendre feu quand le mouvement est rapide et prolongé. — On fait des *briquets phosphoriques* consistant simplement en un tube de plomb ou de verre au fond duquel on a mis un peu de phosphore, dont on arrache quelques parcelles avec le bout d'une allumette soufrée ; si on la frotte ensuite sur du liège, le phosphore s'enflamme et met le feu au soufre de l'allumette.

Briquet à pierre. — Les étincelles que l'on fait jaillir en frappant tangentiellement une lame d'acier contre le tranchant d'un silex, sont dues à la chaleur dégagée par le frottement énergique produit par ce moyen. Le silex arrache des

parcelles d'acier, qui sont assez échauffées pour s'enflammer et brûler au contact de l'air, et, en tombant sur de l'amadou, de la poudre, y mettre le feu. Si l'on bat le briquet au-dessus d'une feuille de papier, on y distingue, au microscope, diverses sortes de parcelles : les unes sont de petits fragments anguleux de silex; les autres, des grains de limaille d'acier qui n'ont pas été brûlés et conservent leur forme irrégulière; d'autres, noires, de forme sphérique, se sont oxydées aux dépens de l'oxygène de l'air, et ont été fondues. Du reste, la fusion n'est pas due seulement au frottement, mais encore à la combustion par l'air. En effet, Hawksbée a montré que, dans le vide, les parcelles sphériques ne se produisent plus. Hook paraît avoir, le premier, examiné les parcelles qui se détachent du briquet, et les explications qui précèdent sont dues à Réaumur. Toute matière capable d'entamer l'acier peut remplacer le silex; comme la porcelaine, certaines poteries, la *pyrite de fer*, que les Romains portaient en campagne pour se procurer du feu, d'où le nom de *pyrite*. Dire qu'une substance fait feu au briquet, c'est donc dire qu'elle est très-dure (I, 539).

On explique de la même manière que pour le briquet, les étincelles qui jaillissent

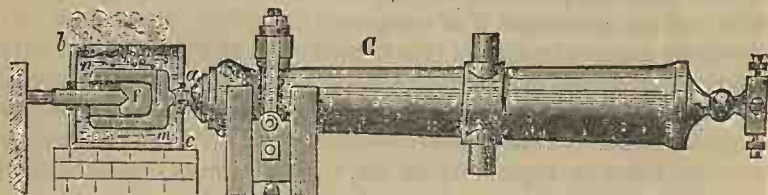


Fig. 905.

du fer des chevaux sur le pavé, celles qui s'échappent des outils que l'on aiguisé sur la meule sèche. L'acier s'y échauffe et prend une teinte bleue qui atteste qu'il est recuit par la chaleur dégagée. On peut ainsi faire rougir des lames d'acier, l'angle d'un fragment de verre. Avant l'invention de la *lampe de sûreté* des mineurs, on éclairait les galeries de mines au moyen d'une roue d'acier tournant vivement, sur laquelle s'appuyait un silex, d'où s'élançait une gerbe d'étincelles assez brillantes, mais incapables d'enflammer les gaz explosifs.

La lime s'échauffe sur le fer, ainsi que la limaille qui s'en détache. Avec un alliage d'antimoine et de fer, chaque parcelle enlevée s'enflamme à l'air, et chaque coup de lime fait jaillir une gerbe d'étincelles. Dans cette expérience, comme dans celle du briquet, il y a, outre le frottement, des compressions, des chocs auxquels est due une partie de la chaleur dégagée.

1269. Quantité de chaleur produite par le frottement. — On peut, par le frottement, dégager indéfiniment de la chaleur et en quantité considérable. Davy, ayant frotté deux morceaux de glace l'un contre l'autre dans un lieu dont la température était au-dessous de 0°, parvint à les faire fondre. La quantité de chaleur dégagée était égale au poids de glace fondue multiplié par

80, et l'on aurait pu la mesurer, si aucune portion de chaleur ne s'était perdue au dehors. Comme la chaleur spécifique de l'eau est 2 fois plus grande que celle de la glace, on ne peut expliquer ce résultat par une diminution de capacité calorifique.

Rumfort disposa une pièce de canon de six, telle qu'elle est en sortant du moule, C (fig. 905), sur la machine destinée à la forer. Pendant que la pièce tournait sur elle-même, il détacha dans la masselotte qui la terminait un cylindre *nm*, qui n'adhérait au corps de la pièce que par un mince tourillon *a*, et dans lequel il fit creuser une cavité, au moyen d'un foret obtus *f* d'acier trempé, la pièce C faisant 32 tours par minute. Dans une expérience où le foret avait détaché, en une demi-heure, 45^{es} de parcelles de bronze, un thermomètre enfoncé aussitôt dans un trou pratiqué dans le fond *m* du cylindre *nm* marqua 54° c.; ce qui indiquait une très-grande quantité de chaleur, à cause de l'énorme masse de ce cylindre, qui pesait 54^{kil}. Une autre fois, Rumfort entourra le cylindre *nm* de 10 litres d'eau contenue dans une caisse *bc*, dont la tige du foret, ainsi que le tourillon *a*, traversaient les parois par des boîtes à cuirs. Au bout de 2 heures 30 minutes, l'eau entra en ébullition¹. — Rumfort constata que la limaille détachée avait la même chaleur spécifique que le bronze massif; on ne peut donc attribuer la chaleur dégagée à un changement de capacité pour la chaleur.

1270. Circonstances qui font varier la chaleur due au frottement.

— La quantité de chaleur dégagée dans le frottement dépend : 1° de la nature et de l'état des surfaces frottées; 2° de la pression; 3° enfin, de la vitesse. On doit à M. Haldot des expériences nombreuses sur ce sujet². Une plaque de laiton tournant sur elle-même était pressée contre une autre plaque de substance différente, par un ressort dont on pouvait faire varier la tension. Ces deux plaques étaient plongées dans l'eau. Quand la plaque mobile était polie, la chaleur dégagée était deux fois plus considérable que lorsqu'elle était dépolie, résultat auquel on ne se serait pas attendu, et qui s'explique par le travail dépensé pour arracher une partie des aspérités, travail qui se fait aux dépens d'une portion de la chaleur dégagée. Le zinc, le plomb, frottés sur du laiton, dégagèrent la plus grande quantité de chaleur, et l'étain, 0,78 de cette quantité.

On ne sait quelle est la part des deux corps en présence, dans le dégagement de la chaleur par le frottement. Ces corps prennent, de cette chaleur, une partie qui dépend de l'état de leur surface, de leur pouvoir absorbant, de leur conductibilité, de leur masse et de leur capacité calorifique. M. Becquerel ayant frotté l'une sur l'autre les surfaces identiques de deux plaques égales de même substance, et les ayant séparées vivement pour les appliquer chacune sur l'une des bases de la pile de Melloni (841), vit l'aiguille du rhéomètre rester en repos. Quand l'une des faces était moins polie que l'autre, le mouvement de l'aiguille

¹ *Essais philosophiques*, par B. comte de Rumfort, t. II, p. 495.

² *Journal de Nickolson*, t. XXVI, p. 30.

indiquait que la face polie s'était moins échauffée que l'autre. Dans une expérience faite avec deux disques de verre, celui qui était dépoli prit deux fois plus de chaleur que l'autre.

Un disque de satin blanc frotté sur un disque de satin noir s'échauffe plus que ce dernier. Le verre frotté sur le liège prend plus de chaleur que lui, dans le rapport de 34 à 5; si le verre est dépoli, le rapport est de 40 à 7. Avec l'argent et le liège, ce rapport est de 50 à 12; et avec le caoutchouc et le liège, de 29 à 11.

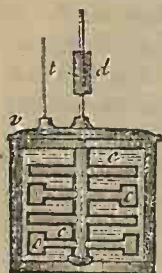


Fig. 906.

1271. Frottement des liquides. — Le frottement exercé par l'eau coulant le long d'un corps solide ne produit qu'une quantité insensible de chaleur, que le liquide emporte avec lui. M. Joule a pu cependant constater une élévation de température, en opérant sur une masse limitée de liquide, dans laquelle il faisait tourner 16 palettes, *oo* (fig. 906), qui passaient à travers un système de cloisons fixes *c, c*, supportées par un cadre métallique. Le tout était introduit dans un calorimètre, *vv*, contenant 6 à 7 kil. d'eau. M. Joule a pu obtenir ainsi une élévation de $0^{\circ},202$ avec l'eau, et de $2^{\circ},54$ avec le mercure ¹.

Au pied des cascades, on remarque quelquefois un échauffement sensible. Les voyageurs qui passent entre le rocher et l'immense nappe de la cataracte de Niagara, éprouvent une impression de chaleur. Les marins assurent que la mer fortement agitée est un peu plus chaude que lorsqu'elle est calme. Du reste, dans toutes ces circonstances, comme dans l'expérience de M. Joule, le choc concourt avec le frottement à produire la chaleur observée.

1272. Origine de la chaleur de frottement. — La quantité de chaleur

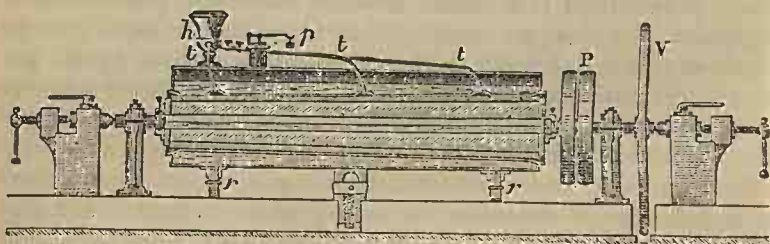


Fig. 907.

que l'on peut développer en frottant deux corps, est inépuisable. Il résulte des expériences de Rumfort et de Davy (1269), qu'on ne peut l'attribuer à une diminution dans la capacité calorifique, ni à une action chimique de l'air sur les corps frottés. En outre, Pictet a opéré sous le récipient de la machine pneuma-

¹ Trans. phil. (1850), p. 61, et Ann. de ch. et de physique, 3^e sér., t. XXXV, p. 421.

tique, au moyen de petits godets de métal contenant un thermomètre, et qu'un mouvement d'horlogerie faisait tourner rapidement pendant qu'ils étaient pressés par diverses substances. Il faut donc, avec Rumfort et Davy, attribuer la chaleur produite, à l'ébranlement moléculaire qui résulte du frottement. Ces faits, inexplicables dans le système de l'émission, sont faciles à concevoir dans celui des ondulations.

1273. Applications. — Rumfort avait conclu de ses expériences qu'on pourrait utiliser la chaleur développée par le frottement, pour faire cuire des aliments; mais il ajoute qu'il y aurait plus d'économie à produire cette chaleur, par la combustion des matières destinées à nourrir le cheval employé à mouvoir sa machine. Pictet fit remarquer qu'on pourrait le remplacer par le vent ou une chute d'eau. Cette idée a été appliquée en Amérique, où l'on a pu chauffer des poêles avec des plaques de fonte ou de fer, qui tournaient pressées l'une contre l'autre. Mais ces plaques s'usant rapidement, le procédé était très-dispendieux. Le chauffage par le frottement a été réalisé d'une manière très-heureuse par le moyen suivant.

Appareil thermogène. — Cet appareil, imaginé par MM. Beaumont et Mayer, est destiné à transformer de la force motrice en chaleur; c'est l'inverse de ce que fait la machine à vapeur. Une chaudière cylindrique en tôle, de 2^m de long, vue en coupe longitudinale (fig. 907), et en coupe transversale (fig. 908), est traversée par un tube de cuivre un peu conique, soudé par ses deux extrémités aux deux bases de la chaudière. Un tronc de cône en bois, entouré d'une tresse de chanvre, remplit complètement ce tube, et tourne sur lui-même, entraîné par une courroie sans fin qui embrasse la poulie P. Des pointes à vis, s'enfonçant dans les extrémités de l'arbre tournant, règlent la pression du cône sur la surface intérieure du tube de cuivre. De l'huile, venant d'un réservoir *h*, coule par les tubes *t, t, t*, et vient lubrifier continuellement les surfaces frottées. L'excès de ce liquide s'échappe par le tube *t'* (fig. 908). Une corde de Vera (I, 295) le reporte dans le vase *h*. L'huile empêche les surfaces frottées de s'user, et cependant la chaleur dégagée ne semble pas diminuée par sa présence.



Fig. 908.

Avec une vitesse de 400 tours par minute, il suffit de quelques heures pour porter à 130°, 400 litres d'eau, et produire de la vapeur ayant une tension de plus de 2,5 atmosphères. Cette vapeur est conduite par un tuyau dans les appareils que l'on veut chauffer. D'après les inventeurs, la vapeur produite est capable de fournir le travail d'un cheval, quand on dépense celui de deux chevaux pour faire mouvoir l'appareil. — Partout où le combustible est rare et la force motrice abondante, comme dans les pays de montagne, où les chutes d'eau sont nombreuses, cette machine peut rendre de grands services.

L'appareil (fig. 909) dû à M. Tyndall permet de réaliser en 12 ou 15 minutes l'ébullition de l'eau, contenue dans un tube de laiton *t* que l'on fait tourner

rapidement pendant qu'il est pressé dans une sorte de pince P. Bientôt la vapeur formée lance au loin un bouchon qui ferme le tube.

1274. CHALEUR DÉGAGÉE QUAND ON DÉFORME UN CORPS. — Quand on déforme les corps ductiles, on développe de la chaleur, et en quantité indéfinie, comme par le frottement. Par exemple, les corps deviennent brûlants quand ils subissent l'opération de la filière ou celle du laminoir. Quand une barre métallique est étirée par un poids capable de la rompre, il se forme un étranglement à l'endroit où doit se faire la rupture, et le métal y devient brûlant. — Si l'on plie une barre plusieurs fois de suite en sens contraires, elle s'échauffe fortement. La chaleur peut même se dégager quand la flexion ne dépasse pas la limite d'élasticité. En effet, M. Le Roux ayant serré une lame de bois dans un étau, et

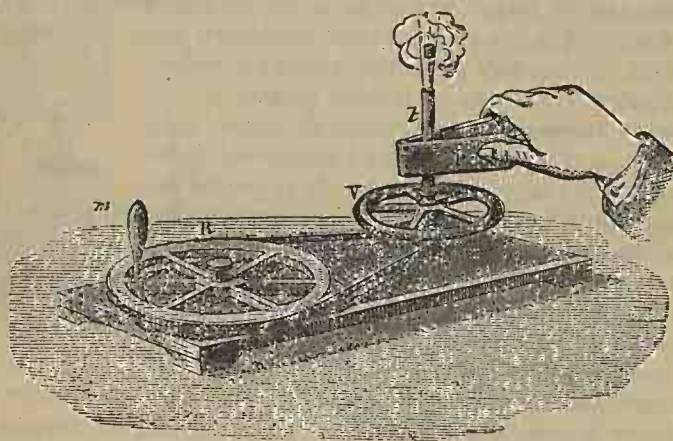


Fig. 909.

l'ayant fait vibrer au moyen d'une roue dont les dents frappaient son extrémité libre, la trouva brûlante au point où elle était serrée dans l'étau.

Choc, percussion. — C'est surtout par la percussion que l'on déforme facilement les corps. Si l'on frappe deux coups de marteau sur un clou posé sur une enclume, de manière à l'aplatir successivement dans deux sens opposés, il devient assez chaud pour enflammer de l'amadou. Les forgerons procèdent quelquefois ainsi pour allumer du feu. En battant à coups redoublés une baguette de fer ou d'acier, on parvient à la faire rougir; une barre de plomb soumise à la même épreuve finit par fondre et s'éparpiller en gouttelettes.

Un lourd projectile de fer lancé par le canon contre le flanc d'un navire cuirassé s'y enfonce et devient incandescent. Une balle de plomb sortant d'un fusil à tir rapide fond et jaillit en partie en gouttelettes au moment où elle frappe un corps dur. Certains de ces effets sont dus, en partie, au frottement énergique qui se

produit entre les molécules violemment déplacées les unes par rapport aux autres.

1275. CHALEUR DÉGAGÉE PAR LA COMPRESSION. — La compression dégage de la chaleur, mais en quantité limitée comme ses effets. On peut dire, en général, qu'on produit de la chaleur toutes les fois qu'on augmente la densité d'un corps; tandis que, si on la diminue, on produit du froid. Berthollet, Pictet et Biot, ayant comprimé brusquement sous un balancier à frapper les monnaies, des disques d'or, d'argent et de cuivre, disposés de manière à ne pouvoir s'étendre latéralement, obtinrent un échauffement prononcé. Pour évaluer l'élévation de température, qui fut la plus prononcée pour le cuivre et la plus faible, pour l'or, ils jetaient promptement dans l'eau le disque frappé, et appliquaient la méthode des mélanges (1066). Du reste, l'échauffement était d'autant plus faible que le disque avait reçu d'avance un plus grand nombre de coups de balancier. Ainsi, dans une expérience, un disque de cuivre s'échauffa de $11^{\circ},5$ au premier choc, de $2^{\circ},5$ au second, et de $0^{\circ},8$ seulement au troisième, après lequel il n'y eut plus d'échauffement sensible. Les premiers chocs avaient écrasé le disque et augmenté sa densité, tandis que la compression produite par les suivants n'était plus permanente, mais suivie d'un retour, par élasticité, au volume primitif, pendant lequel la chaleur dégagée au premier moment était absorbée. L'échauffement total des disques s'est toujours trouvé proportionnel à l'accroissement de la densité.

Compression des liquides. — La compressibilité des liquides étant très-faible, et leur capacité calorifique très-grande, on ne pouvait guère espérer de pouvoir constater une élévation de température pendant leur compression. Cependant, MM. Colladon et Sturm ont obtenu des effets sensibles sur certains liquides². Un ballon de verre bb' (fig. 910), dont les parois avaient de 25 à 35^{mm} d'épaisseur, contenait un thermomètre de Breguet t . Le liquide remplissant le ballon bb' était fortement comprimé par un piston que l'on poussait dans le corps de pompe P , soit lentement au moyen d'un levier l faisant tourner un petit treuil, soit rapidement en frappant avec un marteau sur l'extrémité de la tige. La pression fut portée, par ces divers moyens, à 30 atmosphères. Quand le ballon bb' était rempli d'eau, l'aiguille du thermomètre éprouvait une déviation *negative*, comme s'il y avait eu abaissement de température; mais ce résultat était dû à l'inégale compression des deux métaux qui formaient l'hélice, le plus dilatable étant aussi le plus compressible (988). Avec l'alcool, la déviation fut moins prononcée, ce qui semble indiquer un effet calorifique. Les coups de



Fig. 910.

¹ Mémoires de la Société d'Arcueil, t. II, p. 440.

² Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. XXXVI, p. 225.

marteau paraissaient même produire une légère déviation positive. Enfin, avec l'éther sulfurique, le plus compressible des liquides, les chocs du marteau ont fait dévier l'aiguille de manière à indiquer une élévation de température de 4° à 6°.

D'autres expériences, qui ont conduit aux mêmes résultats, ont été faites en comprimant le liquide au moyen d'air comprimé à 40 atmosphères dans un ballon adapté au vase *bb'*. En ouvrant un robinet, cette pression se faisait sentir brusquement sur le liquide.

Nous verrons dans l'optique une méthode d'une délicatesse extrême, au moyen de laquelle on peut constater l'augmentation de température de l'eau, même sous des pressions très-modérées.

1276. Chaleur de capillarité. — On rattache ordinairement les phénomènes qui suivent à la chaleur dégagée par la compression des liquides. Pouillet a constaté par des expériences nombreuses qu'il y a de la chaleur dégagée au moment où un liquide mouille un corps solide¹. Pour rendre sensible cet effet, qui est peu prononcé, il faut réduire le corps en poudre fine et y plonger un petit thermomètre très-sensible. Ce thermomètre monte pendant deux à quatre minutes, puis redescend lentement jusqu'à la température ambiante. Pouillet a opéré sur le fer, le bismuth, l'antimoine...; les oxydes insolubles, comme la silice, l'alumine, la magnésie; les oxydes de zinc, de fer, d'étain, etc.; le verre, la brique, la porcelaine, l'argile. Les liquides employés étaient l'eau, l'huile, l'alcool, l'éther acétique et l'essence de térébenthine. Les variations de température ne sont que de 0°,2 à 0°,5, et semblent indépendantes de la nature des corps mis en présence.

Il y a encore dégagement de chaleur quand un corps solide d'origine organique absorbe un liquide. Dans les expériences de Pouillet, l'élévation de température a été de 2° à 10°, suivant les substances. Ce résultat ne peut être attribué à une action chimique, car l'eau, l'alcool et l'éther acétique produisent sensiblement le même effet, quand ils sont absorbés par le même corps. Parmi les substances essayées, nous citerons : le charbon, l'amidon, du bois, des écorces, des racines diverses, des graines réduites en farine ou simplement écrasées, la soie, la laine, l'éponge, les cheveux, la baleine, l'ivoire, la corne, les peaux, diverses membranes.

L'action calorifique s'arrête dès que le corps est mouillé ou imbibé. On peut l'attribuer à une condensation du liquide près de la surface solide qu'il mouille; mais il peut se faire aussi qu'une partie de l'effet soit dû au frottement des molécules liquides sur celles du solide, pendant que les premières se meuvent pour prendre leur position d'équilibre.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XX, p. 141.

II. Chaleur ou froid dans la compression ou la détente des gaz.

1277. Compression des gaz. — Nous avons eu plusieurs fois occasion de signaler le développement de la chaleur dans la compression des gaz. Par de fortes compressions, la température peut être portée jusqu'au rouge. L'abbé A. Ruffo, dès 1745, avait vu une cheville de bois fermant l'orifice d'une pompe à comprimer l'air dans le fusil à vent, se carboniser quand on poussait vivement le piston, et lancer des étincelles lorsqu'il était chassé par la pression de l'air. Cinquante ans plus tard, Mollet, professeur à Lyon, vit l'amadou prendre feu dans le conduit rétréci qui suit ordinairement les pompes à comprimer les gaz.

Briquet à air. — Le *briquet à air*, ou *briquet pneumatique* (fig. 911), attribué à Gay-Lussac, consiste en un tube de métal ou de verre épais, fermé à l'une de ses extrémités, et contenant un piston. Quand on enfonce brusquement ce piston, la chaleur développée est assez élevée pour enflammer l'amadou. Il faut retirer aussitôt l'amadou du tube, sans quoi il s'éteindrait. Autrefois, on le plaçait au fond du tube, qui pouvait se dévisser rapidement, ou dans une cavité pratiquée dans le corps d'un robinet que l'on faisait tourner de manière à amener l'amadou au dehors; aujourd'hui, on préfère fixer la matière inflammable dans une cavité ménagée à l'extrémité du piston, qu'on retire rapidement après l'avoir enfoncé. Pour qu'il y ait inflammation, il faut que l'air soit réduit au douzième de son volume, ce qui répond à une élévation de température de 490°; cependant, il suffit de 300° pour enflammer l'amadou. C'est qu'il y a beaucoup de chaleur enlevée par les parois de l'instrument, dont la masse est énorme par rapport à celle de l'air.

Quand le tube est rempli d'oxygène, d'air ou de chlore, on voit, dans l'obscurité, une vive lumière au moment où l'on enfonce brusquement le piston. On a cru d'abord que ces gaz avaient la propriété de devenir lumineux par la compression; mais Thénard a montré que la lueur produite est due à la combustion de la matière grasse qui recouvre les parois du tube, ou qui se trouve en suspension dans le gaz. Quand le piston n'est pas graissé et qu'on évite la présence de toute matière combustible, on ne voit plus de lumière. Il s'en produit, au contraire, une très-vive, comme l'a vu M. Tyndall, quand on mêle quelques traces de vapeur de sulfure de carbone à l'air intérieur.

Applications. — Un boulet de canon lancé avec force s'échauffe par la chaleur que dégage l'air qu'il comprime et refoule violemment devant lui. Le



Fig. 911.

frottement, auquel on l'attribue souvent, n'entre que pour une faible part dans ce résultat, dont les anciens avaient quelque idée. Aristote dit que les flèches s'échauffent en traversant l'air; et Ovide, que le plomb lancé par la fronde devient brûlant, *incandescit eundo*. Lucrèce va plus loin et prétend qu'une balle de plomb lancée, fond après un long parcours¹, ce qui, du reste, ne pourrait être réalisé avec les vitesses de jet que l'on pouvait obtenir alors.

Aérolithes, etc. — On explique par les principes précédents l'incandescence des *aérolithes*, masses solides qui tombent sur la terre en répandant un vif éclat, faisant souvent explosion pendant leur course, et laissant derrière elles une longue traînée phosphorescente, qui peut persister pendant plusieurs minutes. Ces masses, avant de tomber, faisaient partie d'un groupe immense de petits corps circulant autour du soleil, comme les planètes, et qui sont attirés par la terre quand ils s'en trouvent suffisamment rapprochés. Ils pénètrent alors dans notre atmosphère avec des vitesses qui, d'après M. Schiaparelli, peuvent atteindre 72 kilomètres par seconde. M. de Saint-Robert a calculé qu'une masse sphérique de 20^{cm} de diamètre, pesant 14^{kil} et arrivant avec cette vitesse, n'aurait plus, en pénétrant seulement jusqu'à la couche d'air où la pression est de 12^{mm}, que le cinquantième environ de sa vitesse première, et aurait développé plus de 9 millions de calories en refoulant l'air très-rare de ces régions élevées². Cette quantité de chaleur est capable de fondre et de volatiliser le corps, dont la vapeur produit alors, en se condensant ensuite derrière lui, la traînée phosphorescente. Les débris qui tombent à la surface du sol ne sont plus que de faibles restes de la masse arrivant de l'espace. Si cette masse n'est pas trop grande, elle est entièrement volatilisée dans l'air, et l'on a un *bolide*; si elle est plus petite encore et ne pénètre que très-peu dans l'atmosphère, on a une *étoile filante*. — L'atmosphère se comporte donc comme une sorte de bouclier garantissant la terre du bombardement de la multitude des petits corps qui peuplent l'espace, et dont elle nous débarrasse en les volatilisant, si ce n'est les plus gros, dont les masses sont cependant énormément réduites quand elles atteignent la surface de la terre.

1278. Froid dû à l'expansion des gaz. — La compression échauffant les gaz, on est porté à penser que leur expansion doit être accompagnée d'un refroidissement. C'est, en effet, ce qui a lieu : l'on place un thermomètre de Breguet (1006) sous le récipient de la machine pneumatique; dès qu'on raréfie l'air, on voit l'aiguille marcher du côté du froid. Elle revient ensuite à sa position première, quand on abandonne l'appareil à lui-même, l'équilibre de température avec les corps environnants se rétablissant. Si alors on laisse rentrer l'air sous le récipient, l'aiguille indique qu'il y a échauffement, l'air introduit le premier étant comprimé par celui qui entre ensuite.

Le froid produit par l'expansion des gaz explique les résultats suivants :

¹ *Plombæ vero — Glans etiam longo cursu volvendo liquescit* (Lucret., *De rerum Naturâ*, lib. vi).

² *L'Unité des forces physiques*, par le P. A. Secchi (1874), p. 59.

M. Triger, s'étant enfermé dans une caisse en fer destinée à soumettre les malades à l'influence de l'air comprimé, et la pression étant d'une atmosphère et demie environ, entendit une détonation violente, et se sentit saisi d'un froid glacial, au milieu d'une obscurité subite. Une glace servant à donner du jour dans la caisse s'était brisée; la détente du gaz avait occasionné le froid observé, et avait produit l'obscurité, en condensant l'humidité intérieure sous forme d'épais brouillard. Dans le sas des appareils employés à fonder les piles des ponts par l'air comprimé (I, 416), il se produit du froid quand on détermine la détente de l'air.

1279. Froid dans un jet de gaz. — Quand l'air se précipite dans un vase vide, un thermomètre contenu dans ce vase commence par baisser, et ne monte qu'un instant après. C'est que le gaz, en entrant dans le vase vide, se détend subitement; d'où résulte le froid observé d'abord. L'air introduit est ensuite comprimé par celui qui entre après lui, et il se dégage de la chaleur. Pour mettre ces résultats en évidence, on laisse rentrer de l'air par un orifice *a* (fig. 912), dans un récipient vide contenant des thermomètres *a*, *b*, *c*. Au premier moment, *a* ne varie pas, le gaz ne s'étant pas encore dilaté, *b* descend et *c* monte.



Fig. 912.

Quand on laisse échapper par un petit orifice, de l'air humide comprimé à 3 ou 4 atmosphères, le froid est tel que le jet dépose sur une boule de verre un petit amas



Fig. 913.

de glace provenant de la vapeur d'eau congelée. — Un phénomène semblable s'observe à la machine de Schemnitz, dans laquelle l'air supporte la pression d'une colonne d'eau de 80^m de hauteur (I, 413); lorsqu'on ouvre le robinet de sortie de l'air, il se produit un brouillard de neige, et le tube se couvre de glaçons.

Les jets de gaz comprimé et humide qui s'échappent par des fissures, d'excavations que l'on rencontre dans certaines mines de houille produisent le même effet. — C'est par le froid dû à son expansion, que l'acide carbonique se solidifie en sortant d'un récipient où il est comprimé à 40 ou 50 atmosphères (1166). — C'est encore par les mêmes principes qu'on explique comment on peut souffler à volonté le froid ou le chaud. Dans le premier cas, les lèvres serrées ne laissent qu'un étroit passage à l'air, qui est comprimé et se détend en sortant; dans le second, la bouche est largement ouverte et le gaz non comprimé sort à la température des poumons.

Quand la vapeur sort d'une chaudière à haute pression, elle se condense en

formant un brouillard épais, et elle se refroidit tellement qu'en y plongeant la main on éprouve une impression de fraîcheur. L'expérience se fait facilement avec une marmite de Papin (fig. 913). Si la pression de la vapeur ne dépassait pas celle de l'atmosphère, elle sortirait à la température de 100° environ, et l'on ne pourrait impunément y plonger la main.

1280. Égalité entre les effets de la détente et de la compression. —

L'élévation de température produite par une certaine augmentation de pression est égale à l'abaissement produit par une diminution de pression égale. Gay-Lussac a prouvé cette loi, au moyen de l'appareil (fig. 914) : deux ballons de même capacité sont réunis par un tube adapté à des robinets que portent des tubulures latérales. Deux autres tubulures laissent passer les tiges de thermomètres à air t , t , et portent un robinet par lequel on peut faire le vide ou introduire des gaz dans les ballons. L'un de ces ballons étant vide et l'autre plein de gaz, on ouvre les robinets de communication. Le thermomètre renfermé dans le ballon

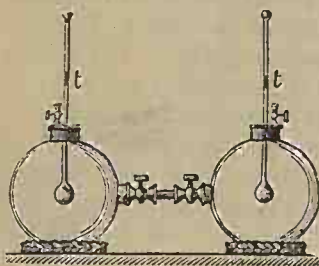


Fig. 914.

plein de gaz, baisse aussitôt; tandis que celui que renferme le ballon vide monte après avoir d'abord légèrement baissé (1279). Quand l'expérience est faite avec soin, les déplacements des index sont égaux sur les deux thermomètres, mais de sens contraire; ce qui indique que l'élévation de température dans l'un des ballons est égale à l'abaissement dans l'autre.

Pour prouver le même fait, M. Joule plonge dans l'eau deux récipients égaux de cuivre, dont un est vide et l'autre plein

d'air comprimé à 22 atmosphères; il fait communiquer entre eux ces deux récipients; la pression devient égale à 11 atmosphères dans chacun d'eux, et cependant l'eau dans laquelle ils sont plongés n'éprouve aucun changement de température. Il y a donc compensation entre l'échauffement produit dans un des récipients et le refroidissement produit dans l'autre.

1281. Évaluation de la chaleur dégagée par la compression. —

Pour évaluer l'élévation de température produite par une compression connue d'un gaz, Clément et Desormes ont employé un ballon B (fig. 915) de 28 litres de capacité, muni d'un robinet à large ouverture R, et communiquant avec un tube vertical h plongeant dans l'eau. On commence par raréfier un peu l'air du ballon, par le tube D; soit alors p sa pression. On ouvre le robinet R, l'air extérieur se précipite dans le ballon en comprimant le gaz intérieur qui s'échauffe, et le liquide descend dans le tube h presque instantanément au niveau extérieur. On ferme aussitôt le robinet R, le niveau remonte, le gaz se refroidissant et la pression devient p' , plus grande que p , à cause de l'air qui s'est introduit.

Pour calculer l'élévation de température x produite par l'entrée de l'air, désignons par H la pression, et par t la température de l'air extérieur, et

négligeons les variations de volume dues au déplacement du niveau h . La masse de gaz qui possédait la température $t + x$ avait une force élastique égale à H . Cette force élastique devient égale à p' , sans changement de volume, quand la température redevient t . On a donc (1024), en désignant par α le coefficient $\frac{1}{273}$, de dilatation de l'air,

$$\frac{H}{p'} = \frac{t + \alpha(t + x)}{t + \alpha t}, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{H - p'}{p'} \cdot \frac{t + \alpha t}{\alpha}.$$

L'air qui occupait dans le ballon le volume v sous la pression p a été comprimé par l'air introduit, de manière que son volume est devenu v' , sous la pression p' et à la même température. On a donc, d'après la loi de Mariotte,

$$v' : v = p : p',$$

d'où $\frac{v - v'}{v} = \frac{p' - p}{p'}$.

Le premier membre représente la diminution de l'unité de volume; on voit qu'elle est donnée en fonction des quantités observées p et p' .

On peut déduire de là l'élevation de température y produite par une condensation différente k ; car on a approximativement

$\frac{p' - p}{p'} : x = k : y$. Si l'on veut l'élevation de température pour une compression de $\frac{1}{273}$ du volume à 0° , ou de $\frac{1}{273 + t}$ du volume à t° (1023), il faudra remplacer k par cette quantité, et x par sa valeur. On a trouvé ainsi

$$y = \frac{H - p'}{p' - p} = 0^\circ,310.$$

Dans cette manière de procéder, il y a plusieurs causes d'erreur : une partie de la chaleur dégagée est enlevée immédiatement par les parois du ballon, quelque rapide que soit la rentrée de l'air; cet air, puisé dans l'atmosphère, est humide; la chaleur dégagée par l'observateur modifie aussi les résultats. Gay-Lussac et Welter ont évité en partie ces inconvénients, en renversant la marche de l'opération; au lieu de diminuer la pression dans le ballon et d'y laisser ensuite rentrer l'air, ils donnaient d'abord au gaz sec intérieur une

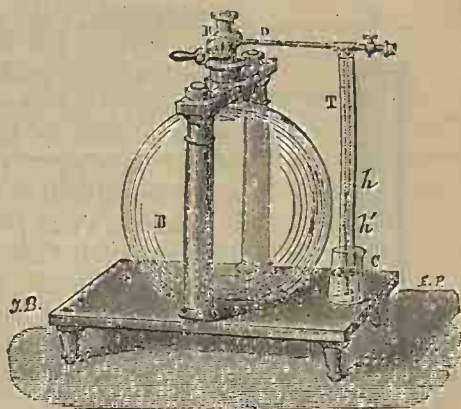


Fig. 915.

pression $p = H + h$, supérieure à celle, H , de l'atmosphère, et ouvraient ensuite le robinet jusqu'à ce que la pression fût redevenue égale à H , par suite de la sortie d'un peu de gaz et du refroidissement qui accompagne son expansion. Le robinet étant aussitôt fermé, la température reprenait sa première valeur, et la pression devenait $p' = H + h'$. Alors on avait, pour la variation de température x , en remplaçant p par $H + h'$,

$$x = \frac{H - p'}{p'} \frac{1 + \alpha t}{\alpha} = - \frac{h'}{H + h'} \frac{1 + \alpha t}{\alpha}.$$

Masson a fait un grand nombre d'expériences par cette méthode, sur l'air et divers autres gaz, dans un ballon à large ouverture, contenant 39 litres. La pression était donnée par la différence de niveau, mesurée au cathétomètre, d'une colonne d'acide sulfurique concentré, renfermée dans un tube en U dont une extrémité communiquait avec l'atmosphère et l'autre avec le ballon. Celui-ci était plongé dans une grande masse d'eau, de température constante. Comme il fallait plus d'une heure pour que le gaz reprit la température du bain après la sortie d'une partie de ce gaz, on vérifiait si la pression atmosphérique n'avait pas changé pendant l'expérience. Si elle avait varié, il suffisait de remplacer $H + h'$ par $H + h' \pm \pi$, π étant le changement de pression. — Masson a trouvé ainsi, pour l'air, l'hydrogène et l'acide carbonique, des nombres qui diffèrent peu de ceux que Dulong avait obtenus indirectement au moyen des tuyaux sonores (I, 689).

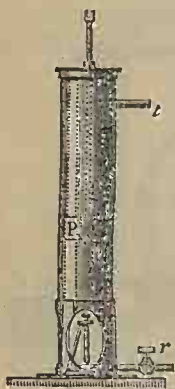


Fig. 916.

M. Kohlrausch, reprochant aux manomètres à liquide une inertie qui les empêcherait de suivre fidèlement les variations de la pression, a eu l'idée de les remplacer par un baromètre anéroïde placé sous le récipient, d'une machine pneumatique¹. La pression était d'abord diminuée par un coup de piston rapide, et le robinet aussitôt fermé. Le baromètre, qui avait baissé, ainsi que la température, remontait ensuite peu à peu à mesure que le gaz revenait à la température ambiante.

1282. Cas de grands changements de volume. — Les expériences qui précèdent n'ont été faites que sur des compressions et des dilatations peu prononcées. MM. Fabre et Silbermann ont opéré dans des limites plus étendues et au moyen d'un appareil qui leur a permis de mesurer immédiatement les températures². Cet appareil (fig. 916), consiste en un corps de pompe, portant au bas des fenêtres vitrées laissant voir un thermomètre de Breguet placé dans l'intérieur. Un piston P, mis en mouvement par un levier muni d'un paral-

¹ *Annales de Pogg.*, t. CXXXVI, et *Ann. de ch. et ph.*, 4^e s., t. XVII, p. 474.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXVII, p. 474.

légogramme de Watt (1202), sert à faire varier brusquement le volume du gaz qui remplit le corps de pompe. La course du piston est limitée par des chevilles qui arrêtent le levier dans ses mouvements. Les gaz sont introduits par le tube à robinet *r*, pendant que le piston est soulevé au-dessus du tube *t*. Si l'on enfonce ou si l'on retire brusquement ce piston, le thermomètre de Breguet indique les variations de température.

Voici le tableau des résultats obtenus. Le signe (—) correspond à la détente du gaz (D), et le signe (+) à la compression (C). Les nombres inscrits dans la quatrième colonne de chiffres ont été obtenus en ajoutant les résultats contenus dans les deux précédentes, et ceux de la cinquième, en ajoutant les résultats des trois premières. Des expériences de vérification ont prouvé que les températures ainsi calculées sont d'accord avec celles que l'on obtient directement.

GAZ	Entre atmosph. et $\frac{1}{2}$.	Entre $\frac{1}{2}$ at. et 1.	Entre 1 atm. et 2.	Entre $\frac{1}{2}$ at. et 2.	Entre $\frac{1}{4}$ at. et 2.	VARIATIONS DE TEMPÉRAT. pour $\frac{1}{273}$ entre			
						$\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ atm.	$\frac{1}{2}$ et 1 atm.	1 et 2 atm.	
II. Air.....	C	+ 5 ^o ,6	8 ^o ,8	13 ^o ,2	22 ^o ,0	27 ^o ,6	0,0204	0,0321	0,0482
	D	— 5,0	7,6	12,8	20,4	25,4	»	»	»
III. Oxygène.....	C	+ 5,6	9,3	13,2	22,5	28,1	0,0204	0,0339	0,0482
	D	— 4,7	7,6	13,2	20,8	25,5	»	»	»
I. Hydrogène.....	C	+ 9,7	13,8	18,5	32,3	42,0	0,0354	0,0504	0,0675
	D	— 5,0	8,5	13,7	22,2	27,2	»	»	»
VI. Acide carbonique	C	+ 4,7	7,3	11,3	18,6	23,3	0,0171	0,0267	0,0412
	D	— 4,7	7,3	11,3	18,6	23,3	»	»	»
IV. Oxyde de carbone	C	+ 5,6	8,6	12,6	21,2	26,8	0,0204	0,0314	0,0460
	D	— 5,0	7,3	12,6	19,9	24,8	»	»	»
V. Protoxyde d'azote	C	+ 4,7	6,6	11,0	17,6	22,3	0,0171	0,0241	0,0401
	D	— 4,8	6,6	11,3	17,9	22,7	»	»	»

L'abaissement de température que produit la dilatation semble généralement moindre que l'élevation due à la compression. Cela vient de ce qu'une partie de la chaleur dégagée par la compression est enlevée par les parois du corps de pompe, et une partie de l'effet de la raréfaction est compensée par la chaleur cédée par ces parois; or le piston, en se retirant, abandonne au contact du gaz une plus grande étendue de paroi. Remarquons que la différence entre les deux effets n'est pas la même pour tous les gaz; elle est la plus grande pour l'hydrogène. MM. Fabre et Silbermann attribuent ce résultat à la grande conductibilité de ce gaz (978), qui explique aussi pourquoi le thermomètre de Breguet atteint son maximum d'écart beaucoup plus promptement dans l'hydrogène que dans les autres gaz.

1283. Expériences de M. Regnault. — La détermination de la quantité

de chaleur dégagée par la compression d'un gaz, ou absorbée pendant sa détente, a acquis une grande importance depuis la découverte de l'équivalent mécanique de la chaleur. Aussi a-t-elle suscité de nombreuses recherches, faites à différents points de vue.

M. Regnault, entre autres, a poursuivi, pendant plus de vingt ans, sur ce sujet, des expériences dont nous allons nous occuper.

Il distingue d'abord deux sortes de détente : 1° la *détente simple* ou *détente statique*, dans laquelle le gaz en repos reprend cet état de repos, après s'être détendu dans un espace agrandi par un effort extérieur, comme dans les expériences de MM. Fabre et Silbermann (1282); 2° la *détente dynamique*, « lorsqu'un gaz en repos ou en mouvement se détend en traversant un orifice, et qu'il échappe ensuite aux appareils calorimétriques avec toute la vitesse acquise. » M. Regnault a d'abord considéré ce dernier cas, sur lequel nous reviendrons dans le chapitre suivant. Plus tard, il s'est occupé des effets de la détente statique. Après avoir étudié les causes d'erreur de la méthode de Clément et Desormes, dont les principales avaient été déjà signalées par Cazin, il a procédé en faisant varier le volume du gaz par le déplacement d'un piston¹. Ici encore, la science a à déplorer la perte des résultats de ses très-nombreuses expériences, les registres qui les contenaient ayant été détruits dans les circonstances funestes que nous avons relatées plus haut (1087). Nous croyons cependant qu'il est très-utile de connaître les appareils imaginés et employés par M. Regnault. Nous allons donc les décrire succinctement.

L'appareil destiné à appliquer la méthode de Clément et Desormes consistait en un réservoir cylindrique vertical de laiton, à parois épaisses, de 50 litres de capacité, entouré à distance d'un manchon dans lequel pouvait circuler de l'air, dont la température était donnée par plusieurs thermomètres. Le fond inférieur du réservoir portait deux tubulures, dont une communiquait avec un tube manométrique en U, contenant de l'huile d'amandes douces, et l'autre avec un appareil destiné à faire varier la pression. Le fond supérieur était recouvert d'une feuille de caoutchouc, et percé au centre d'une ouverture carrée de 5^{cm} de côté, que l'on pouvait fermer ou tenir ouverte au moyen d'un registre glissant sur le caoutchouc, et présentant aussi une ouverture de 5^{cm} de côté. Ce registre était déplacé rapidement par un ressort d'acier, et, quand les deux ouvertures coïncidaient, le gaz intérieur communiquait avec l'atmosphère pendant un temps dont on pouvait faire varier la durée, et qui était évalué au moyen d'un diapason traçant une ligne sinueuse (I, 627). Il fallait que ce temps fût assez grand pour que la pression intérieure atteignit celle de l'air extérieur, et c'était là un des points les plus délicats de la méthode.

Après de nombreuses expériences faites par compression et par détente, M. Regnault a conclu que la méthode de Clément et Desormes présente beaucoup d'incertitudes. Par exemple, si l'on emploie une ouverture trop grande,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIV, p. 342.

l'air qui se précipite peut, par vitesse acquise, produire une pression dépassant celle de l'atmosphère. De plus, il se forme des ondes condensantes et dilatantes, constatées également par Cazin, qui se réfléchissent sur les parois, et l'on ne sait si la fermeture du registre se fait sur une onde condensante ou dilatante. D'un autre côté, quand on opère par compression, la vitesse du gaz qui entre étant anéantie, il en résulte, comme nous le verrons, un dégagement de chaleur; et, quand on opère par détente, le gaz qui sort emporte un peu de chaleur à l'état de mouvement. — MM. Tresea et Laboulaye, dans un grand travail entrepris en vue de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur¹, ont cherché à faire disparaître cette dernière cause d'erreur, en opérant sur de grands volumes d'air, dans un réservoir de 3,000 litres de capacité, dont l'air, comprimé à plusieurs atmosphères, sortait par un orifice relativement étroit, de manière à rendre les effets de la vitesse insensibles.

M. Regnault a ensuite imaginé l'appareil suivant, qui paraît satisfaire à toutes les conditions désirables, et dont la figure 917 représente

une coupe de la partie principale : nPn' est un corps de pompe dans lequel peut s'enfoncer un piston métallique P, poussé par un très-fort ressort d'acier R. Ce piston refoule en dedans une poche de caoutchouc dont on a d'abord coiffé l'ouverture du corps de pompe, et qui, fixée en dehors par un anneau métallique mn' , se replie sur le bord aa' du corps de pompe, comme on le voit en $naPa'n'$. — Le corps de pompe est fixé par des boulons au fond d'un grand cylindre de cuivre à parois épaisses CD, dont la tige du piston traverse le couvercle par une boîte à étoupes e .

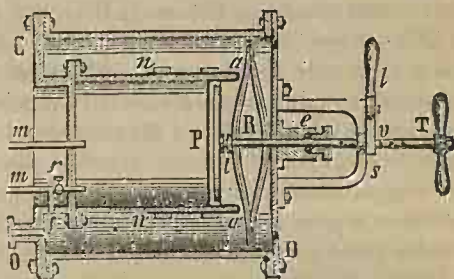


Fig. 917.

Pour faire une expérience, on commence par retirer le piston au moyen de la poignée T, et l'on abaisse le levier, ou *clef*, l , contre lequel vient butter une vis d'arrêt v enfoncée dans un des trous que porte la tige du piston. On fait ensuite passer dans tout l'appareil un courant d'air sec, qui entre par la tubulure O, communiquant avec le réservoir d'air comprimé déjà employé par M. Regnault dans des expériences antérieures (1175), passe dans le corps de pompe par le tube fr , et sort par le tube m . On ajuste ensuite aux tubes m, m' les deux branches d'un manomètre en U, et l'on porte l'air à la pression que l'on veut, pression qui est la même dans tout l'appareil, comme l'atteste le niveau égal dans les deux branches du manomètre. On ferme alors le robinet r , et, quand

¹ Mémoires des savants étrangers à l'Académie, t. XVIII (1868), p. 488.

L'équilibre de température est établi, on retire la clef *l*; le piston *P* est chassé rapidement par le ressort *R*, et il s'arrête, quand la vis *v* vient butter contre l'étrier *s*, au bout d'un temps très-court qui dépend de l'épaisseur de la clef et de la tension du ressort *R*. Cette tension peut être modifiée en agissant sur l'écrou *t*. On observe le manomètre; on attend ensuite qu'il ait repris son premier état, et l'on établit le calcul comme dans la méthode de Clément et Desormes, la température de l'appareil n'étant pas sensiblement modifiée par la chaleur que lui cède le gaz, sa masse étant considérable. M. Regnault a fait, avec cet appareil, plus de 600 déterminations, sous des pressions variant de 0^m,1 à 6^m de mercure, et dans des circonstances très-diverses. Malheureusement, la destruction de ses registres d'observation l'a empêché de calculer les résultats et d'en déduire les conclusions.

1284. Remarques. — Les expériences sur la chaleur dégagée par la compression des gaz ont été entreprises en vue de comparer leurs capacités calorifiques à *pression constante* et à *volume constant*; et c'est après la publication des résultats trouvés par Clément et Desormes, que l'on a cherché à expliquer la différence que l'on trouvait entre la vitesse réelle du son dans l'air et celle que donne la formule de Newton (I, 587). C'est aussi pour comparer les deux capacités qu'on s'est attaché à évaluer la quantité de chaleur dégagée par une réduction de volume égale à la dilatation pour 1°, et l'on admettait qu'elle était égale à la quantité de chaleur absorbée pour dilater le gaz, de $\frac{1}{273}$. Nous verrons, au chapitre suivant, qu'il n'en est pas ainsi, et qu'il n'y a qu'une différence à peine sensible entre les capacités à volume constant et à volume variable quand aucune cause étrangère n'intervient.

Dulong avait conclu de ses expériences, qu'une même compression produisait une même élévation de température, chez les gaz simples qui ont même capacité calorifique. Il admettait qu'il en devait être de même pour les gaz composés, et que les différences observées provenaient des inégalités entre leurs capacités; et il énonçait les lois suivantes : 1° des volumes égaux de tous les gaz pris à la même pression et à la même température, dégagent ou absorbent la même quantité de chaleur, quand ils sont comprimés ou dilatés d'une même fraction de leur volume; 2° les variations de température qui en résultent sont en raison inverse de leur chaleur spécifique à volume constant. — Mais il résulte du tableau précédent que, pour un même gaz, une même réduction de volume produit un échauffement différent, suivant la pression d'où l'on part. La seconde loi paraît donc difficile à accepter, à moins qu'on n'admette que la capacité d'un gaz diminue notablement quand sa pression augmente, ce qui est contraire à l'expérience.

1285. Chaleur produite dans la condensation des gaz par les solides. — Nous avons vu (I, 461) que les gaz se condensent à la surface des corps solides. Cette condensation est accompagnée, au moment où elle se produit, d'un dégagement de chaleur. Magnus a constaté la chaleur dégagée par la condensation de l'humidité de l'air sur les surfaces de toute nature, en chassant le gaz au moyen d'un soufflet sur une lame mince appliquée sur une des bases

de la pile thermo-électrique. Quand l'air lancé est plus humide que le milieu ambiant, il y a dégagement de chaleur, et quand il est plus sec il y a abaissement de température. Les effets sont assez prononcés pour être observés en soufflant l'air sur une des boules d'un thermomètre différentiel, ou même sur le réservoir d'un thermomètre à mercure très-sensible. Les vapeurs d'alcool, d'éther et d'autres liquides ont donné les mêmes résultats que la vapeur d'eau¹.

Le dégagement de chaleur est surtout très-prononcé quand l'étendue de la surface absorbante est très-grande par rapport à la masse du corps, comme dans les corps spongieux. Nous avons décrit (I, 171) le briquet à gaz hydrogène, dans lequel un jet de gaz s'enflamme après avoir fait rougir un fragment d'éponge de platine. Les poudres métalliques, comme le *noir de platine*, peuvent faire détoner un mélange explosif dans lequel on les projette.

M. Favre a fait de nombreuses expériences pour évaluer la quantité de chaleur dégagée dans l'absorption de divers gaz par le *charbon* et par le *noir de platine*².

La matière poreuse était introduite dans un réservoir allongé, de verre ou d'acier, surmonté d'un tube à robinet. On commençait par purger le corps poreux d'air et d'humidité en faisant le vide pendant que le réservoir était chauffé; on fermait le robinet et après refroidissement, on faisait communiquer le réservoir avec le tube qui amenait le gaz sec, dont on faisait passer un courant pour enlever l'air remplissant les tubes de communication. On introduisait ensuite le réservoir dans un des moufles d'un calorimètre à mercure, et après l'avoir réglé on laissait pénétrer le gaz dans le réservoir. L'absorption se faisait et la chaleur dégagée par l'absorption était indiquée par le calorimètre. Le gaz venait d'une longue éprouvette graduée placée sur le mercure, faisant fonction de gazomètre et communiquant avec un manomètre. La quantité de gaz absorbée était déduite, tantôt de son volume indiqué par le gazomètre, tantôt de l'augmentation de poids du réservoir. M. Favre a trouvé ainsi que 1^{er} d'hydrogène dégage 23109 calories pendant son absorption par le noir de platine, qui en prend 380 fois son volume; tandis que le charbon n'en absorbe que des quantités insignifiantes.

Des expériences faites sur diverses sortes de charbon (bourdaine, chêne, buis) ont donné les résultats suivants, qui varient un peu avec l'espèce de charbon, surtout les moins denses, à cause de la différence de grandeur des pores :

Noms des gaz.	Quantités absorbées par 1 ^{er} de charbon pesant 1 ^{er} ,57.	Quantités de chaleur pour 1 ^{er} de gaz condensé.
Ammoniaque.....	178 ^{cc}	494 ^{cal}
Acide chlorhydrique.....	166	274
Acide bromhydrique.....		491
Acide iodhydrique.....		173
Acide sulfureux.....	155	168
Protoxyde d'azote.....	99	169
Acide carbonique..	97	158

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. III, p. 270.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXXVII, p. 471, et 5^e série, t. I, p. 209.

Les nombres de la deuxième colonne sont notablement plus forts que ceux qu'avait trouvés De Saussure (461). L'ordre, comme l'a remarqué M. Dumas, est le même que celui des solubilités dans l'eau. Le chlore présente cependant une exception remarquable; M. Melsens, dans ses recherches sur la liquéfaction des gaz (1165) a vu des charbons bien purifiés absorber leur propre poids de chlore.

L'hydrogène, comme nous l'avons vu (I, 465) est absorbé par le palladium en masse. M. Favre, en opérant par absorptions successives, a reconnu que, tandis qu'avec le noir de platine, la quantité de chaleur dégagée par un même poids de gaz, va en diminuant à mesure qu'on approche de la saturation, avec le palladium cette quantité reste constante. Par exemple, dans la première opération, il s'est dégagé 8938 calories, et dans la dix-septième, 9167. On peut conclure de là que le palladium forme un alliage avec l'hydrogène, que ses propriétés chimiques tendent à faire considérer comme un métal, et que l'on désigne souvent, à ce point de vue, sous le nom d'*hydrogénium*.

Mitscherlich ¹, en calculant la pression que doit avoir l'acide carbonique condensé dans les pores du charbon, dont il avait évalué le volume (I, 214), a reconnu que cette pression était de beaucoup supérieure à celle qui est nécessaire pour liquéfier ce gaz; d'où il a conclu que les pores sont tapissés intérieurement d'acide carbonique liquéfié. M. Favre a confirmé cette manière de voir en comparant la chaleur d'absorption par le charbon, à la chaleur latente de liquéfaction du gaz. C'est ainsi qu'il a trouvé pour l'*acide sulfureux* et le *protoxyde d'azote*, les chaleurs d'absorption jusqu'à refus, 5267° et 3818°; et pour les chaleurs de liquéfaction 2822° et 2222°. Avec l'acide carbonique, la chaleur d'absorption a été 3467°, et la chaleur abandonnée pendant la solidification du gaz, 3128° seulement. On pourrait donc admettre que l'acide carbonique est solidifié dans les pores du charbon, et il resterait encore un excès de chaleur qui devrait être attribué à la compression du gaz non liquéfié, ou à quelque action particulière exercée par la surface solide sur le gaz.

§ 4. — SOURCES CHIMIQUES DE CHALEUR. — THERMOCHEMIE.

I. Chaleur dégagée dans les actions chimiques.

1286. Toutes les fois que deux corps se combinent, il y a dégagement de chaleur, à moins que, comme dans les mélanges réfrigérants, il n'y ait de la chaleur qui disparaisse, employée à produire la liquéfaction de quelques-uns des corps mis en présence. Par exemple, quand on mêle de l'acide sulfurique et de l'eau, ces deux liquides se combinent et deviennent brûlants. De l'eau versée peu à peu sur la baryte se combine avec elle et la rend incandescente. L'eau,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. VII, p. 18.

au contact de la chaux vive, dégage beaucoup de chaleur, capable d'enflammer de la poudre contenue dans un tube qu'on enfonce dans la masse échauffée. On peut, en versant l'eau peu à peu, enflammer de menus copeaux, ce que font souvent les chauxfourniers pour allumer leurs fours. — Si l'on mélange dans une fiole de verre, de la limaille de cuivre et du soufre en poudre, il n'y a pas d'action chimique à la température ordinaire; mais, si l'on fait chauffer le mélange, le soufre fond, et tout à coup la masse devient incandescente par la chaleur que dégage la combinaison qui s'effectue.

La chaleur produite dans les fermentations, comme celle de la vendange dans les cuves, du coton humide, du fourrage entassé avant d'être sec, et qui occasionne trop souvent des incendies, du fumier, dont la température peut atteindre 100°, est due aux actions chimiques, constituant la fermentation qui se produit entre les éléments de ces diverses matières.

Nous citerons enfin toutes les combustions.

1287. COMBUSTION. — On nomme *combustion* la combinaison d'un corps ou de ses éléments avec l'oxygène, quand cette combinaison est accompagnée d'un dégagement de chaleur allant jusqu'à l'incandescence, c'est-à-dire accompagné de lumière. Pour qu'une combustion se fasse dans l'oxygène ou dans l'air, il faut généralement *allumer* le corps qui doit *brûler*; ce qui se fait en portant un de ses points à une haute température. Sous l'influence de cette température, la combinaison commence; la chaleur qu'elle dégage se communique aux parties voisines, qui peuvent alors se combiner à leur tour avec l'oxygène, et ainsi de suite de proche en proche. C'est ainsi que le charbon, le bois, les corps gras des bougies ou des lampes, continuent de brûler quand on les a *allumés*.

C'est ordinairement par la combustion qu'on se procure la chaleur nécessaire aux usages industriels et domestiques. Ce phénomène, qui se reproduit chaque jour dans nos foyers, a été longtemps enveloppé d'une grande obscurité, et il en est peu qui soient restés aussi longtemps inexplicables. Les alchimistes attribuaient la combustion à une substance particulière qu'ils appelaient *le feu*, et qui avait la faculté de dévorer certains corps et de les transformer en sa propre substance. Cependant, Paracelse, au seizième siècle, avait reconnu le rôle de l'air: « Sans lui, disait-il, le bois ne brûlerait pas, et les êtres organisés mourraient. » En 1630, Jean Rey, médecin français, découvrit que le plomb et l'étain augmentent de poids pendant qu'on les calcine, et il eut l'idée heureuse d'attribuer ce résultat à une absorption d'air. Robert Hooke, en 1665, considérait la combustion comme la dissolution des corps par une matière contenue dans l'air, analogue à celle qui se dégage du salpêtre quand on le calcine. Adoptée dix ans plus tard par Mayow, cette théorie, si près de la vérité, fut ensuite abandonnée pour le système du *phlogistique*, proposé vers 1700 par Becher, et développé d'une manière si brillante par son disciple Stahl. Dans ce système, les corps combustibles étaient combinés avec une matière particulière nommée *phlogistique*, et la combustion consistait dans la séparation de cette matière d'avec le corps. En se dégageant, le phlogistique était dans un état particulier d'agitation

occasionnant la chaleur et la lumière, qui ne seraient ainsi que des manifestations du phlogistique. Newton ayant fait admettre plus tard que la lumière était une matière particulière, Macquer pensa que le phlogistique n'était autre chose que la lumière fixée dans les corps, et dont la chaleur n'était qu'une propriété. Cette manière de voir ne pouvait se concilier avec la découverte de la chaleur latente, qui existe aussi dans les corps non combustibles, comme l'eau. Les chimistes supposèrent alors que le *phlogistique* n'était autre que l'*éther* (812), et l'augmentation de poids que les corps reçoivent en brûlant s'expliquait en admettant que l'éther avait une pesanteur négative.

Priestley, ayant reconnu que l'air qui a servi à la combustion n'est plus propre à la produire, admit que le phlogistique se dégageant d'un corps qui brûle, se combinait avec l'air; et Crawford ajouta que, pendant cette combinaison, la chaleur et la lumière unies à l'air, en étaient chassées. Kirwan soutint que le phlogistique n'était autre chose que l'hydrogène, qui, contenu dans tous les corps combustibles, s'en dégagerait pendant la combustion pour se combiner avec l'oxygène de l'air. Enfin, Lavoisier prouva que la combustion consiste dans la combinaison avec l'oxygène du corps qui brûle, et il montra que, si l'on opère en vase clos, l'oxygène de l'air disparaît, et le poids du vase ne change pas.

On met en évidence le rôle de l'oxygène de l'air dans la combustion, de la manière suivante : on place une bougie allumée sous une cloche remplie d'air reposant sur le mercure; au bout de peu d'instants, la flamme pâlit, puis s'éteint quand presque tout l'oxygène a été absorbé. Des charbons ardents s'éteignent de même au bout de quelque temps. Si l'on fait le vide sous la cloche, la bougie ou les charbons s'éteignent aussitôt. — Quand un corps brûle dans l'atmosphère, l'air se renouvelle autour de ce corps, à cause de l'ascension des produits gazeux de la combustion, ou de l'air échauffé par le contact du corps. Si l'on produit un courant d'air par un tirage, comme dans les cheminées, ou en soufflant de l'air sur le combustible, on active la combustion, comme chacun le sait.

Dans l'oxygène pur, la combustion est beaucoup plus vive que dans l'air, qui contient 0,79 d'azote. Aussi, du charbon, du phosphore, du soufre allumés et portés dans un flacon plein d'oxygène, brûlent-ils avec une vivacité extrême. Une lame d'acier, plongée dans l'oxygène, après qu'on en a fait rougir l'extrémité, brûle avec un grand éclat en lançant de tous côtés des parcelles d'oxyde de fer, et la chaleur dégagée est telle que les gouttes d'oxyde peuvent s'incruster dans le fond du vase de verre, après avoir traversé une couche d'eau de plusieurs centimètres. — Certains composés contenant l'oxygène nécessaire à la combustion de leurs éléments peuvent brûler en vase clos. Tels sont la poudre à tirer et une foule de matières ou de mélanges explosifs, dont il suffit de porter un point à une haute température pour que toute la masse se transforme chimiquement, avec un grand dégagement de chaleur. Telles sont encore les *allumettes chimiques*, et les matières solides fulminantes, qu'il suffit d'échauffer par le frottement, ou de soumettre à un choc, pour que l'action chimique se produise instantanément.

1288. De l'origine de la chaleur dégagée. — Lavoisier attribuait la chaleur des combinaisons, au passage à l'état sensible, de la chaleur latente abandonnée par l'oxygène, en se condensant pour former une combinaison solide. Mais il y a des combinaisons qui sont gazeuses; l'explication de Lavoisier n'est donc pas satisfaisante. C'est là ce qui a d'abord empêché d'adopter ses idées sur la combustion, et ce n'est qu'en 1785, après l'adhésion de Berthollet, suivie bientôt de celle de Fourcroy et de Morveau, que la chimie antiphlogistique commença à prévaloir. Crawford expliquait la chaleur dégagée dans les combinaisons, en admettant que la capacité calorifique du composé était plus faible que la moyenne des capacités des substances combinées; mais on a reconnu que le contraire a souvent lieu, auquel cas il devrait se produire du froid.

Dans le système des ondulations, l'explication est des plus simples; on admet naturellement que l'agitation des molécules, pendant qu'elles se précipitent les unes vers les autres pour s'associer dans une combinaison, imprime à l'éther le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur.

Nous verrons plus tard que les actions chimiques sont accompagnées d'un dégagement d'électricité, et comme l'électricité est une cause de chaleur, on a voulu lui attribuer l'origine de celle qui se produit dans les actions chimiques. Nous reviendrons sur ce sujet en étudiant les effets des courants électriques.

1289. DE LA FLAMME. — La flamme n'est autre chose qu'un gaz devenu lumineux sous l'influence d'une température très-élevée, produite le plus souvent par sa combinaison avec l'oxygène. Au-delà de l'espace dans lequel a lieu cette combinaison, le gaz n'est plus lumineux, c'est pourquoi la flamme est limitée; elle est mobile comme le gaz lui-même. On voit que tout corps qui brûle avec flamme doit dégager un gaz combustible, sous l'influence de la chaleur qui sert à l'allumer, puis de celle qui se produit pendant la combustion. Par exemple, quand on allume une bougie, la chaleur communiquée à la mèche la décompose et dégage un gaz combustible, qui se combine avec l'oxygène de l'air. La chaleur dégagée dans cette combustion fait fondre le corps gras, qui monte dans la mèche par capillarité. Là, il est décomposé par la chaleur, en donnant naissance à du gaz, qui brûle à son tour et produit la chaleur nécessaire pour fondre et décomposer une nouvelle portion du corps gras, et ainsi de suite.

Pour prouver que les corps qui brûlent avec flamme produisent des gaz combustibles en se décomposant par la chaleur, on chauffe de l'huile, de la cire, etc., dans une fiole de verre, le corps gras fond, présente une apparence d'ébullition, et dégage un gaz, qu'on laisse sortir par un tube effilé à l'extrémité duquel on l'enflamme. Ce gaz, qu'on peut recueillir dans une éprouvette sur l'eau, se compose principalement d'hydrogène bi-carboné, ou *gaz oléfiant*.

Si l'on souffle brusquement la flamme d'une bougie, on disperse le gaz inflammable dans une grande masse d'air, ce qui le refroidit assez pour que la combustion cesse. Cependant la mèche fournit encore du gaz, qui s'élève sous forme d'une petite colonne de fumée. Si l'on allume la partie supérieure de cette colonne, on voit la flamme se propager en descendant jusqu'à la mèche, qui se

rallume. Cette petite expérience, citée par Lucrèce, prouve qu'il se dégage un gaz inflammable, de la mèche, tant qu'elle reste très-chaude.

C'est en décomposant par le feu, dans des cornues de fer ou de grès, la houille ou diverses matières organiques, qu'on se procure le gaz qui sert à l'éclairage. Après avoir été purifié, il est recueilli dans un vaste gazomètre (I, 111), d'où il se rend, par des tuyaux souterrains, aux bees où il doit être allumé. L'ingénieur français Philippe Lebon, qui a imaginé, en 1785, l'éclairage par le gaz, l'obtenait de la distillation du bois. Cette invention n'eut pas d'abord de succès, et ce ne fut qu'en 1810, à Londres, que fut réalisé pour la première fois l'éclairage public au gaz.

1290. Mélanges explosifs. — Quand un gaz combustible est mélangé, dans un vase, avec de l'oxygène en proportions convenables, et qu'on approche une flamme de l'ouverture de ce vase, l'inflammation se propage dans toute la

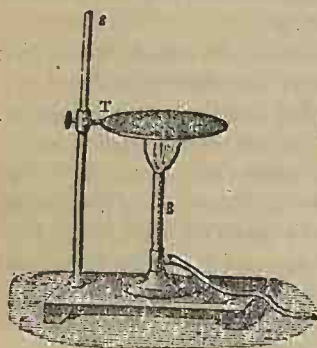


Fig. 918.

masse avec une rapidité extrême, et il se produit une détonation, due à l'expansion brusque des produits gazeux de la combustion. On a trop souvent à déplorer de graves accidents causés par la formation de semblables mélanges dans les endroits renfermés, quand les tuyaux qui y amènent le gaz d'éclairage présentent quelque fuite. Partout où l'air circule difficilement, comme dans l'espace qui existe au-dessus des plafonds, il peut

se former de ces mélanges explosifs. On évite ce danger en laissant à découvert les tuyaux qui conduisent le gaz aux bees; s'il se forme des fuites, le gaz se répand alors dans la chambre, où l'air se renouvelle facilement.

Dans certaines mines de houille, il se dégage de l'hydrogène proto-carboné, désigné par les mineurs sous le nom de *grisou*, qui, mélangé à l'air en certaines proportions, constitue un mélange explosif, auquel les lampes des ouvriers peuvent mettre le feu. L'explosion est ici d'autant plus désastreuse, qu'elle se produit sur une très-grande échelle : les mineurs sont brûlés, asphyxiés, et la commotion produit souvent des éboulements. Davy, consulté sur le moyen d'éviter ces accidents, qui se multipliaient en Angleterre d'une manière effrayante, entreprit une série d'expériences, à la suite desquelles il trouva le moyen préventif demandé.

1291. Propriétés des toiles métalliques. — Davy remarqua d'abord que l'inflammation d'un mélange formé de 8 parties d'air et 1 de gaz d'éclairage, met plus d'une seconde à se propager à travers un tube de 0^m,63 de diamètre et

de 30^{cm} de longueur, et qu'elle ne se propage plus quand ce tube n'a que 0^{cm},36 de diamètre. Wollaston, Tennant, Davy avaient déjà remarqué que les mélanges explosifs ne détonent pas dans les tubes étroits, surtout quand ils sont en métal. Des tubes très-fins, ou des lames minces de métal criblées de petits trous, empêchent l'inflammation de se propager. Enfin, une toile métallique contenant de 100 à 140 mailles par centimètre carré intercepte complètement la flamme quand on l'abaisse sur elle, B (fig. 918). Cependant, du gaz inflammable traverse la toile, car on peut l'allumer en-dessus, où il continue ensuite de brûler, T. De la poudre, du fulmi-coton, ne peuvent être enflammés à travers une toile métallique, tant qu'elle n'est pas assez chaude pour les enflammer par son contact. Un brin de paille ou d'herbe sèche traversant une toile métallique peut être brûlée d'un côté sans que la combustion se propage de l'autre. On fait des lanternes en toile métallique que l'on peut porter allumées, sans danger, dans les endroits où il y a du foin, de la paille.

Davy expliquait les effets des toiles métalliques par le refroidissement que feraient éprouver au gaz les fils de métal, bons conducteurs de la chaleur. Mais, portée au rouge, la toile, qui ne peut alors refroidir que faiblement le gaz, continue à intercepter la flamme; et J. Aldini a montré qu'une toile d'*amiante* produit les mêmes effets, quoique l'*amiante* conduise très-mal la chaleur; l'explication de Davy est donc insuffisante. On a supposé alors que les fils et le gaz incandescent se repoussaient mutuellement, comme les fils incandescents repoussent les liquides (1159); mais on sait que le gaz traverse la toile, et peut être allumé au-dessus. Nous pensons qu'il faut chercher l'explication dans la gêne qu'apporte aux mouvements des molécules qui doivent se combiner l'exiguïté des espaces traversés, gêne qui rappelle celle qui empêche la congélation de l'eau dans les espaces capillaires (1101).

1292. Lampe de sûreté. — Une fois qu'il eut découvert les propriétés des toiles métalliques, Davy construisit une lampe pouvant être plongée impunément dans un mélange détonant. La flamme de cette lampe est entourée d'un cylindre de verre fermé à ses deux extrémités par des toiles métalliques. Quand on la plonge dans un mélange détonant, l'inflammation se produit en dedans, mais ne peut se propager au dehors. La fig. 919 représente le modèle de la *lampe de sûreté* le plus répandu. La flamme est ici entièrement entourée d'une toile métallique. L est le réservoir d'huile, qu'on remplit par l'orifice latéral o. Cette lampe, à laquelle la reconnaissance des mineurs a donné le nom de *Davyne*, éclaire faiblement, et un courant d'air un peu vif peut pousser la flamme au dehors. C'est pourquoi divers inventeurs ont cherché à la perfectionner. M. Combes a imaginé l'appareil (fig. 920), dans lequel il a réuni divers perfectionnements déjà connus. Au-dessus du réservoir d'huile, se trouve un anneau aa, qui soutient une double toile métallique cc, au milieu de laquelle



Fig. 919.

passé le porte-mèche de la lampe. Un dôme *oo*, percé en son milieu, dirige vers la mèche l'air qui a traversé la toile *cc*. A l'anneau *aa* se visse une virole portant un cylindre de verre *vv* très-épais, et dont la partie supérieure est entourée d'une autre virole soutenue par des tiges de fer *l, l*, et à laquelle se visse intérieurement un anneau qui presse le cylindre *vv* et porte un chapeau en toile métallique *t*, par lequel s'échappent les produits de la combustion. Le tube *T* produit un tirage qui retient la flamme dans l'axe de l'appareil. Enfin, la tige à double crochet *rr*, qui passe par un tube traversant l'huile du réservoir, permet d'arranger la mèche sans démonter la lampe.

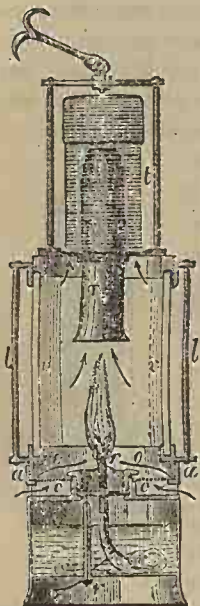


Fig. 920.

pour faire rougir le fil, et qu'on éteint ensuite. Une spirale en fil de platine entourant la mèche d'une lampe à alcool, reste incandescente après qu'on a éteint la lampe, ce qui constitue la *lampe sans flamme*. Le fer, l'argent et l'or produisent les mêmes effets que le platine, mais moins sûrement.

129-1. Appareil de J. Aldini. — Aldini a tiré parti des propriétés des toiles métalliques pour former une sorte de vêtement qui permet de traverser impunément les flammes d'un incendie, et qui a été beaucoup perfectionné depuis. Ce vêtement est formé d'une toile métallique qui recouvre toutes les parties du corps, et en est séparée par une étoffe épaisse d'amiante ou simplement de laine. Un masque en gaze métallique recouvre le visage. Si l'on n'est pas suffoqué, c'est que l'air se refroidit assez, en traversant la toile métallique, pour devenir respirable. — M. Tyndall a imaginé un appareil qui complète celui

1293. Propriétés du platine incandescent. —

Quand une lampe de sûreté est plongée dans un mélange détonant, le plus souvent l'explosion intérieure éteint la flamme; et le mineur, qui doit fuir aussitôt une atmosphère peu respirable, ne peut se conduire dans l'obscurité. Day a remédié à cet inconvénient en disposant dans la flamme de la lampe, une hélice en fil de platine *a* (fig. 921), qui reste incandescente et répand une lueur suffisante, tant qu'elle reste plongée dans l'atmosphère inflammable, au moyen de la chaleur dégagée par la combinaison chimique qui s'effectue au contact de sa surface. Pour vérifier ce résultat, on fait rougir une hélice en fil de platine suspendue au-dessous d'un morceau de carton, dont on recouvre un vase contenant de l'éther. On voit ce fil rester incandescent au milieu de la vapeur d'éther mêlée d'air. On obtient un résultat semblable en fixant le fil de platine à un morceau de camphre qu'on enflamme



Fig. 921.

d'Aldini, et au moyen duquel on peut séjourner pendant plus d'une demi-heure dans un espace rempli d'une épaisse fumée. L'air aspiré est tamisé et purifié par son passage à travers des couches de coton et de charbon en poudre.

1295. Structure de la flamme. — Le pouvoir émissif de la flamme est, en général, très-faible quand elle ne contient pas de particules solides (902). Il en est de même du pouvoir d'émettre de la lumière : ce ne sont pas les flammes les plus chaudes qui ont le plus d'éclat, mais celles qui contiennent le plus de particules solides. C'est encore à Davy que nous devons les premières notions sur ce sujet¹.

On distingue, dans la flamme d'une bougie, trois couches concentriques. À l'extérieur se trouve une couche mince à peine visible *nn* (fig. 922), d'un jaune pâle vers le haut, et bleuâtre à la partie inférieure; on la distingue facilement dans la flamme de l'alcool, dont l'éclat est faible. Vient ensuite une couche brillante *c*. Enfin, dans l'intérieur, autour et au-dessus de la mèche, est un espace obscur allongé, *a*. Ces différentes parties se voient à travers une toile métallique coupant la flamme dans sa partie moyenne. — M. L. Dufour les rend plus distinctes en coupant la flamme par une mince nappe d'eau sortant d'un bec fendu, ou par une mince couche d'air chassée d'une fente par une soufflerie. À travers la nappe transparente, on distingue nettement les trois parties, même dans les flammes minces dites en éventail.

La structure de la flamme s'explique facilement : à l'extérieur, où l'air abonde, les éléments du gaz inflammable, carbone et hydrogène, sont complètement brûlés en formant de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique. Là, la température est la plus élevée; l'angle d'un éclat de verre peut y fondre. La petite quantité d'oxygène qui parvient à la couche moyenne est absorbée par l'hydrogène du gaz, et le carbone mis en liberté apparaît sous forme d'une poussière fine incandescente qui brûle, et disparaît quand elle arrive vers le haut de la flamme, où elle rencontre de l'air. Enfin, dans l'intérieur, il ne parvient plus d'oxygène, il n'y a pas de combustion, et l'espace obscur est rempli de gaz inflammable ou de vapeurs grasses, qui ne brûlent qu'en arrivant dans la partie supérieure de la flamme, quand l'air est en quantité suffisante; autrement, la mèche fume et répand une odeur particulière. — M. Nicklès a pu analyser les gaz contenus dans l'espace obscur, en les aspirant par un tube effilé, au moyen d'un facon aspirateur. Du reste, la température de cet espace est nécessairement peu élevée. Le bout d'une allumette chimique peut y séjourner quelques instants sans éclater. M. J. Murray a pu y introduire de la poudre, dans une petite



Fig. 922.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. III, p. 129.

cuiller d'ivoire, sans qu'elle s'enflammât, et y maintenir de l'argent fulminant pendant quelques secondes. Il a vu, enfin, le phosphore s'y éteindre.

M. Porret, ayant placé verticalement dans la flamme un morceau de toile métallique dont le contour en présentait la forme, vit le bord de cette toile devenir incandescent, et un dépôt de noir de fumée se former dans la couche brillante. Ayant plongé dans l'espace obscur l'extrémité d'un tube recourbé vers le bas, il trouva dans l'intérieur un dépôt de matières grasses provenant des vapeurs non décomposées.

Davy explique, par les principes qui précèdent, le vif éclat des flammes dans lesquelles il se produit une matière solide, comme lorsqu'on brûle du phosphore ou du zinc dans l'oxygène, du potassium dans le chlore. La combustion du gaz hydrogène, de l'oxyde de carbone, du soufre, ne donne qu'une très-faible lumière, ces corps ne formant en brûlant que des produits gazeux. On en augmente singulièrement l'éclat en projetant dans la flamme certaines poussières, comme de l'oxyde de zinc ou de l'amiante en poudre très-fine.

1296. HAUTES TEMPÉRATURES PAR LA COMBUSTION. — La température produite par la combustion dépend de plusieurs conditions : 1^o de la nature de la substance qui brûle ; 2^o de la quantité d'oxygène fournie dans l'unité de temps ; 3^o de la densité : une même substance produit en brûlant une température d'autant plus élevée qu'elle est plus dense. C'est ainsi que les charbons, les bois les plus denses donnent une température plus élevée que les charbons et les bois légers ; c'est que, avec les premiers, la même quantité de chaleur est concentrée dans un plus petit espace.

Influence de la quantité d'oxygène. — Plus on fournit d'oxygène, plus la combustion est rapide et complète, et plus la quantité de chaleur produite dans un temps donné est grande, et, par suite, la température élevée. Dans l'air comprimé, dans l'oxygène pur, la combustion est bien plus active que dans l'air ordinaire. Rumford a imaginé d'augmenter la température des flammes en faisant passer de l'air dans l'intérieur, à travers une mèche annulaire, en même temps qu'à l'extérieur, et en activant le courant au moyen d'une cheminée de tôle produisant un tirage. C'est de là qu'est venue, plus tard, l'invention des lampes d'Argand à cheminée de verre.

C'est en lançant de grandes quantités d'air au moyen de puissantes machines (I, 445) qu'on obtient, dans les fonderies, la température nécessaire à la réduction et à la fusion des métaux. Quand l'air insufflé est d'avance très-chaud, la combustion se fait avec une activité qu'on n'aurait pas soupçonnée d'avance, la chaleur spécifique des gaz étant tellement faible, que la quantité de chaleur qu'absorbe l'air froid est tout à fait insignifiante. Il faut donc qu'il y ait surexcitation de l'action chimique ; les molécules de l'oxygène tendant, quand elles sont échauffées, à se combiner avec plus d'activité. Pour échauffer l'air, on le fait passer, à sa sortie de la machine soufflante, à travers des tuyaux placés dans la cheminée qui reçoit la flamme du fourneau, d'où il se rend à la tuyère.

M. H. Sainte-Claire Deville est parvenu à obtenir, avec un feu de forge, des

températures capables de fondre la silice et de volatiliser la platine¹. Il emploie pour cela un charbon très-dense formé de ces parcelles de coke incomplètement brûlé qui tombent à travers la grille des fourneaux. Ce combustible est placé dans un cylindre creux en terre réfractaire, de 18^{cm} de diamètre *c c'* (fig. 923), fermé en dessous par une plaque de fonte percée de trous formant une circonférence *oo* de 10^{cm} de diamètre, et à travers lesquels on fait arriver le vent d'un soufflet de forge. Le platine, contenu dans un creuset de chaux vive, fond en quelques minutes, et, au bout de quelque temps, on trouve des parcelles de ce métal condensées sur le couvercle du creuset, ce qui prouve que le platine a été volatilisé. Le creuset est élevé sur un cylindre *a*, le maximum de température se montrant à 2 ou 3^{cm} au-dessus de la plaque^{oo}, jusqu'à 7^{cm} environ de hauteur, pour s'abaisser rapidement au-dessus, où l'acide carbonique se transforme en oxyde de carbone en absorbant de la chaleur. Au moyen du même appareil, M. H. Sainte-Claire Deville a fondu la silice dans un creuset de graphite. Il est à remarquer que la lumière très-vive que rayonne le charbon présente une teinte bleuâtre.

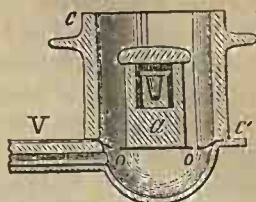


Fig. 923.

1297. Chalumeau. — La flamme produit une très-haute température quand on y dirige un courant d'air; par exemple, avec le *chalumeau*, si souvent



Fig. 924.

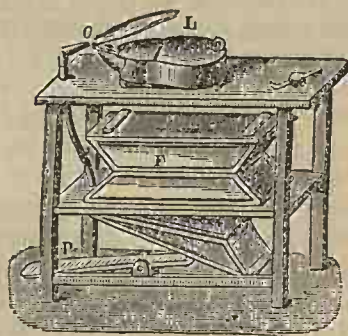


Fig. 925.

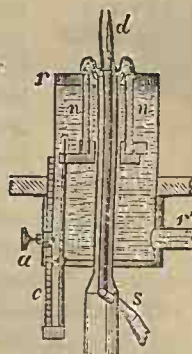


Fig. 926.

employé dans la minéralogie et dans l'industrie pour souder les métaux précieux. Le chalumeau consiste en un tube *bro* (fig. 924), dans lequel on souffle avec la bouche par l'extrémité *b*; le vent sort en *o* par une très-petite ouverture. En *r*,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLVI, p. 190.

est un réservoir destiné à condenser la vapeur de l'haleine. M. Luca fait ce réservoir en caoutchouc vulcanisé, et dispose une soupape qui s'oppose au retour de l'air vers la bouche. Le caoutchouc s'étend pendant qu'on souffle, et réagit par son élasticité, de manière que la sortie de l'air est continue, même quand on souffle d'une manière intermittente.

Lampe d'émailleur. — Dans cet appareil, qui sert à souffler le verre, un soufflet à vent continu F et à pédale P (fig. 925) lance un courant d'air par un bec effilé *o* à travers la flamme d'une lampe L. Il faut une certaine habitude pour disposer la mèche de manière à obtenir un bon *dard*.

Peclat a imaginé une forme de bec qui dispense de ce soin : l'huile arrive d'un flacon de Mariotte dans le réservoir *rr'* (fig. 926), par le tube *r'*. Le vent du soufflet arrive en *s*, et l'air sort par le centre de la mèche *nn*, qui peut s'élever à volonté au moyen de la crémaillère *c* et du pignon *a*. L'air environnant, entraîné par communication latérale de mouvement, pousse la flamme vers l'axe de la mèche, où elle reçoit le courant d'air, et forme le *dard d*.

Quand on a à sa disposition un bec de gaz d'éclairage, on obtient facilement un beau *dard*, dont on peut faire varier à volonté les dimensions et la température en ouvrant plus ou moins les robinets de sortie du gaz ou de l'air.

Bec de Bunsen. — En mêlant de l'air au gaz d'éclairage avant sa sortie, on obtient une flamme peu éclairante, mais très-chaude, la combustion étant plus prompte et plus complète. Le gaz arrive par un robinet II (fig. 927), se rend par un bec, *s*, dans un tube ou cheminée *cf*, où il se mêle à l'air entrant par des fenêtres latérales *c*, que l'on peut fermer plus ou moins en faisant tourner l'anneau *aa*, percé aussi de deux ouvertures. Le gaz brûle à l'ouverture *f* avec une flamme bleuâtre. En *o*, est un autre tube, par lequel on peut faire



Fig. 927.

arriver de l'oxygène pour obtenir une température encore plus élevée. Le principe du mélange préalable de l'air au gaz est très-employé aujourd'hui dans une foule d'applications du chauffage par le gaz, soit dans les laboratoires, soit dans l'industrie ou les usages domestiques.

1298. Chalumeaux à vapeurs combustibles. — Le plus anciennement connu de ces appareils est l'éolipyle à alcool dont on se sert pour courber les tubes et souffler le verre. La fig. 928 représente une des formes de ce petit appareil. L est une lampe à alcool dont la flamme volatilise d'autre alcool contenu dans le réservoir *r*. La vapeur passe par le tube *t*, s'échappe par l'orifice *o* en entraînant l'air environnant, et chasse la flamme de la lampe L, dont la combustion se trouve ainsi activée. La fig. 812 (1158) représente une autre disposition du même appareil.

Le chalumeau à essence de M. de Richemond est très-économique et en même temps très-commode pour souder les métaux précieux et pour travailler

le verre : une lampe à huile met en ébullition de l'essence de térébenthine contenue dans une petite chaudière de cuivre fermée à sa partie supérieure. Un courant d'air passe à travers la vapeur, et l'entraîne dans un tube à l'orifice duquel on l'enflamme. Un autre courant d'air arrive par un tube concentrique au premier, et se mêle à la vapeur d'essence, dont la combustion est ainsi très-vive. Les deux courants d'air proviennent d'un soufflet que l'on fait mouvoir au moyen d'une pédale. — M. H. Sainte-Claire Deville a imaginé, de son côté, sous le nom de *lampe-forge*, un appareil à essence qui permet d'expérimenter dans un creuset, sur une dizaine de centimètres cubes de matière¹.

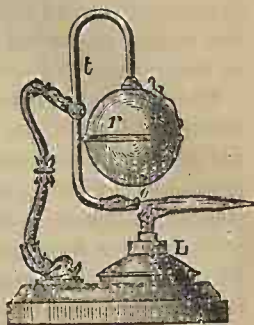


Fig. 928.

1299. Chalumeau oxy-hydrique. — Une des températures les plus élevées que l'on puisse obtenir par la combustion, est celle que donne un mélange de 1 volume d'*oxygène* et de 2 d'*hydrogène*. Dans le *chalumeau de Hare*, les deux gaz sont rassemblés dans deux gazomètres ou dans deux sacs en caoutchouc séparés, et sont chassés par des tubes distincts dans un seul et même tube, d'où ils s'échappent par un petit orifice, après s'être mélangés. Des robinets permettent de faire arriver deux fois plus d'hydrogène que d'oxygène.

Dans le *chalumeau de Newmann*, ou de *Brook*, les deux gaz sont comprimés dans un même récipient au moyen d'une pompe foulante. Quand on ouvre un robinet, ils traversent un tube dans lequel il y a un grand nombre de rondelles de toile métallique, d'où le mélange se rend à l'orifice, où on l'enflamme. Les rondelles empêchent l'inflammation de se propager à l'intérieur du récipient, ce qui produirait une explosion terrible.

Avec le chalumeau oxy-hydrique, on fond les substances les plus réfractaires : l'or, l'argent, le platine entrent en ébullition ; la silice, l'alumine, une foule de pierres précieuses sont fondues. La chaux n'y résiste que lorsqu'elle est pure, auquel cas elle est infusible. — M. Gaudin a pu fondre les minéraux les plus réfractaires, et est parvenu à les obtenir ensuite cristallisés, de manière à produire ainsi des pierres précieuses.



Fig. 929.

Lumière Drummond. — La flamme si chaude du chalumeau à oxygène et hydrogène est à peine visible en plein jour, parce qu'elle ne contient pas de substance solide. Si l'on y introduit la pointe d'un morceau

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLVI, p. 184.

de chaux, qui en prend la température, il se produit une lumière tellement vive, que l'œil ne peut en supporter l'éclat. C'est ce qu'on nomme la *lumière Drummond*. La *fig. 929* représente la disposition qu'on donne habituellement à l'appareil. Les deux gaz arrivent séparément par les tubes de caoutchouc *o* et *h*. Ils se mélangent avant d'arriver au bec *m*, où ils sont enflammés et communiquent leur chaleur au crayon de chaux ou de magnésie *c*, qui peut être déplacé et fixé au moyen d'une vis de pression *p*.

Chalumeau acryhydrique. — La flamme de ce chalumeau, dû à M. de Richemond, est produite par un mélange d'hydrogène et d'air. L'air est fourni par un soufflet à vent continu, et l'hydrogène par un appareil disposé suivant le principe du briquet à gaz hydrogène (I, 171). Les deux gaz arrivent, par des tubes de caoutchouc, à un bec, dans lequel ils se mélangent avant de sortir. Il résulte de cette disposition qu'on peut porter ce dard enflammé sur le point à échauffer. C'est un véritable *outil de feu*, très-précieux pour l'industrie, avec lequel on peut souder des lames de plomb en en fondant les bords, et sans soudure intermédiaire.

1300. Fourneaux oxy-hydriques. — Le chalumeau oxy-hydrique ne peut guère être appliqué qu'à de très-faibles masses de matières. MM. H. S. C. Deville et Debray ont disposé un appareil au moyen duquel on peut opérer sur des quantités notables. Le creuset, ordinairement en chaux vive, est posé sur un socle dans un cylindre de chaux. Ce cylindre est fermé en dessus par une épaisse plaque percée en son centre d'un canal par lequel passe un tube qui amène l'hydrogène. Un autre tube plus étroit et un peu plus court, placé dans l'axe du premier, donne accès à l'oxygène. Les extrémités de ces tubes sont en platine. On règle l'arrivée des gaz au moyen de robinets, et l'on est guidé dans cette opération par le bruit que fait la flamme, qui siffle quand il arrive trop d'oxygène, et fait entendre un espèce de souffle quand il y a trop d'hydrogène; tandis que l'on n'entend presque aucun bruit quand les proportions des deux gaz sont convenables. La flamme se divise sur un couvercle conique surmontant le creuset, qu'elle enveloppe, et elle sort en bas par des ouvertures latérales.

C'est au moyen d'un appareil semblable de grandes dimensions et muni de 7 à 8 doubles tubes traversant son couvercle, qu'on a pu fondre en une seule fois et en moins de deux heures, 250^{kil} d'un alliage de platine et d'iridium destiné à la construction des étalons du mètre et du kilogramme demandés par la commission réunie à Paris en 1868, pour étudier les questions relatives à l'adoption du système métrique, par les vingt États de l'Europe ou de l'Amérique qui avaient envoyé leurs délégués.

1301. Température des flammes. — Dissociation. — On peut calculer la température d'une flamme, en partant de la quantité de chaleur qu'elle dégage pour un poids donné de gaz brûlé, quantité que nous apprendrons bientôt à mesurer. Prenons par exemple la flamme du chalumeau oxy-hydrique. 1^{er} d'hydrogène qui se combine avec 8^{es} d'oxygène pour donner 9^{es} d'eau, développe 34500 calories environ, ce qui fait $\frac{1}{9}$ 34500 pour 1^{er} d'eau. Cette chaleur est

recueillie par la vapeur d'eau formée, qui l'abandonne pour se refroidir de la température cherchée x , à 0° . D'abord, pour se refroidir de x° à 100° , elle cède $(x - 100) 0,475$ calories; $0,475$ étant la capacité de la vapeur d'eau supposée la même à x° qu'à 100° , quoiqu'elle augmente avec la température (1091). Ensuite, pour se condenser et pour passer à 0° , cette vapeur abandonne (1184) la chaleur totale $606,5 + 30,5 \cdot 100$, ou 637^{cal} . On a donc

$$637 + (x - 100) 0,475 = \frac{1}{9} 34500$$

d'où l'on tire $x = 6800^\circ$, en nombre rond.

Dissociation. — Ce dernier nombre est beaucoup plus fort que ceux qu'on déduit des méthodes pyrométriques. Ce désaccord s'explique facilement depuis la découverte du phénomène de la *dissociation*. On savait depuis longtemps que beaucoup de corps ne peuvent se combiner qu'à partir d'une certaine température, au-dessus de laquelle, au contraire, les éléments se sépareraient s'ils étaient réunis. M. H. S. C. Deville¹ a découvert que des corps composés, par exemple l'eau, peuvent être décomposés par la chaleur seule, à une température bien inférieure à celle qu'ils produisent quand leurs éléments se combinent; et cette décomposition s'arrête dès que le mélange des éléments gazeux qui en proviennent atteint une certaine tension, nommée *tension de dissociation*; de même que l'évaporation d'un liquide cesse quand la vapeur formée atteint sa pression maximum. La tension de dissociation augmente avec la température (dans certains cas par sauts brusques, d'après M. Berthelot), et s'il y a refroidissement, elle diminue par la recombinaison d'une partie des éléments, jusqu'à ce qu'elle soit ramenée à la valeur qui correspond à la nouvelle température. Par exemple, l'eau se décompose à 1000° , mais bientôt la décomposition s'arrête, quand les deux gaz séparés donnent la tension de dissociation h . Si l'on élève la température, une nouvelle quantité des deux gaz se dégage, et l'on a une tension plus forte h' ; si ensuite on redescend à 1000° , une partie des gaz se recombine et la tension redevient h . Quand la température est différente en divers points du mélange, il peut y avoir décomposition aux endroits les plus chauds, et en même temps recombinaison, aux moins chauds.

Il résulte de là que la température de combinaison est bien plus faible que celle qui se calcule au moyen des formules; la chaleur produite s'opposant elle-même à ce que la combinaison soit complète. D'après les expériences de MM. H. S. C. Deville et Debray, faites en plongeant du platine en fusion dans l'eau, la température réelle de combustion du mélange oxy-hydrique n'est que de 2500° . M. Bunsen, en partant de la pression donnée par la détonation du mélange, est arrivé à 2800° , et M. Vicair regarde comme très-probable le nombre de 3000° . Sous ces températures, la moitié seulement des gaz mélangés peut entrer en combinaison.

¹ Leçons sur la dissociation, 1864.

La pression extérieure élève la température produite par la combustion. M. Cailletet ¹ ayant fait passer dans un réservoir de fer de 4 litres de capacité, muni d'un manomètre et d'une ouverture fermée par une glace épaisse, un courant d'air dont la pression pouvait augmenter jusqu'à 35 atmosphères, et y ayant fait brûler du soufre, de l'alcool, ou du sulfure de carbone, a vu les flammes produites devenir de plus en plus brillantes à mesure que la pression était plus forte. La flamme d'une bougie devenait graduellement plus brillante, la partie sombre de la base prenait un vif éclat, puis, à partir d'une certaine pression il se formait une épaisse fumée indiquant la dissociation du gaz carburé par l'influence d'une température de combustion devenue plus élevée sous une pression plus forte. — Antérieurement, M. Frankland avait vu les flammes de l'hydrogène et de l'alcool salé, devenir blanches et brillantes dans l'air très-comprimé, tandis que les flammes du gaz, des bougies palissaient dans l'air raréfié.

I. Mesure de la chaleur dégagée dans les actions chimiques.

1302. Premières expériences. — L'étude des *quantités de chaleur* qui se dégagent dans les actions chimiques forme une des parties les plus importantes de la *calorimétrie*, tant sous le rapport des nombreuses questions théoriques qui s'y rattachent que sous celui du parti que l'industrie peut en tirer pour apprécier la valeur des divers combustibles.

L'attention des physiciens s'est d'abord portée exclusivement sur la combustion. On nomme *pouvoir calorifique* d'un combustible le *nombre de calories qui se dégagent quand on brûle l'unité de poids de ce combustible*. — Les premières recherches sur ce sujet ont été faites, vers 1780, par Lavoisier et Laplace, en brûlant dans leur calorimètre (1059), un poids connu de la substance, au moyen d'un courant d'air porté à 0° par son passage à travers un tube entouré de glace. Les produits gazeux de la combustion étaient aussi ramenés à 0° par leur passage à travers de la glace fondante, et l'eau de fusion était ajoutée à celle qui sortait du calorimètre. Cette méthode, suivie plus tard par Rumford, est peu sûre, et les résultats qu'elle a donnés diffèrent notablement de ceux qu'on a obtenus depuis.

Calorimètre de Rumford. — Rumford, en 1814, a fait des expériences au moyen d'un calorimètre particulier représenté (fig. 930). Une caisse de cuivre C, remplie d'un poids connu d'eau, contient un serpentín horizontal S très-aplati, dont on voit une projection horizontale en *o s a* (fig. 931). Le serpentín sort de la caisse en O, *o* (fig. 930 et 931), et se termine en A, *a* par un entonnoir au-dessous duquel on brûle les matières en expérience. Les produits gazeux de la combustion circulent lentement dans le serpentín horizontal, et déposent sur sa surface intérieure, qui est très-grande par rapport à sa section, presque tout

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXX, p. 487.

l'excès de chaleur qu'ils contiennent. On conclut de l'échauffement du calorimètre la quantité de chaleur fournie par le poids de matière brûlée.

La température était donnée par un thermomètre *t* (fig. 930), dont le réservoir occupait presque toute la profondeur de l'eau. Pour éviter l'erreur provenant de la perte de chaleur par l'extérieur, Rumford appliquait sa méthode de compensation (887); et pour recueillir l'excès de chaleur que les gaz pouvaient emporter à leur sortie du serpentin, il leur faisait traverser le serpentin d'un second calorimètre semblable au premier. — Des précautions minutieuses étaient prises pour que la combustion fût complète : les bois étaient débités en minces rubans au moyen de la varlope; les liquides étaient mis dans une lampe, et la perte de poids pendant l'expérience donnait le poids du liquide brûlé.

La principale cause d'erreur provenait de la chaleur qui, rayonnée par le combustible, n'entrait pas dans le serpentin. Les solides qui rayonnent beaucoup plus que les flammes, ne pouvaient donc donner de résultats satisfaisants; et Rumford renonça à mesurer la chaleur de combustion du charbon. — Hassenfratz et Clément Desormes ont obtenu beaucoup de résultats par cette méthode et par celle de Lavoisier et Laplace.

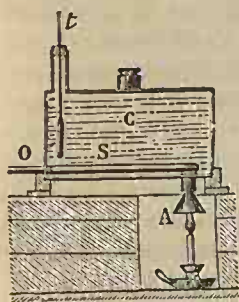


Fig. 930.

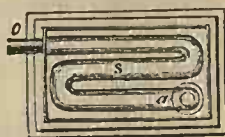


Fig. 931.

Loi de Welter. — J. J. Welter, en 1822¹, en comparant les résultats obtenus par divers physiciens, crut reconnaître que les corps, en

brûlant avec la même quantité d'oxygène, dégageaient des quantités de chaleur égales entre elles, ou multiples les unes des autres. Les expériences faites depuis n'ont pas confirmé cette loi. Par exemple, Dulong a trouvé que les quantités de chaleur dégagées par la combustion de poids égaux de carbone et d'hydrogène, sont entre elles à peu près comme 1 : 5, tandis que les quantités d'oxygène absorbées sont entre elles comme 1 : 3.

1303. Expériences de Despretz. — A l'occasion de son grand travail sur la chaleur animale, Despretz a mesuré avec beaucoup de soin les pouvoirs calorifiques du carbone et de l'hydrogène². Il s'est servi d'un calorimètre analogue à celui de Rumford, mais notablement perfectionné. La principale modification consistait en ce que le combustible brûlait dans une caisse entièrement plongée dans l'eau du calorimètre, de manière qu'aucune portion de la chaleur produite ne pouvait se perdre. De l'air ou du gaz oxygène desséchés étaient amenés, de gazomètres à mercure dans cette caisse; les produits de la

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XIX, p. 425.

² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXVI, p. 344; et XXXVII, p. 480.

combustion en sortaient par un serpentin qui l'enveloppait de toute part. Les températures du gaz, à son entrée et à sa sortie, étaient données par deux thermomètres très-sensibles. On faisait la correction relative à la perte extérieure de chaleur du calorimètre, qui était muni de quatre agitateurs. Le carbone était préparé par la calcination de sucre pur au feu de forge. — Ces recherches ont fait époque dans l'histoire de la calorimétrie. Dans un second travail, Despretz a mesuré le pouvoir calorifique du carbone, de l'hydrogène, du phosphore et de plusieurs métaux. Il a trouvé que, *en absorbant un gramme d'oxygène, l'hydrogène dégage 2578 calories, le charbon 2967, le fer 5325. Le phosphore, le zinc et l'étain ont donné à peu près le même résultat que le fer.*

Despretz a conclu de son travail que la quantité de chaleur dégagée par un corps est constante, quelle que soit la pression de l'oxygène dans lequel il brûle, quand le volume du gaz produit par la combustion est le même que celui de l'oxygène; comme cela a lieu dans la combustion du carbone, du soufre, etc. Ce résultat n'a été constaté que sur le carbone; mais Despretz regarde comme probable qu'il serait le même avec les autres corps pour lesquels le volume de l'oxygène reste le même après la combustion. Il pense aussi que, dans les cas où l'oxygène passe à l'état solide en se combinant, comme dans la combustion du phosphore et des métaux, la quantité de chaleur dégagée doit être d'autant plus faible que la pression de l'oxygène est plus grande; l'oxygène, pour se solidifier dans le composé formé, devant se condenser d'autant moins qu'il est employé à une plus forte pression.

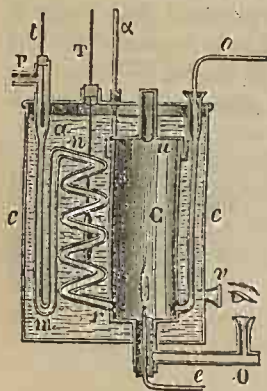


Fig. 932.

1304. Recherches de Dulong. — Comme il existait des différences notables entre les nombres trouvés par les divers physiciens, Dulong avait entrepris un grand travail sur la chaleur dégagée dans la combustion, lorsqu'il a été fatalement enlevé à la science. Heureusement, il avait communiqué à M. Hess, de Saint-Petersbourg, quelques-unes des lois auxquelles il était parvenu, et l'on a trouvé dans ses papiers quelques résultats qu'il avait calculés. Enfin, M. Cabart, qui avait été témoin des expériences, a pu donner la description du calorimètre, dont on n'a retrouvé que la partie intérieure¹. C'est d'après cette description qu'a été faite la coupe représentée dans la figure 932.

Le corps à brûler est renfermé dans une caisse rectangulaire, ou *chambre à combustion*, C, en cuivre, ayant 25^{cm} de hauteur, 7^{cm},5 de largeur, et 10^{cm} de profondeur; elle est fermée à sa partie supérieure par un couvercle u, dont

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. VIII, p. 183.

les bords rabattus plongent dans une rigole remplie de mercure. L'oxygène arrive dans la chambre C, tantôt par le tube O, tantôt par le tube o qui aboutit au bas de la chambre. Ces tubes sont aplatis, excepté à leurs extrémités, où ils sont cylindriques. Les produits gazeux de la combustion sortent par un canal à section rectangulaire *nmP*, de 5^{cm} de largeur, replié plusieurs fois en *m*; d'où ils se rendent dans un gazomètre. Le thermomètre *t* indique leur température. Toute cette partie est renfermée dans un calorimètre muni d'un agitateur dont la tige est en *z*. La température de l'eau est donnée par deux thermomètres, dont un se voit en T.

Les corps étaient brûlés dans le bas de la chambre C; le fer était roulé en spirale, et les autres métaux, placés en poudre dans une capsule de platine ou de cuivre. On les mélangeait avec une matière inerte, quand on craignait leur agglutination par la chaleur, et l'on y mettait le feu au moyen d'amadou. Le charbon, était taillé en cône aigu, qu'on allumait avant de l'introduire dans la chambre C. — Les gaz étaient brûlés à l'extrémité d'un tube effilé, *e*, dont l'orifice variait, suivant que le gaz était plus ou moins facile à brûler. — Les liquides étaient placés dans un tube de verre fermé par le bas, et dans lequel plongeait quelques brins de coton. Un regard *v*, fermé par une lame de verre, permettait de suivre la marche de la combustion. On ne sait pas par quel moyen les gaz et les liquides étaient enflammés. — La perte de chaleur par l'extérieur était évitée par la méthode de Rumford, et l'on égalait la quantité de chaleur dégagée à celle qu'avait reçue le calorimètre.

Il résulte de quelques lignes manuscrites laissées par Dulong, qu'il avait soupçonné l'existence d'un rapport simple entre les capacités des corps et les quantités de chaleur dégagées par leur combinaison avec un même poids d'oxygène.

1305. Lois relatives aux combustibles composés. — C'est principalement à l'occasion des travaux de ce célèbre physicien qu'ont été soulevées les deux questions qui suivent : 1^o *la quantité de chaleur dégagée est-elle la même quand un corps simple, en brûlant, atteint immédiatement le maximum d'oxygénation, et quand il ne l'atteint qu'à différentes reprises?* C'est ce qui a lieu généralement, comme nous le verrons plus loin. Par exemple, 1st de charbon dégage, pour passer à l'état d'acide carbonique, une quantité de chaleur égale à celle qui se développe quand le même poids passe à l'état d'oxyde de carbone, augmentée de celle que produirait cet oxyde en brûlant pour former de l'acide carbonique.

2^o *La quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un corps composé est-elle égale à la somme des quantités de chaleur que produiraient ses éléments en brûlant séparément?* Les nombres trouvés par Dulong prouvent que la réponse doit être négative, et que, le plus souvent, la chaleur dégagée par le composé est la plus faible. Nous reviendrons sur cette question importante (1318).

Voici le tableau des principaux résultats trouvés dans les manuscrits de Dulong; l'unité de chaleur est rapportée à 1 gramme d'eau :

SUBSTANCES	CHALEUR PRODUITE			OBSERVATIONS
	par 1 litre à 0° et 0° ^m ,76.	par 1 gr. de substance.	par 1 litre d'oxygène.	
Hydrogène.	3106,6	34601	6212	Moyenne de 5 expériences.
Id. dans le protox. d'azote.	5220,7	"	"	Il se produit de l'ac. nitreux.
Gaz des marais.	7587,7	"	4793	Moyenne de 3 expériences.
Oxyde de carbone.	3130,3	"	"	Il a été mêlé avec un vol. égal d'hydrogène. — 3 expér.
Id. dans le protox. d'azote.	5549	"	"	Il se produit de l'ac. nitreux.
Gaz oléfiant.	15338	"	"	Moyenne de 5 expériences.
Cyanoène.	12270,3	"	"	Il se forme un peu d'ac. nit. — 3 expériences.
Alcool absolu.	14375,5	7087	"	Moyenne de 2 expériences.
Ether.	33353	9431	"	Idem.
Essence de térébentine. . .	70607	10836	"	
Huile d'olive.	"	9862	"	
Charbon.	7858	7295	"	On admet que l'ac. carboni- que contient 1 vol. d'ox. et $\frac{2}{3}$ v. de vapeur de carbone condensés en un seul.
Soufre.	"	2601	"	Production d'acide sulfuri- que anhydre.
Fer.	"	"	6216	Moyenne de 2 expériences.
Étain.	"	"	6508	Moyenne de 3 expériences.
Protoxyde d'étain.	"	"	6477	Il a dû se former une combi- naison entre le protoxyde et le peroxyde.
Cuivre.	"	"	3722	Moyenne de 3 expériences.
Protoxyde de cuivre. . . .	"	"	3130	Une seule expérience.
Antimoine.	"	"	5481,6	Le produit est de l'ac. anti- monieux. Moy. de 5 expér.
Zinc.	"	"	7576,6	Moyenne de 3 expériences.
Cobalt.	"	"	5721	Une seule expérience.
Nickel.	"	"	5333	Idem.

Ces résultats diffèrent notablement de ceux qui avaient été publiés antérieurement, surtout pour le gaz hydrogène. Malgré la confiance que mérite un physicien aussi consciencieux que Dulong, l'incertitude qui restait sur la méthode qu'il a employée et l'état incomplet dans lequel il a laissé son travail, ont fait désirer de nouvelles recherches. En 1841, l'Académie des sciences de Toulouse mit au concours l'évaluation de la chaleur dégagée dans la combustion, et l'Académie de Paris proposa, en 1842, la question plus générale de la mesure de la chaleur dégagée dans les actions chimiques. Ce double appel a donné naissance à divers travaux remarquables, dont nous allons nous occuper.

1306. Expériences de MM. Dauriac et Sahuquic. — Le calorimètre

qui a servi à ces expériences se compose de deux sphères concentriques de cuivre mince (fig. 933). La sphère intérieure, qui constitue le *foyer* ou *chambre à combustion*, a 15^{cm} de diamètre, et est formée, comme la sphère extérieure, de deux parties réunies par des vis, suivant un grand cercle horizontal. Dans le *foyer*, est disposée une légère grille de platine, sur laquelle on place le combustible. De la partie supérieure *e* du foyer partent deux serpentins communiquant avec les tubes *tr*, *ta*, qui conduisent les produits de la combustion dans un gazomètre, par la cheminée *tb* et le tube *C*. Un thermomètre placé dans une boule de verre *b* donne leur température à la sortie.

L'oxygène, desséché et purifié, arrive dans la chambre à combustion par le tube *Oo*. Ce gaz vient d'un gazomètre gradué.

Quand le combustible est gazeux, il arrive par le tube *Gg*, dont la partie horizontale *g* peut glisser dans une tubulure garnie de liège que porte la sphère extérieure, afin de faciliter l'ajustement de l'appareil. Le tube *Oo* présente une semblable disposition dans sa partie inférieure.

Le combustible est allumé par l'électricité au moyen de deux fils de platine *e*, *e'* pénétrant dans le foyer, à travers des tubes de verre. Ces fils sont attachés, dans la chambre à combustion, à deux cônes de charbon, fixés par un peu de mastic à une lame de verre, de manière que leurs pointes se touchent. Si l'on fait communiquer les fils *e*, *e'* avec les pôles d'une *pile galvanique*, les pointes des charbons deviennent incandescentes et mettent le feu au combustible.

La température de l'eau du calorimètre est donnée à chaque instant par trois thermomètres : un thermomètre ordinaire à long réservoir, et deux thermomètres à poids *n*, *n'*. Ces trois instruments plongent dans des tubes de fer remplis de mercure, pénétrant dans la grande sphère. Enfin, l'appareil est soutenu par trois pieds de cristal, dans une cave artificielle.

1307. EXPÉRIENCES DE MM. FAVRE ET SILBERMANN. — MM. Favre et Silbermann ont entrepris en 1844, et poursuivi avec persévérance, des recherches étendues sur la mesure de la chaleur dégagée dans les actions chimiques ¹. La figure 934 représente une coupe du calorimètre qu'ils ont employé pour les combustions vives. *aa* est le calorimètre proprement dit, en cuivre, et argenté

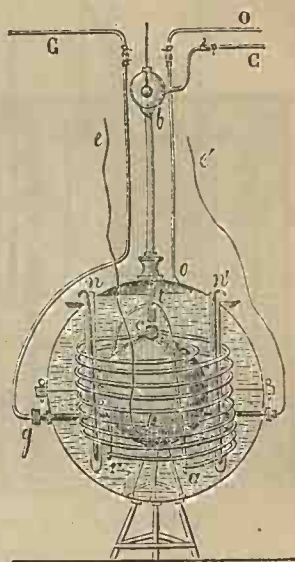


Fig. 933.

¹ Ann. de ch. et de ph., 3^e s., t. XXXIV, p. 357; t. XXXVI, p. 5 et 33; t. XXXVII, p. 406.

pour rendre son pouvoir émissif très-faible. Il contient 2 litres d'eau, remuée par l'agitateur *ee' e*, que meut un mouvement d'horlogerie.

Le couvercle porte trois tubulures qui laissent passer les tiges *e*, *e'* de l'agitateur, et celle d'un thermomètre, et est percé au centre d'une large ouverture par laquelle on introduit la chambre à combustion *A*.

Le calorimètre *aa* est renfermé dans une caisse cylindrique *VV* argentée en dedans, et il est entouré d'une peau de cygne, dont le duvet tourné de son côté, empêche la circulation de l'air; il s'appuie sur quatre pieds de liège, *nn*, réunis par des tubes de verre et reposant sur la peau de cygne.

Une dernière enveloppe *I, I* retient une couche d'eau qui empêche la chaleur

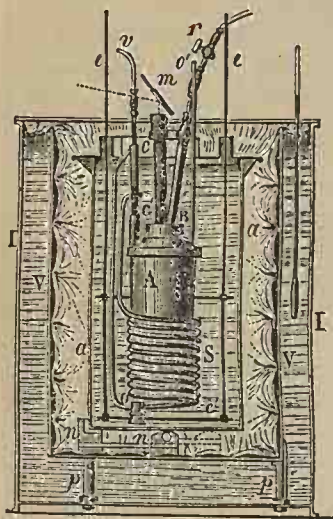


Fig. 934. — 1/5.

extérieure de se faire sentir sur le calorimètre. Enfin, un disque de carton, garni de duvet en dessous, recouvre tout l'appareil. Ce disque, muni d'échancrures convenables, peut se séparer en deux suivant un diamètre.

Dans la figure 937, on voit en C l'ensemble du calorimètre et de ses enveloppes, reposant sur un disque de bois, appuyé lui-même sur un plateau de métal muni de vis calantes. De ce plateau partent trois montants métalliques; qui



Fig. 935. — 1/5.

supportent un plateau triangulaire percé de trous, dans lesquels sont fixées les tiges des thermomètres. *Q* est un poids qui fait mouvoir les rouages qui mènent l'agitateur par l'intermédiaire du levier *nm*.

La chambre à combustion *A, A'* (fig. 934 et 935) est en cuivre doré; son couvercle est vissé, et porte trois montants *q, q...* qui servent à le suspendre au couvercle du calorimètre *aa*, et permettent de l'enfoncer à différentes profondeurs.

L'oxygène arrive dans cette chambre, par le tube *o', o''*. Les produits de la combustion passent par la tubulure *e', e''* dans un serpentin en cuivre *S*, ayant 2 mètres de développement, et en sortent par le tube *ev*. Un petit vase *o* reçoit les vapeurs qui peuvent se condenser; on peut le dévisser pour recueillir le liquide qu'il contient. Le serpentin peut s'enlever avec le tube *ce'* qui s'engage dans la tubulure *e', e''*.

Les combustibles solides ou liquides, contenus dans de petits vases métalliques appropriés à leur nature, sont placés dans la partie inférieure plus étroite de la chambre A' (fig. 935). Comme ces corps sont plus ou moins volatils, il est bon de faire plonger les vases dans un peu d'eau empruntée au calorimètre. Ils sont suspendus au bouchon rodé *b*, au moyen d'une douille à mouvement de baïonnette (fig. 940). Le bouchon *b* (fig. 935) sert à fermer l'ouverture supérieure de la chambre à combustion; il est surmonté de deux tubulures *t*, *t'*, dont une, *t*, sert à manœuvrer le bouchon, et est fermée par une masse transparente *athermane* *u*, composée de disques d'alun, de quartz et de verre. A travers ces disques, on peut suivre la marche de la combustion, en s'aidant d'un petit miroir *m*, *m'* (fig. 934 et 935), incliné à 45°, qui renvoie latéralement les rayons lumineux. La tubulure *t'* (fig. 935) reçoit le bec H (fig. 936) qui apporte les gaz à brûler, ou le bec O destiné à amener de l'oxygène, ou enfin le bouchon B quand on n'a pas de gaz à introduire.

Ensemble de l'appareil. — Les fig. 937 et 938 représentent l'ensemble de l'appareil. L'oxygène se forme dans la cornue O (fig. 938), se lave dans le flacon *f*, et se rend d'abord dans le gazomètre réservoir R; de là il passe, par le tube *o'' o' oo'* (fig. 938 et 937), dans un grand flacon F (fig. 937), après avoir traversé l'eau d'un flacon *f'* muni d'un tube de sûreté, qui sert en même temps à indiquer la pression. Le flacon F sert de gazomètre régulateur, destiné à fournir au calorimètre un courant constant d'oxygène. Ce gaz est déplacé par de l'eau privée d'air par l'ébullition, venant d'un vase de Mariotte V. Quand l'oxygène doit être sec, on lui fait traverser un flacon D rempli d'acide sulfurique concentré, puis des tubes en U, remplis de ponce sulfurique ou de morceaux de potasse calcinée, *e*.

Derrière le flacon F, on en voit un autre, surmonté également d'un vase de Mariotte. Cette partie de l'appareil est destinée aux gaz combustibles qui peuvent être mis en contact avec l'eau. Quand ces gaz doivent être secs, ils traversent des appareils semblables à ceux qui servent à dessécher l'oxygène. Les gaz qui ne peuvent être recueillis sur l'eau sont renfermés dans des sacs en caoutchouc chargés de poids.

Les produits gazeux de la combustion, à leur sortie du calorimètre C, passent à travers divers tubes *abTt'* (fig. 937 et 938), dans lesquels une partie est absorbée. Le restant se rend, avec l'oxygène non employé, dans une cloche P reposant sur l'eau, pour être utilisée de nouveau ou analysée, s'il y a lieu.

La température du calorimètre est donnée par un thermomètre dont on fait la lecture au moyen d'un cathétomètre K. Pour éviter les erreurs, une pointe fixée à la lunette parcourt une division *r* pareille à celle du thermomètre. Ce thermomètre et celui qui plonge dans la couche d'eau enveloppante, sont fixés au plateau triangulaire supérieur (fig. 937) et à une barre horizontale qui se voit au-dessus du calorimètre C.



Fig. 936. — 1/5.

Correction des pertes extérieures de chaleur. — On observait de minute en minute l'excès de la température du calorimètre sur celle de la couche d'eau enveloppante. Des expériences préalables ayant fait voir que, pour un excès de 1° , le refroidissement du calorimètre était de $0^{\circ},002$ par minute, on

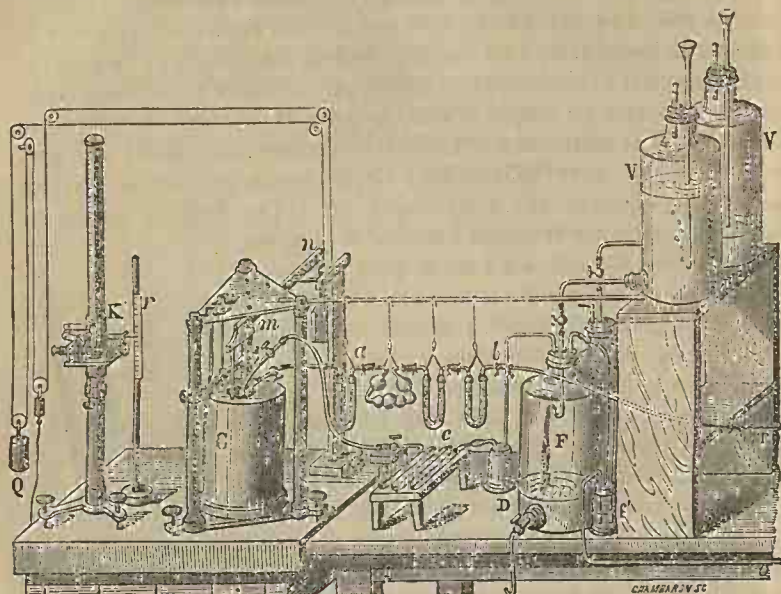


Fig. 937.

multipliait par $0^{\circ},002$ les excès obtenus pendant chaque minute, et l'on ajoutait leur somme à la température finale du calorimètre.

1303. Dispositions pour les divers combustibles. — Quand il s'agit de brûler un gaz, on fait arriver l'oxygène par le tube o'' (fig. 935). Le gaz à brûler est enflammé à l'extrémité du bec H (fig. 936), qu'on introduit aussitôt dans la tubulure t' (fig. 935). Dans le cas du gaz hydrogène, qui ne produit que de l'eau, on ferme l'extrémité c du serpent, qui devient inutile (fig. 934). L'augmentation de poids de la chambre fait connaître le poids de l'eau formée, d'où l'on déduit celui de l'hydrogène brûlé.

Pour la combinaison de l'hydrogène avec le chlore, on fait arriver ces deux gaz par la tubulure t' au moyen du bec hem (fig. 939), dont l'extrémité est représentée à droite sur une plus grande échelle. Le chlore arrive par le tube de verre e , $e'o$, et l'hydrogène par les tubes de cuivre h et m , dont le dernier enveloppe le tube e . Les gaz se rencontrent en o et se mélangent dans le petit cylindre de platine op , ayant 2^{mm} de diamètre. Un petit morceau d'éponge de platine e demeure incandescent dans le jet, et l'empêche de s'éteindre. L'acide

chlorhydrique formé est amené dans un flacon contenant de l'eau, qui le dissout ; l'excès d'hydrogène sort à travers un tube rempli de ponce mouillée, qui arrête les dernières traces d'acide. On analyse ensuite la dissolution en la précipitant par l'azotate d'argent, et, de la quantité de chlorure d'argent on déduit le poids du chlore, et par suite celui de l'hydrogène employé.

Corps liquides ou fusibles. — Ces corps sont placés dans de petites lampes de cuivre L (fig. 940), de 2^{cm} cubes de capacité environ, suspendues au bouchon b (fig. 935). Les corps gras solides sont placés dans une lampe un peu plus grande, à mèche d'amiante, G (fig. 940). Après l'avoir allumée, on l'introduit dans la chambre à combustion (fig. 935), dont on ajuste le bouchon b, et qu'on enfonce aussitôt dans l'eau du calorimètre, et l'on fait arriver l'oxygène par le tube o''.

Le soufre se met dans un petit creuset de porcelaine C (fig. 940), pouvant en contenir 4 à 5 grammes. On l'allume au moyen d'une pointe de charbon rouge,

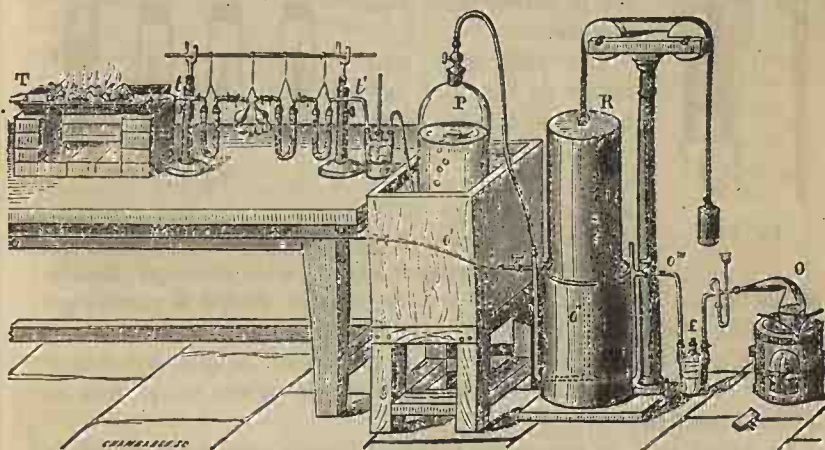


Fig. 938.

et on l'introduit rapidement. Pour que la combustion soit complète, il faut que l'oxygène tourbillonne autour du creuset, ce qu'on obtient en dirigeant le gaz tangentiellement aux parois de la chambre, qui ne doit pas contenir d'eau, dont la présence provoquerait la formation d'un peu d'acide sulfurique, et qui dissoudrait de l'acide sulfureux.

1309. Carbone. — Le charbon de bois, privé d'hydrogène par la calcination, se met dans un cylindre de platine P (fig. 940), dont le fond est percé de trous. On l'allume en jetant un très-petit fragment de charbon allumé, par la tubulure l' (fig. 935) ; on ajuste aussitôt le bec O (fig. 936), et l'oxygène traverse la masse du charbon.

Les charbons difficiles à brûler sont placés dans un petit panier en fil de platine *t* (fig. 940), que l'on introduit dans le cylindre P, où on l'entoure de charbon de bois. On tient compte de la chaleur dégagée par ce dernier, dont le poids et le pouvoir calorifique sont connus d'avance.

MM. Favre et Silbermann ont constaté un fait, déjà observé par MM. Dumas et Stas sur le diamant; c'est que la combustion du charbon donne toujours un peu d'oxyde de carbone. Pour tenir compte de cette cause d'erreur, on a commencé par mesurer la chaleur de combustion de l'oxyde de carbone mêlé avec un tiers environ d'hydrogène. Après avoir traversé le serpentin, les produits de la combustion déposaient leur eau dans un tube rempli de ponce sulfurique *a* (fig. 937), et l'acide carbonique était absorbé dans les tubes *ab*, dont l'augmentation de poids représentait le poids d'acide carbonique formé, d'où l'on déduisait celui de l'oxyde de carbone brûlé. Le poids de l'hydrogène était déduit de celui de l'oxyde de carbone, en analysant une portion du mélange, recueillie par un tube de dérivation avant son entrée dans le calorimètre; et l'on calculait la chaleur qu'il avait produite.

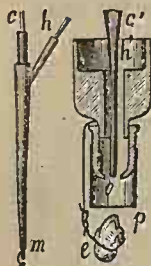


Fig. 939.

Cela posé, pour tenir compte de l'oxyde de carbone formé dans la combustion du carbone, on fait passer ce gaz, qui n'est pas absorbé en *ab* (fig. 937), dans un tube de verre T (fig. 938) rempli d'oxyde de cuivre chauffé, qui le fait passer à l'état d'acide carbonique, absorbé par les tubes *tt'*. L'augmentation de poids de ces tubes, excepté le premier qui est un tube à dessiccation, fait connaître le poids de l'acide carbonique formé, et, par suite, celui de l'oxyde de carbone sorti du calorimètre. On ajoute à la chaleur dégagée dans ce calorimètre, celle que cet oxyde de carbone eût produite en brûlant séparément.

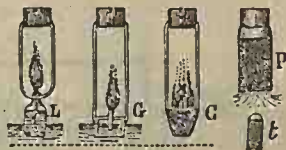


Fig. 940.

En opérant ainsi, on suppose que la chaleur dégagée reste la même quand la combinaison se fait à plusieurs reprises, ou tout d'un coup (1305). C'est ce qui a lieu pour l'acide carbonique. En effet, soit *x* et *y* les chaleurs de combustion du carbone, quand il forme de l'acide carbonique ou de l'oxyde de carbone; *p* et *q* les poids de carbone transformés en acide et en oxyde, et enfin *c* le nombre total de calories dégagées. Une autre expérience donnera les quantités *p'*, *q'*, *c'*, et l'on aura les deux équations: $px + qy = c$, et $p'x + q'y = c'$, d'où l'on tirera les valeurs de *x* et de *y*. En mettant à la place de *p*, *q*, *c*, *p'*, *q'*, *c'* les données de deux expériences, on a trouvé $x = 8097$, et $y = 2397,8$. Or, 1^{er} de charbon, en passant à l'état d'acide carbonique, dégage 8080^{cal}; et une quantité d'oxyde de carbone contenant 1^{er} de carbone en dégage 5607. La différence, 2473, entre ces deux nombres coïncide sensiblement avec la valeur de *y*, surtout

si l'on remarque que les erreurs qui affectent les données des expériences s'accroissent, au lieu de se compenser, dans les valeurs de x et y , quand on résout les équations. On voit que la première oxydation du carbone dégage moins de chaleur que la combustion de l'oxyde formé; ce que l'on peut attribuer au passage du carbone à l'état gazeux, lorsque l'oxyde prend naissance.

1310. Résultats. — Voici le tableau des principaux résultats trouvés; la calorie étant rapportée au gramme :

NOMS DES SUBSTANCES			NOMS DES SUBSTANCES				
	FORMULES chimiques.	CHALEUR dégagée par 1 gr. de combustible.		FORMULES chimiques.	CHALEUR dégagée par 1 gr. de combustible.		
Hydrogène.....	»	34462	Cire d'abeilles.....	»	10496		
Id. avec chlore.....	»	23783,3	Alcools.	Esprit de bois.....	c^2n^2, n^2o^2	5307	
Oxyde de carbone.....	»	2403		Alcool de vin.....	$(c^2n^2)^2, n^2o^2$	7184	
Gaz des marais.....	c^2n^4	13063		Alcool amylique....	$(c^2n^2)^5, n^2o^2$	8958,6	
Carbone	Charbon de bois.....	»		8080	Alcool éthérique....	$(c^2n^2)^{16}, n^2o^2$	10629,2
	Charbon de sucre....	»	8039,8	Acétone.....	$(c^2n^2)^3, o^2$	7303	
	Id. des cornues à gaz..	»	8047,3	Acide formique.....	c^2n^2, o^4	2000	
	Graphite naturel....	»	7796,6	Acide acétique.....	$(c^2n^2)^2, o^4$	3505	
	Id. des hauts fourneaux	»	7762,3	Acide butyrique....	$(c^2n^2)^4, o^4$	5647	
	Diamant.....	»	7770,1	Acide valérique....	$(c^2n^2)^5, o^4$	6439	
Id. chauffé à 500°..	»	7878,7	Acides (C^{12}), O^4	Acide éthérique....	$(c^2n^2)^{16}, o^4$	9316,5	
Soufre.	Soufre natif opaque..	»		2261,8	Acide stéarique....	$(c^2n^2)^{19}, o^4$	9716,5
	Id. cristall. depuis 1 h.	»		2258,6	Formiate de méthylène	$(c^2n^2)^2, o^4$	4197,4
	Id. fondu depuis 7 ans.	»		2216,8	Acétate de méthylène.	$(c^2n^2)^3, o^4$	5342
	Id. mou, après 1/2 h.	»	2258,4	Ether formique.....	$(c^2n^2)^3, o^4$	5278,8	
Sulfure de carbone.....	»	3400,5	Éthers composés.	Ether acétique.....	$(c^2n^2)^4, o^4$	6292,7	
Bicarbores d'hydrogène	Gaz oléfiant.....	$(c^2n^2)^2$		11857,8	Butyrate de méthylène	$(c^2n^2)^5, o^4$	6798,5
	Amylène.....	$(c^2n^2)^5$		11491	Ether butyrique....	$(c^2n^2)^6, o^4$	7090,9
	Paramylène.....	$(c^2n^2)^{10}$		11303	Valérate de méthylène.	$(c^2n^2)^6, o^4$	7375,6
	Carbure, bouillant à 180°.....	$(c^2n^2)^{11}$		11262	Ether valérique....	$(c^2n^2)^7, o^4$	7834,9
Céténe.....	$(c^2n^2)^{16}$	11055		Acétate d'amylène...	$(c^2n^2)^7, o^4$	7971,2	
Métamylène.....	$(c^2n^2)^{20}$	10928		Ether valéramylique..	$(c^2n^2)^{10}, o^4$	8543,6	
Éthers simpl.	Ether sulfurique..	c^4n^5o		9027,6	Blanc de baleine....	$(c^2n^2)^{32}, o^4$	10342
	Ether amylique....	$c^{10}n^{11}o$		10188	Essence de citron.....	$c^{10}n^8$	10959
					Id. de térébenthine....	$c^{20}n^{16}$	10852
					Térébène.....	$c^{20}n^{16}$	10662

Remarques. — On voit que le pouvoir calorifique de l'hydrogène diffère à peine de celui qu'a obtenu Dulong; on peut donc avoir toute confiance dans l'exactitude de cette valeur.

Carbone. — Les différentes variétés de carbone ont donné des nombres

différents, tous plus grands que ceux de Dulong, qui n'a pas tenu compte de l'oxyde de carbone formé. Les espèces qui dégagent le plus de chaleur sont celles qui ont la plus grande capacité calorifique, et, par conséquent, les moins denses (1064); cependant, le graphite et le diamant, qui ont des capacités très-différentes, donnent à peu près le même résultat.

Soufre. — Le soufre, étudié à différents états physiques, a conduit à la même loi. Il faut seulement remarquer que le soufre mou, obtenu en versant du soufre pâteux dans l'eau (1103), et le soufre cristallisé en prismes, dégagent la même quantité de chaleur, quoique leurs capacités diffèrent notablement.

Sulfure de carbone. — Si l'on fait la somme des quantités de chaleur qui seraient dégagées séparément par la combustion du carbone et du soufre qui entrent dans la composition de 1^{er} de sulfure de carbone, on trouve un nombre qui surpasse la chaleur de combustion de ce dernier, de 254^{cal},2. Il en est de même pour le gaz des marais. On voit donc que la chaleur de combustion d'un corps composé n'est pas égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par ses éléments. Cependant, cette égalité a lieu pour le gaz oléfiant.

Loi des carbures d'hydrogène, etc. — Pour les carbures d'hydrogène de la formule $(C^2H^2)^n$, chaque fois que les éléments du carbure $(C^2H^2 = 4 \text{ vol.})$ entrent une fois de plus, la chaleur de combustion diminue de 37^{cal},5. Ainsi, le composé $C^{10}H^{10}$ dégagant en brûlant 11491^{cal}, le paramylène $C^{20}H^{20}$ en dégage $11491 - 5 \times 37,5 = 11303,5$. — M. Berthelot, en considérant les équivalents chimiques, au lieu des poids, est arrivé à cette loi plus générale : « Quand on passe d'un carbure, et plus généralement d'un composé quelconque à son homologue supérieur, la chaleur de combustion du poids équivalent augmente en moyenne de 157000 calories. »

Alcool. — L'alcool absolu et l'alcool hydraté à 80° de l'alcoomètre, présentent sensiblement la même chaleur de combustion.

Corps isomères. — On nomme ainsi des composés différents formés des mêmes éléments combinés dans les mêmes proportions; par exemple, l'acide acétique et le formiate de méthylène, $(C^2H^2)^2,0^4$; le térébène et l'essence de térébenthine, $C^{20}H^{16}$. Pour expliquer pourquoi ces composés n'ont pas les mêmes propriétés, on admet que les atomes y sont groupés d'une manière différente. On aurait pu penser que ces corps présenteraient la même chaleur de combustion; mais on voit sur le tableau qu'il n'en est pas ainsi. En général, les éthers composés donnent plus de chaleur que les acides qui leur sont isomères; ce fait montre une fois de plus que la chaleur de combustion d'un composé n'est pas égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par ses éléments.

1311. EFFETS CALORIFIQUES DANS LES DÉCOMPOSITIONS. — La décomposition des corps, ordinairement accompagnée d'une absorption de chaleur, peut aussi en dégager, comme l'ont constaté MM. Favre et Silbermann, auxquels sont dues les expériences que nous allons citer.

Protoxyde d'azote. — Quand le charbon brûle dans ce gaz, la quantité de chaleur dégagée, 11158^{cal}, est plus grande que lorsqu'il brûle dans l'oxygène

pur, résultat déjà constaté par Dulong. L'oxygène et l'azote du protoxyde produisent donc de la chaleur en se séparant. Si l'on calcule la quantité de chaleur qui se fût dégagée dans l'oxygène pur, pour former les quantités d'acide et d'oxyde de carbone obtenues dans le protoxyde d'azote, et si l'on retranche ces quantités du nombre 11158, la différence est 1154 calories, qui représente la chaleur dégagée par l'effet de la ségrégation chimique d'une quantité de protoxyde contenant 1^{er} d'oxygène. — Ce résultat que M. Berthelot a rattaché au mode de préparation du protoxyde d'azote, peut se vérifier directement, ce gaz se décomposant nettement en azote et oxygène par la chaleur seule. Pour cela, on dispose le bouchon *b* de la chambre à combustion (*fig.* 935) comme on le voit en B (*fig.* 941). Le protoxyde arrive par le tube *a*, jusqu'au fond d'une éprouvette de platine entourée de charbon allumé *cc'*, qui reçoit l'oxygène par le tube *o*. Le protoxyde d'azote, en partie décomposé par la chaleur, parcourt un serpentin et se rend dans une cloche reposant sur le mercure. Ce gaz est ainsi séparé des produits de la combustion du charbon, qui se répandent dans la chambre à combustion. En retranchant, de la chaleur reçue par le calorimètre, celle qui est due à la combustion du charbon, on obtient la chaleur dégagée par la décomposition d'une partie du protoxyde. L'analyse du gaz recueilli sur le mercure fait connaître la proportion décomposée. On a trouvé ainsi le nombre 1090^c, qui diffère peu de 1154 cité plus haut.

Oxyde d'argent. — Quatre ou cinq grammes d'oxyde d'argent sont mis dans un petit creuset de platine; ce creuset est introduit dans le cylindre P (*fig.* 940), et entouré d'un poids connu de charbon dont la combustion fournit la chaleur qui décompose l'oxyde, chaleur qu'on retranche de celle que reçoit le calorimètre. On a trouvé ainsi que 1^{er} d'oxyde dégage en se décomposant, 22^{cal}, 1. Mais une grande partie de la chaleur de décomposition est absorbée par l'oxygène qui se sépare de l'argent, à l'état gazeux.

Carbonate de chaux. — Cette substance se traite par le même procédé. La perte de poids du creuset donne la quantité décomposée. A l'état de spath d'Islande, le carbonate de chaux absorbe 308^{cal} par gramme décomposé; à l'état d'aragonite, il y a tantôt absorption, tantôt dégagement de chaleur. Cela tient à ce que la chaleur fait changer la structure de l'aragonite (I, 492), et le changement est accompagné d'un dégagement de chaleur. Quand l'aragonite a été d'avance complètement désagrégée par la chaleur, sa décomposition absorbe 299^{cal}, 3, nombre qui diffère peu de 308 trouvé pour le spath d'Islande.

Eau oxygénée. — L'eau oxygénée produit de la chaleur en se décomposant. MM. Favre et Silbermann l'ont constaté au moyen du calorimètre à mercure *rm* (*fig.* 942). Le liquide est placé dans un tube de verre M, qu'on introduit dans le moufle de platine *m*. Un peu de noir de platine détermine la décomposition; et le gaz passant par le tube *t* replié sur lui-même, cède toute sa chaleur au



Fig. 941.

calorimètre avant de sortir du moufle. La perte de poids du tube M fait connaître la quantité d'oxygène dégagée. Voici les résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann :

		Pour 1 gr. d'oxygène.	Pour 1 gr. de substance.
Décomposition du protoxyde d'azote,	dégage	1090 cal., 5	»
— de l'oxyde d'argent,	absorbe	»	22 cal., 5
— du spath d'Islande,	absorbe	»	308
Changement de structure de l'aragonite,	dégage	»	39,1
Décomposition de l'eau oxygénée,	dégage	1303	»

1312. Chaleur dégagée par les changements de structure. — Nous avons vu qu'il y a de la chaleur dégagée dans la ségrégation de certains alliages (1129), et nous venons de voir l'influence de la transformation de l'aragonite, sur le mouvement de chaleur produit pendant sa décomposition. Le soufre dégage aussi de la chaleur quand il change de structure.

M. Regnault ayant exposé du soufre mou, à une température de 98° dans son étuve pour les capacités calorifiques (1071), l'a vu monter à 110° pendant la transformation rapide en soufre ordinaire. Quand le soufre cristallisé en prismes se change en soufre octaédrique, il y a encore dégagement de chaleur, et c'est pour cela que la chaleur de combustion des diverses variétés de soufre n'est pas la même. Mitscherlich

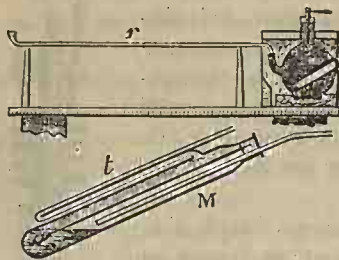


Fig. 842.

a obtenu un échauffement de plusieurs degrés, en rendant la transformation instantanée par l'immersion des cristaux prismatiques, dans du sulfure de carbone saturé de soufre. Mitscherlich a encore opéré ainsi : ayant fait fondre 50^k de soufre, il en fit cristalliser une partie, et quand la masse eut pris la température extérieure, il enleva les parties où la transformation n'était pas encore commencée, et les porta dans un vase de bois, dans lequel il les agita constamment au moyen d'un thermomètre. Ce dernier monta de 12°. Comme l'expérience dure près d'une heure, pour éviter les pertes extérieures de chaleur, le vase était transporté successivement dans des chambres de plus en plus chaudes, possédant la température indiquée par le thermomètre. Le poids et la capacité du soufre étant connus, il trouva ainsi que 1^{er} dégage en se transformant 2^{cal}, 27.

1313. Chaleur des combinaisons par voie humide. — Dans les combinaisons par voie humide, les résultats calorifiques sont compliqués des effets provenant du changement d'état des corps qui se combinent, de la combinaison avec l'eau du composé formé, de sa dissolution dans l'eau, et de la variation de capacité du mélange liquide. — Nous avons d'abord à citer les expériences de M. Hess sur les combinaisons de l'eau avec l'acide sulfurique, et de divers acides

avec différentes bases. La plupart des expériences s'exécutaient au moyen d'un cylindre kk' (fig. 943) pouvant tourner autour de son axe. On enlevait le couvercle k , et l'on versait une des dissolutions dans le compartiment ek ; l'autre dissolution se mettait dans un vase entouré par la première, et l'on replaçait le couvercle, qu'on fixait au moyen de vis, en interposant une bande de caoutchouc. Le cylindre était ensuite installé dans un calorimètre ab ; on le faisait tourner sur son axe pour mêler les dissolutions, et des lames adaptées au cylindre agitaient l'eau du calorimètre, dont l'échauffement était donné par le thermomètre t . Il était tenu compte de la capacité calorifique du mélange et des pertes extérieures de chaleur. Dans le cas de la formation des sels, les dissolutions étaient assez étendues pour que l'addition d'une nouvelle quantité d'eau ne produisit pas de chaleur sensible.

M. Andrews a principalement étudié les combinaisons des acides et des bases¹; il opérait par la méthode des mélanges.

M. Graham s'est occupé particulièrement des combinaisons des sels et de divers acides avec l'eau. Il se servait d'un vase de platine, dans lequel il plaçait l'eau, et introduisait ensuite les substances, en quantités représentant des équivalents.

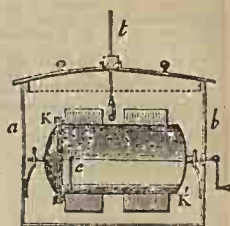


Fig. 943.

1314. MM. Favre et Silbermann ont fait un très-grand nombre d'expériences sur les combinaisons par voie humide, au moyen de leur calorimètre à mercure. Leur travail est une mine féconde où pourront puiser un jour ceux qui se proposeront de découvrir de nouvelles lois relatives à cet ordre de phénomènes.

Dissolutions dans l'eau. — Les effets calorifiques produits par les combinaisons avec l'eau étaient étudiés de la manière suivante : une petite éprouvette de verre, contenant un poids connu d'eau, était introduite dans le cylindre de platine m (fig. 942) du calorimètre à mercure, et l'on y faisait passer un poids connu de la substance à dissoudre. L'acide sulfurique était dosé au moyen d'une pipette. Les gaz, comme l'acide chlorhydrique, l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, arrivaient dans l'eau par un tube effilé; les sels étaient introduits en poudre, et l'augmentation de poids de l'eau faisait connaître celui de la matière dissoute. En se dissolvant, les sels donnent toujours du froid, excepté quand ils sont anhydres, auquel cas il y a échauffement.

Le tableau suivant contient les résultats trouvés. Les cas où il y a échauffement sont indiqués par le signe +.

Ce tableau comprend des sels insolubles ou peu solubles, pour lesquels les résultats ont été obtenus en s'appuyant sur des considérations tirées des lois de la chaleur de combinaison des acides avec les bases (1315).

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. IV, p. 316.

SELS 1 gr. dans un excès d'eau.	CALORIES	SELS 1 gr. dans un excès d'eau.	CALORIES
Sulfate de potasse.....	35,3	Carbonate de soude.....	52,7
— de soude.....	49,1	— de potasse et eau....	51,5
— d'ammoniaque.....	11,1	Phosphate de soude.....	52,3
— de chaux.....	24,7	Hypophosphate de soude....	21,9
— de baryte.....	64,4	Oxalate de soude.....	39,7
— de zinc.....	44,8	— d'eau.....	67,0
— de prot. de fer.....	12,1	— de potasse et eau....	62,1
— d'uranyle.....	+ 10,7	Tartrate de soude.....	25,2
— de potasse et eau....	25,6	— de potasse.....	17,3
— id. et d'alumine....	23,1	— d'eau.....	19,8
— id. et prot. de fer...	21,5	— de potasse et soude...	40,9
— d'ammoniaque et alumine	19,0	Chlorure de potassium.....	51,9
Azotate de potasse.....	70,5	— de sodium.....	8,9
— de soude.....	45,5	— d'ammonium.....	65,1
— d'ammoniaque.....	65,9	— de calcium.....	15,5
— de chaux.....	27,1	— de barium.....	16,9
— de strontiane.....	41,2	— de strontium.....	34,9
— de plomb.....	14,9	— de zinc.....	+ 92,2
— d'argent.....	31,1	— de fer.....	+ 58,3
Acétate de soude.....	28,1	Bich. de cuivre.....	+ 73,7
— de chaux.....	3,5	Bromure de potassium.....	37,8
— de plomb.....	14,8	Iodure de potassium.....	29,2
— de potasse et eau....	19,3	Sulfure de potassium.....	+ 96,9

L'acide sulfurique à un équivalent d'eau dégage $64^{\text{cal}},7$ en se combinant avec un second équivalent; et, si l'on ajoute de nouveaux équivalents, la chaleur dégagée par chacun d'eux va en diminuant, de plus en plus rapidement.

Les acides chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique, ont donné les nombres $449^{\text{cal}},6$, $235,6$ et $147,7$; l'acide sulfureux, $120,4$; et le gaz ammoniac, $514,3$, pour 1^{er} de gaz dissous.

1315. Formation des sels. — Commençons par les sels neutres. Il y a toujours dégagement de chaleur quand un acide se combine avec une base pour former une sel neutre. Voici comment on opérerait : une dissolution titrée de la base (c'est-à-dire contenant un certain poids de substance sèche dans un volume déterminé) était mesurée dans une pipette et introduite dans l'éprouvette de verre. L'acide n'avait pas besoin d'être dosé, quand sa dissolution et celle de la base étaient assez étendues pour que l'addition d'une nouvelle quantité d'eau n'y produisit plus de chaleur, et pour que la combinaison fût entièrement dissoute; alors il ne se formait pas de sel acide.

Quand il s'agissait d'une base insoluble, la chaleur dégagée s'évaluait par un

moyen détourné; on prenait un sel soluble de cette base, et on la précipitait par la potasse ou par l'ammoniaque. S'il n'y avait aucun changement de température, on en concluait que la potasse et l'acide du sel avaient produit, en s'unissant, autant de chaleur qu'en aurait dégagé le même acide en se combinant avec la base précipitée. S'il y avait un changement de température, il représentait une différence qu'il était facile d'interpréter.

Cette méthode a été contrôlée par le procédé direct, ce qui était indispensable, car elle suppose qu'il y a autant de chaleur absorbée quand deux corps se séparent, qu'il s'en dégage quand ils se combinent; et nous avons vu que les décompositions peuvent dégager de la chaleur (1311).

Voici une partie des résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann :

1 GRAMME DE	ACIDE SULFURIQUE	ACIDE AZOTIQUE	ACIDE CHLORHYDRIQUE	ACIDE ACÉTIQUE
Potasse.....	342	230	333	297
Soude.....	520	493	493	439
Ammoniaque.....	565	527	520	486
Baryte.....	270	202	201	174
Strontiane.....	»	»	279	»
Chaux.....	670	605	606	524
Magnésie.....	724	642	661	613
Protoxyde de fer.....	307	268	273	238
Protoxyde de manganèse.....	346	310	321	285
Protoxyde de zinc.....	253	203	202	188
Protoxyde de cobalt.....	310	262	273	244
Protoxyde de nickel.....	316	275	274	243
Bioxyde de cuivre.....	194	159	160	131
Protoxyde de cadmium.....	160	127	128	118
Protoxyde de plomb.....	102	82	101	64
Protoxyde d'argent.....	89	53	198	»
Alumine.....	644	»	»	»
Sesquioxyde de fer.....	249	»	»	»

On voit que, généralement, les acides les plus énergiques dégagent, avec la même base, le plus de chaleur. L'acide sulfurique donne le maximum, comme M. Graham l'a aussi constaté. On voit encore que les divers acides minéraux donnent, avec la même base soluble ou insoluble, des quantités de chaleur peu différentes, quand le sel formé est soluble. — Les bases anhydres ont toujours donné des résultats plus forts que les mêmes bases hydratées, à cause de la chaleur que dégage la combinaison de la base avec l'eau contenue dans l'acide. — Ajoutons que M. Berthelot a constaté, depuis, que les acides et les bases très-concentrés dégagent en se combinant plus de chaleur que lorsqu'ils sont étendus d'eau.

Sels acides. — Sels doubles. — On introduit dans le moufle du calorimètre à mercure, 1, 2, 4 ou 8 équivalents d'acide, et l'on y verse un équivalent de base. Il est à remarquer que, s'il y a assez d'eau pour que la *sel acide* qui pourrait se former ne la sature pas, la chaleur dégagée est la même que dans la formation du sel neutre; tandis que, si la liqueur est assez concentrée pour qu'il se dépose quelques cristaux de sel acide, il y a un dégagement de chaleur qui annonce la formation d'une nouvelle combinaison. Il semble donc que, lorsqu'il y a excès d'eau, l'acide peut rester en présence d'un sel neutre dissous contenant le même acide, sans qu'il y ait combinaison. — Même remarque pour les *sels doubles*: il semble aussi que deux sels capables de se combiner, ne le font pas, quand il y a trop de liquide pour que le sel double qui tend à se former puisse le saturer¹. M. Andrews avait trouvé que le passage d'un sel neutre à l'état de sel acide et que la formation des sels doubles n'étaient pas accompagnés de chaleur; c'est qu'il opérait sur des dissolutions très-étendues.

1316. Métaux avec l'oxygène, le chlore, etc. — MM. Favre et Silbermann ont fait de nombreuses expériences sur la chaleur de combinaison par voie humide, des métaux avec l'oxygène, le chlore, le brome, l'iode et le soufre. La plupart des résultats ont été obtenus par des moyens détournés, en admettant que la chaleur dégagée par la combinaison de deux corps est égale à celle qui est absorbée dans leur séparation. L'accord entre les résultats obtenus pour l'oxydation du zinc et du cuivre et ceux qu'a trouvés Dulong pour leur combustion, tend à légitimer la méthode indirecte par voie humide.

1317. Équivalents calorifiques. — En comparant les quantités de chaleur dégagées par des masses proportionnelles aux équivalents chimiques des substances qui se combinent, on a formé le tableau suivant des *équivalents calorifiques* des principaux composés binaires; c'est-à-dire des quantités de chaleur dégagées par la combinaison des équivalents chimiques des corps qui s'unissent.

MÉTAUX	OXYDES		CHLORURES		BROMURES		IODURES		SULFURES	
	dissous.	anhyd.	dissous.	anhyd.	dissous.	anhyd.	dissous.	anhyd.	dissous.	anhyd.
Hydrogène	»	34462	40192	23783	28404	9322	15004	-3606	»	2741
Potassium.	76238	»	97091	100960	85678	90188	72479	77268	50969	45638
Sodium...	73510	»	94326	94847	82616	»	69143	»	48340	»
Zinc.....	»	42451	56567	50296	»	»	»	»	»	20940
Fer.....	»	37328	53350	49651	»	»	»	»	»	47753
Cuivre.....	»	21885	34500	21885	»	»	»	»	»	9133
Plomb.....	»	27675	»	44730	»	32802	»	23208	»	9556
Argent....	»	6143	»	34800	»	25648	»	18651	»	5524

¹ Cette manière de voir a été confirmée par M. Pasteur, par une méthode fondée sur les propriétés de la lumière polarisée, dont nous parlerons dans l'optique.

On voit que les composés qui donnent le plus de chaleur en se formant, sont les plus stables. Par exemple, l'équivalent calorifique du chlorure d'argent qui est très-stable est beaucoup plus grand que celui de l'oxyde d'argent, qui est très-facile à décomposer. M. Joule énonce une loi analogue quand il dit que la quantité de chaleur produite par la combustion de l'équivalent d'un corps est proportionnelle à son affinité pour l'oxygène¹. — La considération des équivalents calorifiques conduit à placer les métalloïdes et les métaux étudiés, relativement à l'énergie de leurs affinités, dans l'ordre suivant qui s'accorde assez bien avec celui qu'on déduit des phénomènes chimiques.

Métalloïdes	Chlore,	brome,	oxygène,	iode,	soufre.
Métaux.....	Potassium,	sodium,	zinc,	fer,	plomb, cuivre, argent.

Il est évident que, pour comparer avec sûreté les équivalents calorifiques, il faut considérer les combinaisons à l'état de dissolution; car, dans l'état solide, plusieurs causes peuvent faire varier les résultats (1310). En procédant ainsi, MM. Favre et Silbermann ont vu qu'en retranchant, des équivalents calorifiques des *oxydes* des divers métaux, ceux de leurs *chlorures*, on trouve sensiblement les mêmes différences; ce qui a lieu également pour les *bromures*, *iodures*, *sulfures*. De même, si l'on retranche les équivalents calorifiques des combinaisons des divers métalloïdes avec un métal, des équivalents de leurs combinaisons avec un autre métal, le reste, ou *module*, est le même, quel que soit le métalloïde considéré.

Cette loi des modules suppose que tous les composés que l'on compare sont dissous; or, il en est, comme le chlorure d'argent, le chlorure de plomb, qui sont insolubles. Pour qu'ils satisfassent à la loi, on les considère théoriquement à l'état de dissolution; voici comment: L'expérience prouve que les acides *azotique*, *chlorhydrique*, *bromhydrique* et *iodhydrique* dégagent la même quantité de chaleur quand ils se combinent avec une même base, soluble ou non, pour donner des *sels solubles* (1315). Si donc il se forme un sel insoluble, on prendra pour la chaleur de combinaison, celle qui correspond à un sel soluble de même base, formé avec un autre acide. La différence entre ce nombre théorique et le nombre réel serait alors attribuée à l'influence de l'état solide du composé formé. Cette différence représenterait donc la chaleur absorbée dans la dissolution *fictive* de ce composé. C'est ainsi qu'ont été obtenus les résultats du tableau ci-dessus (1315) qui se rapportent à des sels insolubles.

Il faut cependant remarquer que cette loi des modules est appuyée sur un trop petit nombre de faits; car on voit dans le tableau, qu'on ne peut la vérifier que

¹ Il peut paraître singulier que les équivalents calorifiques qui correspondent au zinc et au fer soient plus élevés que ceux qui correspondent à l'hydrogène; mais l'étonnement cesse quand on sait que l'eau se décompose par la chaleur, à une température à laquelle résistent l'oxyde de zinc et le sesquioxyle de fer (1301).

sur l'*hydrogène*, le *potassium* et le *sodium*, corps dont les affinités sont tellement semblables, qu'on n'est pas en droit de généraliser. En outre, la loi donnerait, comme l'a remarqué M. Soret, pour équivalent calorifique de l'eau, 15000 calories de moins que l'expérience directe.

1318. Des lois de la chaleur des combinaisons chimiques. — Dans les actions chimiques, la chaleur que l'on évalue provient de plusieurs causes réunies : ainsi, il y a des changements d'état accompagnés d'un mouvement de chaleur latente, des décompositions, des changements de volume, des dissolutions. Il n'est donc pas étonnant qu'on n'ait pu faire ressortir de loi générale de la comparaison des résultats obtenus ; mais on est arrivé à plusieurs lois particulières, que nous allons énumérer :

1° La chaleur dégagée dans une combinaison est égale à celle qui serait absorbée dans la décomposition du composé formé. Cette loi a été vérifiée dans un grand nombre de cas, principalement par MM. Th. Wood, Joule, Favre et Silbermann, souvent en évaluant la chaleur absorbée dans les décompositions, par un procédé *électro-chimique* sur lequel nous reviendrons. Mais cette loi semble n'être pas générale, puisqu'il y a de la chaleur dégagée dans certaines décompositions (1314).

2° La quantité de chaleur dégagée ou absorbée pendant une combinaison est égale à la somme algébrique des quantités de chaleur qui seraient dégagées ou absorbées dans chacun des phénomènes chimiques ou physiques produits pendant qu'elle s'accomplit, si ces phénomènes avaient lieu séparément les uns des autres. Cette loi a été vérifiée dans un assez grand nombre de cas pour qu'on ait le droit d'attribuer les anomalies qu'elle présente à l'incertitude de quelques données ou à la superposition, quand on fait la somme, des erreurs qu'elles contiennent.

Cette loi explique pourquoi la chaleur de combustion d'un composé est généralement inférieure à la somme des chaleurs de combustion de ses éléments (1305). C'est qu'il y a à tenir compte du mouvement de chaleur occasionné par la séparation des éléments du composé avant leur combustion. Cette loi explique aussi les différences entre les chaleurs de combustion des corps isomères (1310), des diverses variétés de charbon, de carbonate de chaux, de soufre (1312).

3° La chaleur dégagée est la même quand une combinaison se fait tout d'un coup ou à différentes reprises. Cette loi, établie par Dulong (1305), peut être regardée comme une conséquence de la précédente.

4° Quand une combustion produit un gaz dont le volume est le même que celui de l'oxygène, la chaleur dégagée ne dépend pas de la tension, et est la même dans l'air et dans l'oxygène pur.

D'autres lois ont été énoncées par divers physiciens, mais n'ont pas été confirmées depuis. Par exemple : 1° les quantités de chaleur dégagées par l'acide sulfurique se combinant avec plusieurs équivalents d'eau seraient dans des rapports simples. MM. Graham, Abria, Andrews, ont prouvé qu'il n'en est rien (1315). — 2° Il n'y aurait pas de chaleur dégagée dans le mélange de deux

sels dissous, pris en proportions équivalentes et échangeant leurs bases et leurs acides. Mais MM. Andrews, Favre et Silbermann ont trouvé qu'il y a dégagement de chaleur quand l'un des nouveaux sels formés est insoluble, ce qui a lieu ordinairement, et ce qu'explique le passage de l'un des sels à l'état solide. La *thermo-neutralité* se vérifie dans la double décomposition du sulfate de fer et de l'acétate de potasse, qui ne donne pas de composé insoluble. — 3^o Les équivalents des diverses bases dégageraient la même quantité de chaleur en se combinant avec le même acide; ce que MM. Favre et Silbermann ont trouvé inexact. — 4^o Les équivalents des différents acides, combinés avec une même base soluble ou insoluble, dégageraient la même quantité de chaleur. A cette loi, énoncée par M. Andrews, MM. Favre et Silbermann ont apporté certaines restrictions : par exemple, il faut que le sel formé soit soluble dans l'eau. Du reste, cette loi n'est qu'approximative et ne s'applique qu'aux acides minéraux (1315).

Des recherches savantes et étendues sur la thermo-chimie ont été faites par plusieurs physiciens habiles, depuis la découverte de la théorie mécanique de la chaleur, en vue d'éclairer, par les mouvements de chaleur produits, les réactions compliquées, et les circonstances de la formation de divers composés, particulièrement des composés organiques, dont la constitution est généralement obscure. C'est en s'appuyant sur les lois établies et en utilisant les nombres déterminés par divers observateurs, qu'on a pu poursuivre ces études de chimie si importantes, et qui ont déjà conduit à des résultats très-remarquables.

1319. Applications à l'industrie. — Les principaux combustibles usités dans l'industrie sont : l'*anthracite*; la *houille*, le *coke*, le *lignite*, le *bois*, la *tourbe*. Dans ces derniers temps, on a chauffé des chaudières à vapeur au moyen de l'alcool, du pétrole. L'emploi du gaz d'éclairage pour chauffer, se répand de plus en plus, soit dans l'industrie, soit dans les usages domestiques. Depuis un temps immémorial, on utilise dans divers pays, par exemple en Chine, du gaz inflammable (gaz des marais), qui s'échappe du sol dans certains endroits. On pratique des trous de sonde auxquels on ajuste des tuyaux qui conduisent le gaz dans les maisons ou dans les ateliers, et l'on utilise la flamme pour faire cuire les aliments, la chaux, les briques, et même pour éclairer.

La houille étant le combustible le plus employé dans l'industrie, on conçoit qu'elle ait été l'objet de nombreuses recherches calorimétriques. Les plus étendues et les plus soignées ont été faites par MM. Scheurer-Kestner et Ch. Meunier, sur les houilles d'une vingtaine de provenances différentes, et sur six variétés de lignites¹. L'échantillon, prélevé sur une grande masse de matière pilée et bien mélangée, de manière à avoir un résultat moyen, était brûlé dans le calorimètre à combustions vives de MM. Favre et Silbermann (1307), modifié de manière à pouvoir opérer sur la substance finement pulvérisée. Les valeurs obtenues sur les houilles brutes, c'est-à-dire souillées des matières étrangères

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXI, p. 436 et XXVI, p. 80.

qui s'y trouvent naturellement, ont varié, suivant les provenances et les qualités, de 7036 à 9432 calories, pour 1^{er} de houille. Comme exemple, nous citerons les houilles du Creusot, qui ont donné les résultats suivants, qui sont les plus élevés :

<i>Grasses.</i>	<i>Mi-grasses.</i>	<i>Maigres.</i>	<i>Anthraciteuses.</i>
9432 ^{cal}	9189	9084	9265

On voit que les houilles grasses sont celles qui donnent le plus de chaleur. Les lignites, excepté les lignites gras, en donnent moins que les houilles.

Méthode de Berthier. — Les grandes différences qui existent entre les résultats donnés par les différentes variétés de houille forcent à faire fréquemment des essais directs sur celles que l'on a à employer. Il est évident que l'on ne peut, dans la pratique, employer les procédés calorimétriques compliqués qui donnent une grande précision. Il suffirait de connaître un procédé simple, expéditif et suffisamment sûr.

La méthode de M. Berthier remplit à peu près ces diverses conditions; elle s'appuie sur la proportionnalité entre les quantités de chaleur dégagées par les combustibles et les quantités d'oxygène absorbées. Cette loi n'est pas vraie en général (1302); mais quand il s'agit de combustibles se présentant au même état physique, comme la houille, le bois, la tourbe, on peut la regarder comme suffisamment approchée, d'autant mieux que MM. Dauriac et Sahuquié ont trouvé qu'elle s'applique bien aux combustibles ayant des propriétés chimiques analogues, comme les corps gras, les alcools, les métaux de la même section.

On cherchera donc quelle quantité d'oxygène emploie le combustible pour brûler, et voici par quel moyen : On met dans un creuset de terre siliceuse, 1^{er} de combustible réduit en poudre ou en limaille fine, et mêlé de 20 à 40^{es} de litharge ou oxyde de plomb, et l'on met au-dessus, 20 à 30^{es} de litharge pure. Le creuset, à moitié plein, doit être couvert. On chauffe vivement dans un fourneau à calcination, et l'on donne un dernier coup de feu, de manière que l'excès de litharge forme un verre, en s'unissant à une partie de la matière du creuset. Quand celui-ci est refroidi, on le casse et l'on en sépare facilement un culot de plomb qui se détache nettement de la scorie qui est au-dessus, parce que celle-ci contient de la silice empruntée au creuset. On pèse le plomb, et l'on déduit de son poids celui de l'oxygène qu'il a abandonné. La quantité de chaleur dégagée est évidemment proportionnelle au poids de ce métal, qui est égal à $\frac{4}{33}$ du poids de charbon pur nécessaire pour le séparer en réduisant la litharge. Si donc P est le poids du plomb, et c le pouvoir calorifique du charbon, la quantité de chaleur dégagée sera $x = \frac{4}{33} P \times c = 212,5 P$, en prenant pour la valeur de c le nombre 7224.

Quand on connaît la valeur calorifique d'un combustible, on peut lui comparer celle d'un autre, en brûlant successivement dans un même foyer des poids égaux de ces combustibles, et comparant les échauffements communiqués à une même

masse d'eau. Ce procédé ne donne qu'une grossière approximation, la fraction de chaleur cédée à l'eau variant avec l'état de division des combustibles et avec la rapidité de la combustion.

Le tableau qui suit contient les pouvoirs calorifiques des combustibles les plus usités, la plupart obtenus par la méthode de Berthier :

COMBUSTIBLES	CALORIES pour 1 gramme.	COMBUSTIBLES	CALORIES pour 1 gramme.
Charbon de chêne.....	7624 à 7670	Lignite.....	4320 à 4830
Braise.....	5972 — 7670	Lignite passant au bitume.	» 6580
Anthracite.....	6800 — 7300	Asphalte.....	» 7500
Huiles grasses.....	6730 — 7370	Bois.....	» 4314
Houille sèche.....	» 6230	Tourbe.....	» 4300

Ces nombres, généralement trop faibles, sont nécessairement approximatifs. On n'a pas distingué les différentes espèces de bois, l'expérience montrant que, à poids égal, ils dégagent sensiblement la même quantité de chaleur, ou du moins que les différences ne dépassent pas celles qu'on trouve en opérant sur plusieurs échantillons d'une même espèce. On conçoit que les bois légers, le liège, le coton, etc., dégagent autant de chaleur que les bois les plus denses, quand on sait que ces matières ont la même composition chimique, abstraction faite des petites quantités de substances minérales qu'ils contiennent et qui forment la cendre.

Il ne faut pas confondre la *quantité* de chaleur dégagée par les diverses espèces de bois avec la *température* qu'ils peuvent produire : celle-ci dépend de leur densité et de l'activité de la combustion. La *tourbe* dégage presque autant de chaleur que le bois; cependant, elle ne donne qu'une faible température, ce qui tient à son état spongieux et à l'humidité qu'elle contient. On a essayé de faire disparaître ces inconvénients en la desséchant par la chaleur et en la comprimant. MM. Kingsfort et Holland ont imaginé de réunir les deux opérations en une seule, en comprimant fortement dans des moules, la tourbe desséchée, pendant qu'elle est chaude, après l'avoir broyée au moyen de machines spéciales. Elle est alors plus dense que l'eau, ne contient que 6 à 7 pour cent d'humidité, chauffe fortement et brûle sans répandre d'odeur incommode.

CHAPITRE VIII

THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR
OU THERMODYNAMIQUE

Ex nihilo nihil; nihil in nihilo.
(Cité par R. MAYER.)

§ 1. — DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

I. Transformation de la chaleur en travail, et réciproquement.

1320. Définitions. — Après avoir passé en revue les propriétés de la chaleur, les effets qu'elle produit sur les corps, les circonstances dans lesquelles elle prend naissance, nous allons, en nous appuyant sur les faits et les lois exposées, faire connaître comment on est parvenu aujourd'hui à réunir sous un même principe les théories éparses de la chaleur. La partie de la science où l'on s'occupe spécialement de cette grande question est la *thermodynamique* ou *théorie mécanique de la chaleur*. Elle a pour objet principal l'étude des relations qui existent entre la chaleur et le travail mécanique. Cette partie nouvelle et importante de la physique prend son point de départ dans l'opinion, à laquelle nous avons fait souvent allusion, que la chaleur est un mode particulier de mouvement (817), et les discussions et les développements auxquels on s'est livré dans cet ordre d'idée, sont venus à leur tour confirmer *à posteriori* la justesse de ce point de départ.

1321. Historique. — Pendant longtemps, la chaleur a été considérée comme une espèce particulière de matière; cependant, l'idée de l'attribuer à un mouvement, à une certaine agitation des éléments des corps, se trouve, sous forme d'intuition vague, dans les spéculations de certains philosophes de l'antiquité. Au dix-septième siècle, cette idée se dégage d'une manière un peu moins confuse. F. Bacon, vers 1620, dans son *novum organum*, dit que l'essence de la chaleur est le *mouvement expansif*, non d'ensemble et de toute la masse, mais de chacune des molécules. D'après Locke, vers 1666, ce qui dans la sensation est chaleur, n'est dans le corps chaud que du mouvement. Au commencement

du dix-huitième siècle, D. Bernouilli, dans son *hydrodynamique*, esquissa une théorie des gaz qui se rapproche beaucoup de celle que les déductions de la thermodynamique ont fait adopter depuis (1342); mais l'importance n'en pouvait être alors soupçonnée, les faits qui auraient pu la rendre vraisemblable n'étant pas alors suffisamment connus.

En 1798, les expériences remarquables de Rumford, puis celles de Davy (1269), en faisant voir que le frottement donne indéfiniment de chaleur, ont fourni un argument solide aux partisans de la chaleur considérée comme mouvement, et cette opinion prit assez de consistance pour que Laplace et Lavoisier, dans leur mémoire sur la chaleur, tout en adoptant l'opinion contraire, de la matérialité du calorique, aient cru devoir en exposer le principe. Toutefois, on n'avait pas encore énoncé la possibilité du changement de la chaleur en travail et réciproquement, lorsque, vers 1800, Montgolfier, d'après Seguin, affirma cette transformation réciproque, et imagina même un appareil, nommé *pyro-bélier*, dans lequel le mouvement était produit par une quantité constante d'air que l'on échauffait pour augmenter son élasticité, et à laquelle on restituait la chaleur perdue par son expansion, pour la faire agir de nouveau. Mais les idées de Montgolfier passèrent inaperçues; elles étaient en contradiction avec les doctrines régnautes sur la manière d'agir de la vapeur dans les machines à feu.

La diffusion rapide de ce genre de moteur, l'intérêt qu'on avait à connaître le rapport entre la chaleur fournie et le travail réalisé, rappela l'attention sur ce sujet. Sadi Carnot, en 1824, dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, proposa une théorie, développée depuis par Clapeyron, dans laquelle il admettait que la chaleur ne faisait que traverser la machine sans éprouver de perte, la vapeur jouant simplement le rôle de véhicule. Ainsi, la chaleur contenue dans la vapeur entrant dans le corps de pompe, devait se retrouver en entier, quand elle en sortait pour se précipiter dans l'atmosphère ou dans un condenseur. Cette théorie est en contradiction formelle avec l'expérience. Cependant les noms de S. Carnot et de Clapeyron figureront toujours dans l'histoire de la thermodynamique, parce qu'on leur doit l'invention ou le perfectionnement des méthodes de raisonnement au moyen desquelles la science nouvelle a pu prendre un rapide essort.

Enfin, en 1839, Seguin aîné, dépositaire des idées de son oncle Montgolfier, soutint, dans son ouvrage sur *l'influence des chemins de fer*, que l'effet mécanique de la vapeur est la conséquence d'une dépense de chaleur, et que la quantité qui disparaît dans le passage à travers la machine est toujours proportionnelle à cet effet¹. Il en est de même des gaz qui, dilatés par la chaleur, font mouvoir des machines. Cette manière de voir trouva d'abord peu de partisans; mais l'idée était lancée, elle faisait silencieusement son chemin, et bientôt on vit se produire un phénomène dont l'histoire des sciences présente plus d'un exemple: en trois pays différents, trois chercheurs éminents, étrangers les uns

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XXV, p. 420.

aux autres, J. R. Mayer, médecin à Heilbronn, M. Colding, ingénieur à Copenhague, et M. Joule, à Manchester, en Angleterre, arrivèrent presque en même temps à établir le changement de la chaleur en travail mécanique, et du travail en chaleur; ils donnèrent même les premières évaluations approximatives de la quantité de travail qui représente l'équivalent d'une calorie.

Dès lors, les bases de la thermodynamique étaient fondées, les physiciens et les géomètres travaillèrent à l'envi à en développer les diverses parties, les phénomènes de la chaleur, jusque là sans lien commun, vinrent se ranger sous un même principe, qui embrasse même les faits de la lumière, de l'électricité et du magnétisme, si bien que la thermodynamique d'après le sens propre du mot, n'est déjà plus qu'une branche d'une science plus générale qui embrasse presque tous les phénomènes de la nature. On fut bientôt amené à distinguer le travail intérieur dans les corps, et en le comparant au dégagement de chaleur, dans les divers cas où les molécules sont ébranlées, on put se rendre compte de ce qui se passe dans une multitude de phénomènes chimiques, et éclairer d'une manière inespérée les obscurités de la constitution intime de la matière. Si la science ne marche encore dans cette voie que d'un pas mal assuré, on entrevoit du moins des relations probables et des explications possibles, là où l'on en était réduit à des hypothèses à peu près gratuites.

Nous allons d'abord montrer, par des exemples variés, que toutes les fois que du travail mécanique semble détruit, il y a apparition de chaleur, et réciproquement, que toutes les fois que de la chaleur disparaît, il y a du travail produit.

1322. I. Chaleur produite par dépense de travail. — Nous avons vu que le frottement, la compression, la déformation des corps, le choc, qui exigent une certaine dépense de travail, sont accompagnés d'un dégagement notable de chaleur. L'appareil de MM. Baumont et Mayer (1273) réalise une application remarquable de la production de la chaleur, par l'intermédiaire du frottement, aux dépens d'un travail mécanique proportionné. Quand les freins serrés retiennent un wagon lancé sur une pente, le travail de la pesanteur est à chaque instant combattu par leur action; mais il n'est pas anéanti, on en trouve l'équivalent dans la chaleur qui se dégage aux surfaces frottées.

Un gaz que l'on comprime s'échauffe fortement, et comme sa chaleur spécifique varie à peine avec la pression (1091), la chaleur dégagée provient bien de la destruction du travail de compression.

Dans les actions chimiques, il y a travail des molécules, qui se précipitent les unes vers les autres, et la chaleur dégagée résulte de la cessation du mouvement qui les animait, à l'instant où elles se sont arrêtées dans leurs positions relatives d'équilibre.

M. Hirn ayant lancé dans un récipient fermé plongé dans un calorimètre, de la vapeur à haute pression, dont la température était connue, et ayant calculé la quantité de chaleur qu'elle devait avoir cédée au calorimètre en se refroidissant, se liquéfiant et passant à la température finale, trouva une quantité plus faible que celle qu'avait reçue ce calorimètre; il y avait donc eu de la chaleur créée;

c'est que la vapeur arrivant avec une très-grande vitesse, sa force vive avait été détruite, puis que l'eau de condensation était en repos, en donnant naissance à une quantité de chaleur équivalente.

M. Joule a imaginé une expérience remarquable, qui montre la chaleur engendrée par perte de travail extérieur, dans des conditions curieuses où l'électricité et le magnétisme servent d'intermédiaire. Si l'on fait tourner entre les extrémités des branches d'un électro-aimant en fer à cheval animé par l'électricité (I, 592), un disque de cuivre qui ne les touche pas, on éprouve une grande résistance due à des actions électro-magnétiques que nous étudierons plus tard. Il en est de même quand on imprime simplement, à une lame de métal placée entre les deux branches, un mouvement de va-et-vient dans son propre plan. En même temps, le disque, la lame, s'échauffent et d'autant plus que le travail dépensé est plus considérable. Si l'électro-aimant ne reçoit pas l'électricité, il n'y a plus d'action électro-magnétique, par conséquent, plus de travail dépensé pour la vaincre, et il ne se dégage plus de chaleur.

L. Foucault a reproduit cette expérience au moyen des rouages qui lui servaient à mettre en mouvement son gyroscope (I, 141). La figure

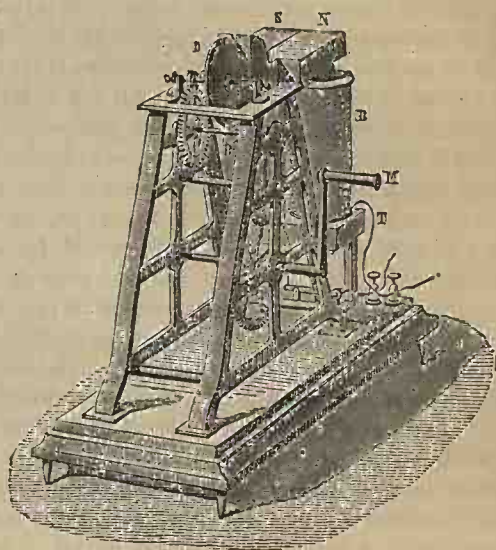


Fig. 944.

944 représente un appareil, construit par M. Salleron, au moyen duquel on répète facilement cette expérience. B est une des branches de l'électro-aimant, recevant l'électricité par le fil T. En D, est le disque tournant; il s'engage entre deux plaques de fer doux terminant deux pièces polaires S,N. On le fait tourner rapidement, par l'intermédiaire de rouages, au moyen de la manivelle M. Quand le courant passe dans l'électro-aimant, on éprouve une grande résistance, et le disque s'échauffe, ce que l'on reconnaît après l'avoir arrêté, en enfonçant un petit thermomètre dans un trou foré sur sa tranche. — M. Tyndall, ayant fait tourner un cylindre vertical entre les pièces polaires d'un électro-aimant a pu y faire bouillir de l'eau, y faire fondre divers alliages.

1323. II. Travail produit aux dépens de la chaleur. — Quand il y a travail créé, c'est qu'il disparaît de la chaleur. Par exemple, quand un gaz chaud pousse un piston par sa tension, il se refroidit. Un refroidissement peut se produire encore quand un gaz se détend sans créer de travail extérieur, dans un espace qu'on agrandit; c'est qu'il fournit le travail de sa propre détente.

Quand la vapeur traverse une machine à vapeur, elle ne la met en mouvement, elle ne produit de travail, qu'autant qu'elle perd de la chaleur, contrairement à ce que pensait S. Carnot (1321). M. Hirn a constaté ce fait au moyen d'expériences exécutées en grand sur des machines de la force de 100 à 200 chevaux. La chaleur qu'apportait la vapeur, et celle que recevait le condenseur étant évaluées, ainsi que les pertes extérieures, il trouva toujours qu'il avait disparu une certaine quantité de chaleur, représentant parfois $\frac{1}{10}$ de la chaleur apportée par la vapeur. Cette chaleur perdue avait été remplacée par le travail mécanique créé, qui était calculé en se servant de l'indicateur de Watt (1216).

On voit, d'après ce qui précède, qu'il faut tâcher, pour obtenir beaucoup de travail mécanique, de faire disparaître le plus possible de chaleur utile, en ne laissant à la vapeur, au moment où elle arrive au condenseur, qu'une faible pression. De là l'avantage de la détente. Cependant la chaleur utilisée, c'est-à-dire celle qui disparaît en se transformant en travail, est toujours une fraction très-petite de celle de la vapeur à son entrée. D'après M. Regnault ¹, dans une machine à détente sans condensation fonctionnant à 5 atmosphères, la vapeur possède à son entrée, 653 calories; elle en conserve 637 à sa sortie, c'est-à-dire qu'elle n'en a perdu que 16, ou $\frac{1}{40}$ environ. Dans une machine à condensation, à 5 atmosphères, dont le condenseur conserve une pression de 55^{mm} de mercure, la chaleur utilisée est de 34 unités, ou $\frac{1}{20}$ de la chaleur fournie par la chaudière. On voit, combien il serait avantageux de faire servir de nouveau cette vapeur, après lui avoir restitué le peu de chaleur perdue, au lieu de fournir de nouvelle vapeur. De là l'économie énorme réalisée dans les machines à vapeur régénérée, dont nous avons dit quelques mots (1214). Dans les machines à air chaud, dans lesquelles la chaleur qui reste au gaz sortant se dépose sur des toiles métalliques (1242), il y a de même une grande économie de chaleur.

1324. Expériences comparatives. — Des expériences remarquables de M. Joule prouvent qu'il ne disparaît de chaleur qu'autant qu'il se produit du travail mécanique. Par exemple, dans l'expérience des deux récipients égaux (1280), le déplacement du gaz ne modifie pas la température du calorimètre, le froid produit d'un côté étant compensé par la chaleur dégagée de l'autre; c'est qu'il n'y a pas de travail extérieur engendré. M. Joule ayant fermé le dessus du récipient vide, au moyen d'un piston chargé de poids, le gaz affluant souleva le piston; il y eut ainsi travail produit, et le calorimètre indiqua une perte de chaleur proportionnée au poids et au déplacement du piston. — En faisant arriver l'air comprimé dans une cloche remplie d'eau plongée dans le calorimètre, il y

¹ Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris, t. XXXVI, p. 676.

eut encore perte de chaleur, à cause du travail employé à refouler l'eau et à vaincre la pression atmosphérique.

M. Tyndall lance sur un thermomètre, ou sur la pile de Melloni, un jet d'air sortant d'un récipient où il est comprimé; l'appareil thermométrique indique que le jet est froid, ainsi que le récipient; le gaz intérieur s'étant refroidi en fournissant le travail par lequel l'atmosphère est refoulée. Mais si le jet d'air est chassé d'un soufflet, le travail est fourni par la force qui rapproche les tablettes, et le gaz intérieur ne se refroidit plus; on remarque même que la pile reçoit de la chaleur, qui provient du choc de l'air sur sa base, et de la destruction du mouvement de cet air, qui peut être brûlant quand le choc est fort.

Quand on comprime un métal, il y a dégagement de chaleur, et quand on étire une barre elle se refroidit, comme l'a constaté M. Edlund. La force de tension écarte d'abord la première tranche, et les autres s'avancent vers la première sous l'influence de l'élasticité, produisent un travail auquel répond une disparition de chaleur. — Le caoutchouc présente une anomalie remarquable; si on l'étire, il s'échauffe, et assez pour produire une impression de chaleur quand on l'appuie sur les lèvres. Cette exception perd de son importance quand on la rapproche du raccourcissement singulier qu'éprouve une barre de caoutchouc tendue, lorsqu'on l'échauffe (999), et quand on sait que sa densité augmente pendant qu'on l'étire, comme l'a prouvé M. Hirn.

1325. Équivalent mécanique de la chaleur. — Des expériences que nous venons de citer, et de beaucoup d'autres qu'on aurait pu y joindre, il résulte que toutes les fois que du travail disparaît, une certaine quantité de chaleur correspondante prend naissance, et *vice-versa*. On exprime ce résultat, en disant que le travail et la chaleur se *transforment* l'un dans l'autre, et que le mouvement anéanti en apparence, n'a fait que se communiquer, en produisant un autre mouvement particulier, celui qui constitue la chaleur. De même, ce dernier se transforme en mouvement de translation quand il semble détruit. Il ne faut pas prendre à la lettre les mots se *transforme*; ce n'est là qu'une manière de s'exprimer; tout ce que nous voyons, c'est qu'il y a substitution d'un mode de mouvement à l'autre.

Si cette substitution réciproque a lieu réellement, il doit y avoir un rapport constant entre les quantités de chaleur et de travail qui se remplacent mutuellement, quels que soient les systèmes de corps, le mode d'expérience, les agents intermédiaires, au moyen desquels se fait la substitution. C'est précisément ce qui a lieu, comme nous allons le voir. En partant de là, M. Joule a nommé *équivalent mécanique de la chaleur* ou *équivalent thermique du travail* la quantité de travail qui est engendrée par une *calorie*, ou qui peut la produire en disparaissant à son tour. C'est par la découverte de cette *équivalence* entre le travail et la chaleur, que Mayer, M. Colding et M. Joule, ont, chacun de leur côté, posé les bases de la thermodynamique, science qui s'est développée si rapidement depuis. Nous allons exposer, les principales expériences par lesquelles le principe de l'équivalence a été complètement démontré.

II. Mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur.

1326. Beaucoup de physiciens se sont appliqués à déterminer la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur, valeur dont l'importance devient chaque jour plus grande, à cause de l'usage de plus en plus fréquent qu'on en fait, soit dans les recherches théoriques, soit dans certaines applications industrielles. Dès 1830, Séguin aîné, en partant du travail de la détente des gaz, en avait donné une valeur qui diffère peu de celle qui est admise aujourd'hui. Mayer, dans ses premiers Mémoires, en a aussi donné une évaluation approchée, par divers moyens; puis, M. Colding, en partant du frottement. Mais c'est surtout M. Joule qui, par des expériences délicates, et en employant des méthodes de mesure très-variées, a bien établi la constance de ce rapport, et a ainsi affirmé et fait adopter la nouvelle science, dont les principes n'étaient compris et admis que d'un très-petit nombre de physiciens. Depuis, les expériences de mesure de l'équivalent ont été multipliées et ont prouvé surabondamment que sa valeur est indépendante du mode d'action qui sert à la déterminer.

Les différentes méthodes employées peuvent se classer sous trois chefs principaux : 1° on calcule l'équivalent, en partant de données expérimentales relatives à la compression des gaz, obtenues antérieurement; — 2° on cherche la chaleur dégagée dans les actions mécaniques produites aux dépens d'un travail connu; — 3° inversement, on cherche la quantité de chaleur dépensée pour produire un certain travail.

1327. I. Méthodes fondées sur les propriétés des gaz. — Voici d'abord la marche indiquée en 1842 par Mayer, dans son premier Mémoire. Considérons un mètre cube d'air que l'on chauffe de 273°, de manière à doubler son volume (1032), et supposons qu'une seule des faces du cube cède, en formant un piston idéal n'opposant d'autre résistance que celle qui provient de la pression P de l'atmosphère, exprimée en poids. Ce piston sera poussé de 1^m , et le travail accompli sera $T = P \times 1^m$. La quantité de chaleur nécessaire pour chauffer la masse p de l'air sera $Q = c \cdot p \cdot 273$, en représentant par c la chaleur spécifique à *pression constante*. Si le volume n'eût pas changé, pour élever la température de 273°, il eût fallu employer une quantité de chaleur égale à $q = c' \cdot p \cdot 273$, c' étant la chaleur spécifique à *volume constant*. La différence $Q - q = (c - c') p \cdot 273$ représentera donc la chaleur dépensée pour soulever le piston; or, on a, d'après Dulong $(c : c') = 1,42$; donc, $Q - q = 0,2957 \cdot c \cdot p \cdot 273$. En prenant c égal à 0,24, d'après M. Regnault, p égal à $1^k,293$, on trouve $Q - q = 24,6$. Si la pression est de 760^{mm}, on a $T = P \cdot 1^m = 10336^{kil}$, et, en divisant cette valeur par 24,6, on trouve, en nombre rond, 420^{km}, pour le travail équivalent à une calorie.

Person a calculé l'équivalent en s'appuyant sur ce résultat, qu'une masse de gaz ne perd pas de chaleur en s'étendant dans un espace vide (1280). Considérons 1 mètre cube d'air à 0°, sous la pression de P kil. par mètre carré, et

supposons qu'on l'échauffe de 1° , sans lui permettre de se dilater; il faudra lui fournir une quantité de chaleur égale à c' , en conservant les notations précédentes, et sa pression deviendra $P(1 + \frac{1}{273})$. Si maintenant on établit une communication avec un espace vide égal à $\frac{1}{273}$ du mètre cube, la pression redeviendra P , et la quantité de chaleur que contient le gaz n'aura pas changé. — Supposons, en second lieu, qu'on échauffe de 1° le même volume d'air à 0° et sous la pression P , en lui permettant, cette fois, de se dilater librement; il faudra lui fournir une quantité de chaleur égale à pc . Le volume sera devenu $1 + \frac{1}{273}$, sous la pression P et à la température de 1° , comme dans le cas précédent, où la chaleur fournie était égale seulement à pc' . Dans le second cas, la dilatation a produit le travail $P\frac{1}{273}$, en agissant contre la pression P , tandis que dans le premier il n'y a pas eu de travail produit. La différence $P(c - c')$ représente donc la chaleur employée à accomplir le travail $P\frac{1}{273}$. Par conséquent, le travail produit par une unité de chaleur sera $\frac{1}{273}P : p(c - c')$. En adoptant les mêmes données que ci-dessus, on trouve 424^{km} .

L'exactitude de ce résultat dépend essentiellement de celle du rapport $c : c'$; et c'est ce qui a motivé la plupart des recherches faites par divers physiciens, notamment par M. Regnault, pour en obtenir une bonne valeur, soit au moyen des effets de la compression ou de la détente de l'air (1283), soit en partant de la mesure directe de la vitesse du son (I, 591). C'est, entre autres, en vue de déterminer l'équivalent thermique que MM. Tresca et Laboulaye avaient entrepris leurs grandes expériences sur la détente de l'air (1283).

Nous verrons plus loin (1246) des calculs remarquables de M. Bourget, prouvant l'existence de l'équivalent, et en donnant la valeur.

1228. II. Évaluation par destruction de travail. — M. Joule a appliqué ce mode d'évaluation de différentes manières¹. Il s'est d'abord appuyé sur la compression des gaz : On comprime de l'air sec, à 22 atmosphères environ, dans un récipient de cuivre plongé, ainsi que la pompe foulante, dans l'eau d'un calorimètre. Après 300 coups de piston, on observe l'élévation de température de l'eau. Pour évaluer la partie de l'échauffement due au frottement du piston, on fait sortir l'air du récipient, puis on donne 300 nouveaux coups de piston, après avoir supprimé la communication de la pompe avec l'atmosphère. L'élévation de température est alors due au frottement seul; mais ce frottement n'étant pas le même que dans le cas où le piston comprime de l'air, et des expériences directes ayant fait voir comment la chaleur produite varie quand on laisse de l'air sous le piston, après avoir supprimé la communication avec l'atmosphère et avec le récipient, on peut faire une correction convenable. Le travail employé à comprimer le gaz se calcule au moyen de la loi de Mariotte, en supposant connues la course et la section du piston, ainsi que les pressions initiale et finale du gaz. Par ce moyen, M. Joule a trouvé, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, la valeur moyenne 444^{km} . Il faut que le gaz suive la loi de Mariotte; autrement,

¹ *Phil. magaz.*, mai 1845; et *Annales de chimie et de physique*, 3^e s., t. XXXV, p. 421.

un travail moléculaire s'ajouterait au travail extérieur. C'est ainsi que M. Regnault a trouvé, avec les gaz faciles à liquéfier, un équivalent dépassant de $\frac{1}{8}$ environ celui que lui ont donné les gaz permanents.

Dans une autre série d'expériences, M. Joule faisait passer de l'air comprimé, d'un récipient dans une cloche pleine d'eau. La température s'abaissait dans le récipient; et il comparait la quantité de chaleur disparue au travail accompli.

Frottement des liquides. — M. Joule s'est servi de l'appareil déjà décrit (1271), représenté en coupe (fig. 906), et dont on voit l'extérieur en *c* (fig. 945). L'axe des palettes qui agitent l'eau est mis en mouvement par un cordon *rp* qui s'enroule sur le cylindre *r* et sur une poulie *p*, mise elle-même en mouvement par le poids *a*, et dont l'axe est supporté par des roues croisées comme celles de la machine d'Atwood. Un second cordon, placé à l'opposé du cordon *rp*, agit de même sur le cylindre *r*, et est sollicité par un poids égal à *a* et disposé de la même manière. Pour faire l'expérience, on montait les poids au moyen d'une manivelle, et, après avoir noté

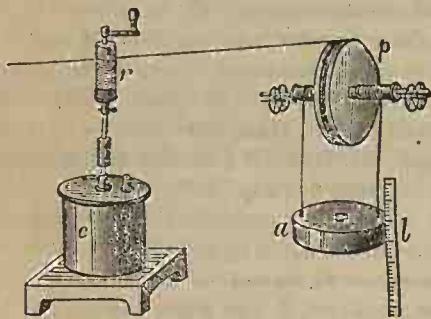


Fig. 945.

la température du vase *c*, on les laissait descendre jusqu'au plancher du laboratoire. On répétait vingt fois cette opération, on constatait l'élévation de température de l'eau, et l'on calculait le nombre de calories dégagées. On tenait compte des pertes extérieures en partant de la marche du thermomètre, suivie pendant un temps égal à la durée de l'expérience. Le travail des poids s'évaluait en multipliant

leur valeur par le chemin parcouru dans la descente vingt fois répétée. Pour obtenir le travail transmis à l'agitateur, il fallait retrancher la portion absorbée par les frottements. Pour cela, on séparait cet agitateur du cylindre *r*, et l'on réunissait les deux poulies au moyen d'un même cordon s'enroulant sur ce cylindre de manière que les poids se fissent équilibre. On cherchait alors quel poids il fallait ajouter à l'une des masses *a*, pour qu'elle descendit d'un mouvement uniforme. Le travail de ce poids additionnel était égal au travail absorbé par les frottements. La valeur trouvée par ce moyen a été de 430^{km} avec l'eau, et de 432^{km} avec le mercure.

M. Hirn, qui a fait beaucoup d'expériences importantes sur la mesure de l'équivalent¹, a employé le frottement de l'eau, en faisant tourner un cylindre de laiton de 1^m de long et de 0^m,3 de diamètre, dans un manchon de même matière dont son axe traversait les bases par des boîtes à étoupe. De l'eau entraît

¹ Exposition de la théorie mécanique de la chaleur, par A. Hirn (1875), t. I.

régulièrement par une de ces bases, et sortait par l'autre. On en mesurait la température à l'entrée et à la sortie, et l'on faisait en sorte qu'elle fût, à l'entrée, autant au-dessous de la température ambiante qu'elle était au-dessus à la sortie. La masse d'eau mise en contact avec les surfaces étant connue, on calculait facilement la quantité de chaleur dégagée par le frottement du cylindre sur l'eau et de celle-ci sur la surface intérieure du manchon, qui tendait à tourner sous l'influence de ce dernier frottement. On s'opposait à ce mouvement au moyen d'un levier adapté perpendiculairement au manchon, et chargé de poids convenables. On avait ainsi une sorte de frein de Prony, servant à évaluer le travail (I, 78), et l'on tenait compte du frottement de l'axe dans les boîtes à étoupe. Six expériences consécutives, faites avec des vitesses de 60 à 600 tours par minute, et sur des quantités d'eau différentes, ont donné pour moyenne le nombre de 432^{km}.

4329. Frottement des solides. — La fig. 946 fait connaître la disposition employée par M. Joule. Un disque de fonte *a* s'emboîte dans un plateau fixe *rr* présentant un rebord qui s'appuie sur le contour conique du disque. On peut faire varier la pression au moyen de la tige *b* et du levier *L*. Le tout est plongé dans un calorimètre, et le disque *a* reçoit un mouvement de rotation sur lui-même, au moyen d'un système de cordons et de poids disposés comme ceux de la figure 945. L'équivalent obtenu, au moyen de cet appareil, a été de 432 kilogrammètres.

M. Favre est arrivé par le frottement des solides, et en employant son calorimètre à mercure (1061), au nombre 426¹. Au fond d'un moufle de 12^{cm} de diamètre étaient fixés, par des vis, deux montants verticaux soutenant un cylindre d'acier, sur les deux moitiés duquel étaient enroulés en sens inverse deux cordons passant sur des poulies, et tendus chacun par un poids de 2^k. En ajoutant, d'un côté ou de l'autre, un poids additionnel de 10^k, on faisait tourner le cylindre sur lui-même. Le mouvement était régularisé par un pendule conique extérieur au moufle, mené par une roue dentée fixée à l'une des extrémités de l'axe. À l'autre extrémité était fixé un disque de cuivre de 80^{cm} de diamètre et de 8^{mm} d'épaisseur, sur lequel frottait un frein de forme particulière. Ce frein était formé d'un anneau brisé à charnière, dont on pouvait rapprocher les deux moitiés au moyen d'une vis agissant sur deux oreillons assez longs pour sortir hors du moufle. Cinq lames, intérieures à l'anneau et formant ressort de manière à empêcher les soubresauts, pressaient le contour du disque. Le travail était déduit de la descente répétée du poids additionnel, qu'on transportait alternativement d'un cordon à l'autre, et qui parcourait chaque fois 12^m avec une vitesse de 2^{cm} par seconde.

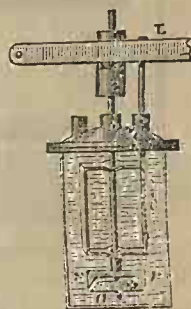


Fig. 946.

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XLVI, p. 337.

1330. Écrasement du plomb. — Citons encore les expériences suivantes faites par M. Hirn, au moyen de l'appareil (fig. 947). B est un béliet de fer pesant 350^k , suspendu par deux paires de cordes; et M, une masse de grès, pesant 941^k , suspendue de la même manière et garnie d'une pièce de fer *e* servant d'enclume. Quand on éloigne le béliet B, il se déplace parallèlement à lui-même en s'élevant, et quand on l'abandonne à lui-même, il retombe et vient écraser, contre l'enclume *e*, un cylindre de plomb *p*, dans lequel est ménagée une cavité pouvant recevoir un thermomètre. L'enclume cède un peu; son recul, *r* est indiqué par un index qu'elle pousse et qui reste en place. On en déduit facilement la hauteur $h' = l - \sqrt{l^2 - r^2}$ à laquelle elle a été soulevée, *l* étant la distance de son centre de gravité au niveau des points d'attache des cordes. Si H représente la hauteur à laquelle on a élevé le béliet, et *h* celle à laquelle il a remonté après le choc, le travail qu'il aura fourni sera $P(H - h)$,

P étant son poids. L'enclume en cédant et s'élevant de *h'* en a reçu une partie Mh' ; de sorte que la quantité de travail absorbée par le plomb sera

$$T = P(H - h) - Mh'.$$

Pour connaître la chaleur dégagée par le choc, on enlevait rapidement le cylindre de plomb, on le suspendait par des cordons, *c*, qui y étaient attachés d'avance, et l'on versait de l'eau

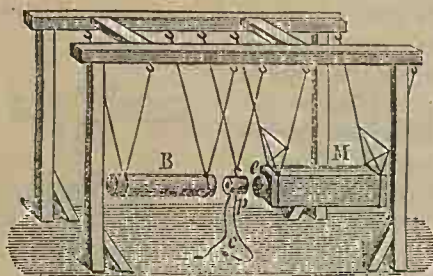


Fig. 947.

à 0° dans la cavité. On y plongeait aussitôt un thermomètre, et l'on en suivait le refroidissement pour faire les corrections. La moyenne de 6 résultats, qui différaient entre eux de moins de 5 unités, a été de 425^k^m .

1331. III. Équivalent déduit de la dépense de chaleur. — Dans les expériences ci-dessus, on cherche la chaleur dégagée au moyen d'une dépense de travail. On a aussi expérimenté en renversant la question, et en cherchant le travail produit par une certaine dépense de chaleur. Mais les expériences faites en suivant cette marche sont beaucoup moins variées, à cause de la difficulté de mesurer la quantité de chaleur fournie, et de la faire agir sans une notable déperdition difficile à évaluer.

M. Hirn, après avoir montré que la vapeur perd de sa chaleur en traversant une machine (1323), est revenu à plusieurs reprises sur ces grandes expériences, en en perfectionnant les détails, dans le désir de déterminer une nouvelle valeur de l'équivalent ¹. La machine étant en marche bien régulière, il mesurait le travail du piston au moyen de l'indicateur de Watt (1216). La chaleur apportée

¹ Exposition de la théorie mécanique de la chaleur, par G. A. Hirn (1875), t. I, p. 54.

par la vapeur était calculée par la formule de M. Regnault, donnant la chaleur totale $\lambda = 606,5 + 0,305 t$. La température t était déduite de la tension dans la chaudière, tension que l'on observait de 10 en 10 minutes afin d'avoir une moyenne convenable. On multipliait λ par le poids de la vapeur employée, poids que l'on déduisait, soit de la quantité d'eau d'alimentation de la chaudière, dont on maintenait le niveau aussi constant que possible, soit de l'augmentation de l'eau du condenseur, qu'on jugeait avec soin avant son entrée et après sa sortie, en prenant les températures pour calculer la chaleur déposée par la vapeur.

Les résultats obtenus ainsi, dans de nombreuses expériences, pour l'équivalent mécanique de la chaleur diffèrent notablement entre eux; ce qui s'explique par les immenses difficultés du sujet et les incertitudes nombreuses des évaluations multiples qu'il comporte. Il est à remarquer néanmoins que la moyenne des résultats dignes de confiance a été de 413 calories. Mais ce que les expériences de M. Hirn ont bien prouvé c'est la proportionnalité entre la perte de chaleur et le travail réalisé, quand on fait varier, dans une même machine, la quantité et la tension de la vapeur dépensée par minute, et l'étendue de la détente.

Méthode par l'électro-magnétisme. — M. Joule avait déduit l'équivalent, de l'échauffement produit dans les actions électro-magnétiques (1322), mais ce moyen laisse beaucoup d'incertitudes. M. Favre, en faisant également intervenir l'électricité, a obtenu de bons résultats en cherchant le travail produit par une dépense connue de chaleur, chaleur qu'il évaluait au moyen du calorimètre à mercure¹. — Cinq des sept mouffes d'un grand calorimètre à mercure renferment chacun un des couples d'une petite pile formée de zinc et platine et d'acide sulfurique. Cette pile donne un courant électrique qui circule dans de gros fils de cuivre n'offrant pas de résistance à l'électricité. Ces fils peuvent être mis en communication avec un *électro-aimant* (1, 592) faisant partie d'une petite *machine électro-magnétique*, dont nous apprendrons plus tard à connaître le mécanisme, et qui est plongée dans le moufle d'un second calorimètre. Cette machine peut, au moyen de poulies et de cordons placés en dehors du moufle, faire monter un poids. L'action chimique dégage de la chaleur dans chaque couple de la pile, et nous verrons que la quantité totale de chaleur que l'on trouve dans tout le circuit, y compris la pile, est toujours la même; s'il y a échauffement en quelque point, par suite de résistances qu'éprouve l'électricité, la chaleur dégagée en ce point, est en moins dans la pile. M. Favre a trouvé que la somme des quantités de chaleur reçues par les deux calorimètres, pour un équivalent de zinc dissous, était de 18667^{cal}, quand la machine était arrêtée; de 18657^{cal}, quand elle marchait sans soulever de poids, et de 18374 seulement, quand elle soulevait un certain poids. La différence entre le premier et le dernier de ces nombres représente la quantité de chaleur transformée en travail. En divisant ce travail par le nombre de calories perdues, on a trouvé pour valeur moyenne de l'équivalent, 426 kilogrammètres.

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XLV, p. 36.

1332. Invariabilité de l'équivalent. Valeur adoptée. — Nous n'avons donné que les principales méthodes par lesquelles on a cherché à déterminer la valeur de l'équivalent. Quand on compare tous les résultats trouvés, on remarque des divergences assez fortes, surtout quand ils ont été obtenus par des méthodes différentes; ce qui s'explique principalement par l'inégalité dans l'importance des causes d'erreur qu'elles comportent. C'est ce qui paraîtra évident quand nous aurons démontré que, si l'on trouve un rapport constant entre le travail et la chaleur, dans chaque série d'expériences faites avec un même appareil, ce rapport devra être nécessairement le même quand on passera d'un appareil à un autre¹. Soit, par exemple, E l'équivalent déduit du frottement. Une quantité de chaleur Q dégagée par ce moyen aura exigé une dépense de travail QE. La quantité de chaleur Q, dépensée dans une machine à vapeur, devrait reproduire le travail QE, si l'équivalent E' déduit du travail de la vapeur était égal à celui qu'on déduit du frottement. Supposons qu'il n'en soit pas ainsi, et que l'on ait $E' = E(1 + n)$. Les Q calories introduites dans la machine produiraient donc la quantité de travail $QE(1 + n)$, et le volant recevrait un accroissement de force vive (I, 82) égal à $2QE(1 + n)$. On pourrait employer cette force vive à produire du frottement, qui dégagerait la quantité de chaleur $Q(1 + n)$, puisque le travail QE en dégage Q. Cette quantité de chaleur $Q(1 + n)$, étant à son tour dépensée dans la machine, accroîtrait la force vive du volant de $2QE(1 + n) \times (1 + n)$ ou $2QE(1 + n)^2$. En répétant cette série d'opérations, on pourrait accumuler indéfiniment de la force vive dans le volant, et le mouvement perpétuel, dont l'impossibilité est mathématiquement démontrée, serait réalisé. — Nous avons supposé n positif; s'il était négatif, le travail QE irait en se perdant sans produire de travail équivalent, ce qui serait contraire à toutes les expériences.

Il n'est donc pas possible que E diffère de E'; et, les mêmes raisonnements s'appliquant à tous les modes de transformation considérés deux à deux, on voit qu'il ne peut exister qu'une seule valeur de l'équivalent de la chaleur.

D'après la comparaison des valeurs les plus dignes de confiance obtenues par des méthodes très-variées, les physiciens ont adopté généralement, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, le nombre

$$E = 425 \text{ kilogrammètres.}$$

§ 2. — THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

1333. — Le phénomène de la transformation de la chaleur en travail et du travail en chaleur peut être regardé comme prouvé, maintenant qu'il est établi qu'une calorie qui disparaît ou qui prend naissance, correspond toujours au même nombre de kilogrammètres engendrés ou disparus.

En s'appuyant sur ce fait d'expérience irrévocablement acquis, on a cherché à

¹ OEuvres de Verdet, t. VII, *Théorie mécanique de la chaleur*, I, p. 63.

bien définir la nature de la chaleur et sa manière d'être dans les corps, à rendre compte des effets qu'elle produit sur la matière, et à expliquer enfin une foule de phénomènes dans lesquels elle joue un rôle. Mais, ici, nous sortons des faits certains pour entrer dans le domaine de la science spéculative, où les conjectures et les hypothèses, quoique très-vraisemblables et appuyées sur des déductions et des expériences nombreuses, ne doivent pas cependant être confondues avec les vérités affirmées par l'observation directe. En pareille matière, la formule : *Tout se passe comme si telle chose avait lieu*, doit souvent être entendue, et c'est ce que nous supposerons dans la suite de ce chapitre.

1334. Chaleur dans les corps. — Pour expliquer la substitution de la chaleur au travail et du travail à la chaleur perdue, on a considéré, comme nous l'avons souvent dit, la chaleur comme un mouvement. Dans les transformations réciproques que nous observons, ce sont deux espèces de mouvement qui naissent l'un de l'autre en se transmettant, directement ou par des intermédiaires plus ou moins apparents. L'explication de la chaleur dans les corps, par le mouvement vibratoire de leurs molécules reçoit ainsi une confirmation nouvelle du principe de l'équivalent.

Il reste à expliquer comment s'effectue cet échange entre les forces vives des deux espèces de mouvement. Remarquons d'abord que, dans ces sortes de transformations, il y a toujours des déplacements relatifs de molécules, dont l'agitation joue un rôle évident. Dans les cas mêmes où intervient l'électricité, et où il n'y a pas contact entre les corps qui réagissent les uns sur les autres, il se produit des mouvements moléculaires dans les masses qui subissent les actions électromagnétiques, comme nous le verrons plus tard. Dès lors, les choses se passent comme dans les vibrations des corps élastiques, qui engendrent le son en ébranlant l'air environnant, et qui peuvent aussi être mis en vibration par communication des vibrations de l'air. Seulement, ici, au lieu d'avoir affaire à des vibrations moléculaires se manifestant à l'extérieur par des mouvements de totalité, il nous faut considérer des vibrations plus intimes se communiquant à l'éther qui remplit les pores intermoléculaires, et se propageant ensuite au dehors dans celui qui est répandu dans l'espace; de même que les vibrations des corps élastiques se propagent dans l'air, véhicule ordinaire du son. Le mode de propagation de la chaleur par les vibrations de l'éther est une conséquence du principe de l'identité des radiations lumineuses et calorifiques d'égale réfrangibilité (889); car la lumière consistant, d'après le système des ondulations, dans les vibrations de l'éther, il doit en être de même de la chaleur rayonnante.

Application au rendement des machines. — Nous avons vu que dans une machine dont le mouvement est uniforme, le *travail moteur* est, à chaque instant, égal au *travail résistant* (I, 79); mais on n'utilise jamais qu'une fraction du travail moteur, qu'on appelle *l'effet utile*; le reste est absorbé par les *résistances passives*, parmi lesquelles figure en première ligne le frottement. On ne savait autrefois comment expliquer la perte de travail qu'il occasionne; on avait bien essayé d'invoquer l'arrachement de parcelles aux surfaces frottées, qui fait

qu'elles s'usent peu à peu, et l'on regardait la chaleur dégagée comme un phénomène accessoire n'ayant aucun rapport avec le travail perdu. Mais nous pouvons dire aujourd'hui que le travail absorbé par le frottement n'est pas anéanti, et qu'il s'est transformé en une quantité de chaleur égale à autant de calories qu'il y a de fois 425 kilogrammètres de disparus. Un point obscur de la théorie des machines est donc ainsi élucidé de la manière la plus satisfaisante. En même temps, le principe de la *conservation de l'énergie* se trouve complété et confirmé par la découverte de l'équivalence de la chaleur et du travail. *Rien ne se perd, rien ne se crée*, quand il s'agit de mouvement comme lorsqu'il s'agit de matière; et l'adage *ex nihilo nihil, nihil in nihilum*, s'applique aussi bien au mouvement qu'à la matière.

Nous allons voir comment ces idées se prêtent à l'interprétation du rôle que joue la chaleur dans les corps.

1335. Température, dilatation. — La température d'un corps n'est autre chose que l'état vibratoire des molécules pondérables ou impondérables qui le constituent, et la force vive de ce mouvement représente l'*intensité calorifique*. Pour faire vibrer ainsi les molécules, il faut leur communiquer, par l'intermédiaire de l'éther, les vibrations d'une source plus ou moins éloignée; ou les ébranler directement par une action mécanique, en dépensant une certaine quantité de force vive, ou, ce qui revient au même, de travail (I, 82). Les choses se passent comme lorsqu'on fait vibrer une cloche, une barre, une corde, par le choc, le frottement transversal ou longitudinal; on dépense du travail qui se retrouve dans le corps vibrant.

Les vibrations calorifiques peuvent se transformer en travail extérieur; ce travail constitue d'abord la *dilatation*; mais si on lui oppose des obstacles à vaincre, le mouvement vibratoire est affaibli dans une plus grande proportion, c'est-à-dire qu'il y a plus de chaleur dépensée. Il en est de même des vibrations sonores, qui peuvent projeter du sable, des corps mobiles, en perdant de leur intensité par la communication de leur force vive.

Un corps se refroidit en faisant participer à son mouvement vibratoire, qui s'affaiblit alors, soit les corps en contact, soit l'éther environnant. C'est ainsi qu'un diapason communique ses vibrations au corps élastique sur lequel on l'appuie, mais en perdant de son intensité vibratoire; car il cesse de vibrer plus tôt que lorsqu'il n'est pas appuyé. On conçoit bien aussi comment l'équilibre de température s'établit entre plusieurs corps.

La *dilatation* en elle-même, c'est-à-dire l'augmentation de volume que produit la chaleur est la conséquence d'une plus grande amplitude des vibrations intérieures; de même qu'un corps sonore occupe plus d'espace quand il vibre, et oppose sa résistance aux corps qu'on en approche, à une certaine distance de l'endroit qu'occupe sa surface quand il ne vibre pas. Nous avons vu comment on peut, au moyen d'un sphéromètre, mesurer cet allongement, à l'extrémité d'une verge qui vibre longitudinalement, et calculer l'effort considérable qu'il faudrait exercer pour le reproduire par tension directe (I, 763).

La température résultant des vibrations des molécules, il faut dépenser, pour la faire monter, une certaine quantité de travail, représentée par la quantité de chaleur fournie, c'est-à-dire par la *chaleur spécifique*. Cette quantité de chaleur varie suivant la nature et l'arrangement des molécules; de même que pour faire vibrer les corps sonores, il faut dépenser plus ou moins de travail mécanique, suivant leur densité, leur structure, leur élasticité. L'égalité de capacité des atomes des corps simples prouve qu'il faut fournir la même quantité de travail pour les ébranler au même degré. Mais, comme il faut dépenser un certain travail pour les écarter et les déplacer, on conçoit que l'égalité ne se vérifiera pas rigoureusement; et l'on a ainsi une explication de la belle loi des capacités des atomes et des anomalies qu'elle présente (1074). — Du reste, M. Buff, en calculant, pour le verre, l'eau et divers métaux, l'élevation de température capable de produire une dilatation égale à l'effet d'une compression ou traction donnée, a trouvé que la quantité de chaleur absorbée par l'écartement des molécules n'est qu'une fraction très-petite de la chaleur totale fournie.

Il résulte de ce qui précède que, si l'on fournit à un corps une quantité Q de chaleur, il reçoit une quantité d'énergie QE, en représentant par E l'équivalent mécanique. Une partie, V, de cette énergie est employée à augmenter l'intensité des vibrations moléculaires; c'est du mouvement communiqué. Une autre, D, sert à déplacer les molécules, elle produit le *travail interne*; et le reste, T, fournit le travail destiné à vaincre les résistances extérieures s'il y en a; il représente le *travail externe*. On aura donc

$$QE = V + D + T.$$

Si T est nul ou insensible, et si l'on regarde D comme négligeable, toute l'énergie sera employée à faire vibrer les molécules, et la loi des capacités des atomes se vérifiera complètement.

Quant à expliquer pourquoi la chaleur spécifique des *liquides* est généralement supérieure à celle des *solides*, quoique la cohésion y soit bien plus faible, nous renverrons aux développements que nous avons donnés antérieurement sur ce sujet par anticipation (1078).

1336. Changements d'état. — Quand on veut faire fondre un corps, il faut, pour séparer ses molécules et vaincre la cohésion, lui fournir une certaine quantité de force vive. On conçoit comment les vibrations arrivées à un certain degré d'amplitude, peuvent disjoindre les molécules, quand on se rappelle le phénomène de la division en nombreuses tranches, d'une baguette de verre que l'on fait fortement vibrer dans le sens de sa longueur (I, 763).

Le travail nécessaire à la fusion peut être emprunté à des actions mécaniques, comme le frottement, le choc (1274); mais, le plus souvent, il est fourni par de la chaleur extérieure, qui disparaît; de là l'hypothèse de la *chaleur latente*. Mais on voit que la chaleur qui a disparu n'existe pas dans le liquide formé, et qu'elle est au contraire anéantie, en tant que chaleur, et s'est transformée en un

travail moléculaire intérieur. — Quand le liquide se solidifie par suite d'une soustraction convenable de chaleur qui atténue les vibrations de ses molécules, elles obéissent à la cohésion, et se précipitent les unes vers les autres pour reprendre les positions relatives qui correspondent à l'état solide, avec des vitesses qui sont détruites au moment où elles s'arrêtent. Ce mouvement se transforme en une quantité de chaleur égale à celle qui avait disparu par le travail équivalent, mais de *signe contraire*, accompli pendant la fusion.

Le dégagement de chaleur qu'on observe quand un corps change de structure est dû, de même, à la destruction du travail moléculaire, au moment où les molécules s'arrêtent dans leur situation définitive.

Quand on comprime un corps qui augmente de volume en fondant, son point de fusion s'élève (1104); c'est qu'il faut lui fournir un surcroît de force vive pour vaincre la pression extérieure. Dans le cas de la glace, au contraire, qui diminue de volume en fondant, la compression ajoute son effet au travail moléculaire, qui n'a plus besoin d'être autant augmenté, et la température de fusion est abaissée. C'est par de semblables considérations que M. J. Thomson a été conduit à découvrir l'influence de la pression sur le point de fusion.

Vaporisation. — Dans le passage d'un liquide à l'état de vapeur, il se fait, aux dépens de la chaleur de ce liquide, un travail intérieur employé à vaincre la cohésion moléculaire, si bien mise en évidence par M. Donny (1151). Si le liquide s'évapore dans un espace vide indéfini, la vapeur se forme à la surface où il n'y a pas de pression du liquide à vaincre; ce dernier fournit la force vive de sa propre chaleur, et l'évaporation se fait indéfiniment, avec abaissement continu de température. C'est ainsi qu'on produit du froid par l'évaporation de divers liquides, dont on fait disparaître les vapeurs en les condensant ou en les absorbant (1135).

Si le liquide est porté à son point d'ébullition, et si la cohésion peut être vaincue avec l'aide des petites bulles de gaz qui se séparent de ce liquide (1151), la vapeur se forme par bulles, en présentant une tension égale à celle de l'atmosphère qu'elle refoule, et en absorbant une quantité de travail en rapport avec l'augmentation de volume qu'elle éprouve. — Supposons, par exemple, un litre d'eau placé au fond d'un tube de 1 décimètre carré de section : le volume de la vapeur produite est, en nombre rond, de 1700 litres (1194); l'atmosphère a donc été repoussée de 170 mètres, de sorte que le travail correspondant est de 17000 km , la pression atmosphérique en poids étant de 100^k environ par décimètre carré. Ce travail équivaut à 40 calories, nombre que l'on obtient en divisant 17000 par 425. Comme il faut 537^{cal} pour vaporiser 1^k d'eau, il reste 497^{cal} , qui ont été employées à vaincre la cohésion, et qui représentent un travail intérieur de 21425 km .

1337. Méthode des cycles. — On voit combien le travail intérieur peut être considérable. Or, dans les expériences faites pour mesurer l'équivalent, on ne peut le mesurer ni le calculer, puisque l'équivalent est l'inconnue. Heureusement, S. Carnot a imaginé une méthode qui est devenue féconde entre les mains

des géomètres, au moyen de laquelle on évite cette difficulté. Cette méthode consiste à faire que les corps qui servent de véhicule à la chaleur, après avoir éprouvé divers changements, reviennent exactement à leur état primitif, et parcourent ainsi ce qu'on appelle un *cycle fermé*. Les mouvements de chaleur produits par les changements intérieurs se sont compensés quand l'état primitif est rétabli, et il n'y a plus à tenir compte que du travail extérieur, qui peut ordinairement être mesuré plus ou moins facilement.

1338. Thermo-chimie. — On provoque le plus souvent les réactions chimiques en ébranlant les molécules au moyen de la chaleur, de la lumière, ou, en certains cas, par des chocs. Une fois l'action commencée en un point, la chaleur qui s'y dégage détermine la réaction dans les parties voisines, et ainsi de suite, de proche en proche. La chaleur dégagée provient de l'anéantissement de la force vive des molécules dissemblables, au moment où elles s'arrêtent dans leurs positions d'équilibre, après s'être précipitées les unes vers les autres. Quand un des corps est solide, il emprunte à de la chaleur le travail nécessaire pour désagréger ses molécules. Ce travail dépendant de la structure, on voit pourquoi le soufre octaédrique ou prismatique, les corps isomères, les diverses variétés de carbone, présentent des *chaleurs de combustion* différentes.

Quand on connaît la quantité de chaleur dégagée dans une réaction chimique, il n'y a qu'à la multiplier par 425 pour obtenir le travail intérieur accompli par les actions chimiques et physiques (changements d'état ou de structure, désagrégation) qui se sont produites. On pourra donc calculer ainsi le travail interne, quantité qui semblait naguère absolument impossible à connaître.

Quand il n'y a pas de travail extérieur, il est à remarquer que le résultat ne dépend que de l'état initial et de l'état final des corps en présence, quels que soient les déplacements éprouvés par leurs molécules. Du reste, toutes les lois relatives à la quantité de chaleur dégagée ou absorbée dans les réactions chimiques (1318) s'appliquent à la quantité de travail intérieur produite ou perdue, puisqu'il suffit d'introduire le facteur 425 pour passer de l'une à l'autre.

§ 3. — APPLICATIONS A LA THÉORIE DES CORPS

I. Solides et Liquides.

1339. Des mouvements moléculaires. — De la distinction du travail produit par la chaleur en *travail interne* et *travail externe*, il résulte qu'on peut diviser la thermodynamique en deux branches séparées : dans la première, qui forme déjà une science très-avancée, on compare les changements calorifiques au travail *extérieur* correspondant ; dans la seconde, on s'occupe du travail *intérieur* dans ses rapports avec la chaleur. Cette seconde branche, beaucoup moins avancée, a été l'objet d'une multitude de savants mémoires et d'un certain nombre de traités spéciaux, dans lesquels les physiiciens et les géomètres ont

appliqué toutes les ressources de l'analyse mathématique. Les notions que nous allons exposer, relatives à l'état des corps solides et liquides, et à la théorie des gaz, rentrent dans cette partie encore imparfaite de la thermodynamique.

Remarquons d'abord qu'il résulte des détails que nous venons d'exposer, sur l'identité entre la chaleur et le travail, que les atomes des corps sont animés, par la chaleur, de mouvements plus ou moins vifs qui peuvent, en s'atténuant, ou se propager dans l'intérieur d'un même corps, à la faveur de l'éther intermoléculaire, ce qui constitue la *conductibilité*, ou se communiquer à d'autres corps plus ou moins éloignés par l'intermédiaire de l'éther ambiant, ou enfin disparaître en tant que chaleur, en se transformant en travail intérieur ou extérieur. On a cherché à déterminer la nature de ces mouvements dans les trois états de la matière, et l'on a créé des hypothèses, au moyen desquelles on a cherché à retrouver les lois que l'expérience avait fait connaître, et à en découvrir de nouvelles que l'expérience devra toujours être appelée à contrôler. Ne pouvant développer ici les nombreuses théories mathématiques publiées sur ce sujet, et pour lesquelles nous renvoyons aux divers traités qui existent sur la matière¹, nous nous contenterons d'indications générales, en insistant sur certains points, de manière à donner une idée exacte de l'étendue et de la variété des questions que permet d'aborder la thermodynamique.

1340. Solides. — Nous avons déjà fait connaître (I, 175) l'hypothèse des atomes entourés d'une atmosphère d'éther condensé, et constituant ce que M. Redtenbacher a nommé des *dynamides*. Ces atomes peuvent se grouper de manière à former, avec leur atmosphère commune d'éther, une *dynamide composée*. C'est dans les dynamides que s'accomplissent les mouvements plus ou moins rapides qui déterminent les phénomènes calorifiques dans le corps; mais on n'est pas encore parvenu à se figurer nettement l'espèce de mouvement qui anime les molécules dans les solides, molécules dont on ne peut changer les positions relatives qu'en fournissant une certaine quantité de travail : par exemple, en apportant de la chaleur extérieure.

On regarde cependant comme probable² que les atomes sont groupés, dans l'état solide, de manière à former des molécules, dont les dimensions sont comparables aux distances qui les séparent. Le centre de gravité de chaque molécule oscille suivant une droite, de part et d'autre de sa position d'équilibre, en même temps que la molécule oscille autour d'un axe qui passe par son centre de gravité et présente la même direction que dans toutes les autres molécules. En même temps, les atomes qui composent la molécule éprouvent individuellement des vibrations particulières.

¹ Nous citerons les suivants comme étant écrits ou traduits en français : Grove, *Corrélation des forces physiques*; Verdet, *Thermodynamique*; Briot, *id.*; Zeuner, *id.*; Hirn, *Exposition de la théorie mécanique de la chaleur*; Tyndall, *la Chaleur comme mode de mouvement*; P. Secchi, *l'Unité des forces physiques*.

² M. Clausius, *Annales de Poggendorff*, t. C.

13-11. Liquides. — Dans l'état liquide, qui s'obtient par un accroissement de force vive, produit ordinairement par addition de chaleur, le mouvement oscillatoire autour du centre de gravité se transforme en une rotation rapide autour d'un axe changeant à chaque instant de direction; de sorte qu'il n'y a plus d'orientation des molécules, et que leurs positions relatives peuvent être très-facilement changées. En même temps, elles ne peuvent se quitter; chacune d'elles décrit une courbe dans l'espace où elle est emprisonnée par celles qui l'environnent. Il y a cependant exception pour les molécules de la surface; celles-là peuvent s'élancer au dehors avec une vitesse de projection d'autant plus grande que la température est plus élevée, et l'on a le phénomène de l'évaporation superficielle. Ces molécules qui s'échappent ainsi sont surtout celles qui sont animées en ce moment de leur plus grande vitesse. La force vive moyenne de celles qui restent est donc affaiblie, et la température s'abaisse; ce qui explique le froid produit dans l'évaporation.

Du reste, ce départ de certaines molécules superficielles peut aussi avoir lieu, ainsi qu'on pouvait le prévoir, à la surface des corps solides; par exemple, de ceux qui se *subliment* (1132). Ce phénomène est même très-fréquent, comme le prouvent les odeurs qui s'exhalent d'un très-grand nombre de solides, même de certains métaux, comme le cuivre, le plomb, l'étain, surtout quand on les chauffe. Ces vapeurs, quoique extrêmement rares, peuvent gêner quand on a besoin d'un vide poussé jusqu'aux limites du possible, comme on l'éprouve dans la construction de certains tubes, dans lesquels le vide est tel, que l'électricité ne peut les traverser. Mais vient-on à les chauffer, après le refroidissement, l'électricité peut passer, à cause de vapeurs insensibles qui se sont exhalées des mastics et même de la surface du verre, ayant conservé vraisemblablement quelques traces des substances qui ont servi à la laver. C'est à des exhalaisons semblables qu'on attribue ces empreintes connues sous le nom d'*images de Moser* que laissent certains corps sur des surfaces qui en sont restées très-rapprochées pendant longtemps. On a aussi cherché à expliquer, par de semblables exhalaisons, les mouvements qu'éprouve le *radiomètre* dans le vide sous l'influence de la chaleur, effets que nous discuterons dans l'optique.

II. Théorie des gaz.

13-12. Hypothèse de la constitution des gaz. — La simplicité des lois auxquelles sont soumis les gaz a permis aux physiiciens de se représenter assez clairement leur constitution, et d'en déduire la manière dont s'y fait la transformation du travail dynamique en travail calorifique, et réciproquement.

Dans les gaz *permanents*, que nous considérerons d'abord, les dilatations et les chaleurs spécifiques en volume sont sensiblement égales, et quand ils se mélangent, chacun d'eux exerce la même pression que s'il était seul (I, 447). En outre, les expériences de M. Joule (1280) ont prouvé que la détente d'un gaz permanent

dans un espace donné, ne dégage pas de chaleur quand il ne se produit pas de travail extérieur; ce qui montre l'absence de tout travail intérieur sensible. De ces résultats, on a conclu que les molécules des gaz sont indépendantes les unes des autres; car si elles s'influençaient mutuellement, il serait impossible de comprendre que celles qui sont de nature différente eussent exactement la même action les unes sur les autres, que celles de même espèce.

D'un autre côté, cette indépendance des molécules ne peut, si on les suppose simplement en mouvement d'oscillation, se concilier avec le fait de la transmission rapide de la pression dans tous les sens.

On n'a pu échapper à cette difficulté qu'en supposant les molécules des gaz animées de vitesses dirigées dans tous les sens, variables de l'une à l'autre, mais formant par leur ensemble un état moyen partout où la température et la pression sont les mêmes. Ces molécules s'entrechoquent et rebondissent les unes contre les autres quand elles se rencontrent, et elles tendent à s'épandre indéfiniment. Si elles rencontrent un obstacle, elles rebondissent sur sa surface, ce que suffit à expliquer leur rotation rapide sur elles-mêmes, ainsi que nous l'avons déjà vu (I, 175), et leurs chocs réitérés produisent la pression, qui est continue à cause de leur grand nombre.

Cette hypothèse nous permet de compléter et de modifier en quelques points l'explication que nous avons donnée de la diffusion de deux gaz en présence, sans cloison interposée (I, 450). Le mouvement de projection des molécules et l'indépendance entre celles d'espèces différentes comme entre celles de même espèce, suffisent pour tout expliquer. Nous avons vu en outre le parti qu'on a tiré de la même hypothèse pour rendre compte de la diffusion à travers une cloison poreuse.

Nous venons de voir comment s'explique l'évaporation (1344). Quand elle a lieu dans un espace fermé, une partie des molécules de vapeur qui ont rebondi sur les parois, rencontrent la surface du liquide et y pénètrent; et, quand elles sont en nombre égal, avec celles qui s'échappent de cette surface, la tension de la vapeur reste constante, et l'on a l'état de saturation. On conçoit facilement que cette tension sera d'autant plus forte que la force vive des molécules sera plus grande, et par conséquent, la température du liquide plus élevée. Si l'on comprime un gaz, par exemple en enfonçant un piston, la surface de ce dernier, contre laquelle rebondissent les molécules, ajoute son impulsion à celle qui résulte de leur réflexion, et la vitesse des molécules, par conséquent leur force vive, est augmentée; il y a donc élévation de température. — Si, au contraire, le piston cède à la pression du gaz, la force vive des molécules diminue en créant du travail extérieur, et la température s'abaisse. On voit bien ici le mécanisme de la transformation du travail en chaleur et *vice versa*.

Cette manière de concevoir la constitution des gaz a été imaginée par D. Bernouilli, en 1738, et exposée dans son hydrodynamique, mais elle passa inaperçue. Elle fut reprise quatre-vingts ans plus tard par Le Sage, qui cite plusieurs auteurs qui l'ont aussi soutenue. Hérapath en 1821, Cauchy en 1830, puis MM. Joule,

Krœnig, Clausius, etc., soutinrent la même hypothèse, et en développèrent les conséquences par diverses méthodes. Voyons comment elle peut rendre compte des principales propriétés des gaz.

1343. Lois de Mariotte et de Gay-Lussac. — Quand des molécules viennent frapper un point d'une paroi fixe, la force que représente la résistance de la paroi substituée à la composante normale de la vitesse de chacune des molécules qui viennent la frapper en un point pendant l'unité de temps, une vitesse de signe contraire à cette composante. Soit u la vitesse moyenne de ces molécules, dont le nombre est N , et m leur masse. La pression p représentée par cette force de résistance, et à laquelle le gaz doit faire équilibre, aura pour valeur $p = KNmv$; K étant une constante. Mais N est proportionnel au nombre n des molécules contenues dans l'unité de volume, et au nombre de fois que chacune d'elles vient choquer la paroi pendant l'unité de temps, nombre d'autant plus grand que la vitesse u est elle-même plus grande. On aura donc

$$p = knmu^2 \quad [1]$$

k, m, u étant constants pour un même gaz et pour la même température. On voit que la pression est proportionnelle au nombre n de molécules comprises dans l'unité de volume, c'est-à-dire à la densité; ce qui est l'expression de la loi de Mariotte.

Considérons maintenant des volumes égaux de deux gaz différents, à la même pression et à la même température; ces gaz contiennent sous ce volume commun, le même nombre de molécules (1050), et leur pression est

$$p = knmu^2 = knm'u'^2$$

d'où $mu^2 = m'u'^2$. Ces forces vives sont égales quelle que soit la température commune des deux gaz. Si donc on élevait cette température de t° , le volume restant constant, les pressions deviendraient $p(1 + \alpha t)$, $p(1 + \alpha' t)$; et comme elles sont toujours égales, il faut que les coefficients de dilatation α et α' soient égaux, comme Gay-Lussac l'avait trouvé par l'expérience. Nous avons vu que leur valeur commune pour tous les gaz permanents est de $\frac{1}{273}$.

1344. Zéro absolu. — La pression d'un gaz à la température de la glace fondante étant p_0 , à t° elle devient, $p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) = p_0 \left(\frac{273 + t}{273}\right)$, le volume restant invariable. Elle est donc proportionnelle à $273 + t$, et il en est de même de la force vive moléculaire, d'après la formule [1]. Si donc nous supposons qu'on amène le gaz à la température de -273° , cette force vive sera nulle, les molécules seront inertes, et le gaz n'exercera plus de pression et ne pourra communiquer de force vive, c'est-à-dire de chaleur, à d'autres corps. La température de 273° au-dessous de la glace fondante représente donc le zéro absolu, comme on l'avait déjà admis (1126). Nous avons vu sur quels arguments

s'appuyait Person pour proposer le nombre beaucoup plus faible (-160°); mais ici nous partons de considérations bien plus puissantes, auxquelles il faut ajouter cette circonstance, que les *températures absolues*, c'est-à-dire rapportées au point de départ (-273°), introduites dans les calculs de la thermodynamique, particulièrement dans la théorie des moteurs thermiques, conduisent à des lois simples qui ne se manifesteraient pas si l'on adoptait un autre point de départ.

13-15. Des deux capacités des gaz. — Dans les gaz, l'excès de la capacité calorifique à *pression constante* sur la capacité à *volume constant* (1093) ne peut provenir que de la chaleur dépensée pour produire le travail intérieur correspondant à l'écartement des molécules. Or, dans l'expérience de Clément et Désormes (1281), la chaleur dégagée par la compression est en grande partie le produit du travail mécanique employé à comprimer le gaz. Quand, au contraire, on laisse dilater le gaz comprimé, la chaleur qui disparaît est employée non-seulement à produire l'écartement des molécules, mais encore à créer le travail nécessaire pour refouler l'air ambiant. La perte de chaleur dépasse donc notablement celle que produirait l'écartement seul des molécules. Il en est de même dans la propagation du son; et l'on voit pourquoi l'on ne peut pas déduire des changements de température calculés dans ces diverses expériences le rapport des capacités à pression constante et à volume constant : on arriverait à un résultat beaucoup trop fort. Le nombre 1,42, adopté d'après les expériences les plus accréditées, représente donc tout autre chose que le rapport réel, sans intervention de travail extérieur, des deux capacités, rapport qui serait égal à l'unité dans un *gaz parfait*, et ne doit en différer que très-peu dans les gaz permanents.

13-16. Calculs de M. Bourget¹. — Nous avons vu (1327) comment Mayer a calculé l'équivalent mécanique de la chaleur, en partant de la valeur du rapport $c : c'$, telle qu'elle est donnée par l'expérience quand intervient la pression extérieure. M. Bourget, en partant du même rapport considéré de la même manière, et en s'appuyant sur les lois des gaz, telles qu'elles ont été trouvées par l'expérience sans aucune préoccupation théorique, est arrivé, par le raisonnement, à deux résultats très-remarquables : 1^o il montre que, lorsqu'un gaz éprouve des changements de pression et de température, la chaleur qu'il absorbe ou qu'il dégage ne dépend pas seulement de son état initial et de son état final, mais aussi de la manière dont s'est effectué le passage d'un état à l'autre; 2^o il démontre, sans s'appuyer sur aucune hypothèse, le principe même de l'équivalence.

Soient v , t , p le volume, la température et la pression d'un gaz permanent occupant 1 mètre cube à 0° et sous la pression $H = 760^{\text{mm}}$. Nous aurons, d'après la loi de Mariotte, a étant le coefficient de dilatation du gaz

$$pv = H(1 + at) \quad [1].$$

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série (1859), t. LVI, p. 257.

Représentons les volumes par des abscisses, et les pressions par des ordonnées, et soit $oa = v$ et $aA = p$ (*fig. 948*). La position du point A fait connaître l'état du gaz; et, si la température et la pression de ce gaz changent, ce point se déplacera et décrira une courbe telle que An . Si cette courbe revient au point de départ, on dira qu'elle forme un *cycle* ou *circuit fermé*.

Cela posé, considérons le cas particulier où les pressions et les températures varient de telle manière que les états successifs du gaz soient représentés par les points d'un cycle fermé rectangulaire parcouru dans le sens ADBCA, et cherchons la quantité de chaleur dépensée dans ce parcours, pour la comparer au travail effectué. — Quand le gaz passe de l'état A à l'état D, sa pression augmente de AD sans changement de volume; il a donc fallu qu'il y ait échauffement. Si p' est la nouvelle pression aD , la température t_1 sera donnée par la relation

$$[2] \quad p'v = H(1 + at_1), \quad \text{qui donne} \quad (p' - p)v = Ha(t_1 - t), \quad [3]$$

en la combinant avec [1]; et la quantité de chaleur dépensée pour produire l'augmentation de pression $p' - p$ est, en désignant par P le poids de 1 mètre cube de gaz à 0° , et par c' la chaleur spécifique à *volume constant*,

$$q = Pc'(t_1 - t), \quad \text{ou} \quad q = \frac{P}{Ha} c'v(p' - p),$$

en remplaçant $t_1 - t$ par sa valeur tirée de [3].

Quand le gaz passe de l'état D à l'état B, il se dilate de DB (*fig. 948*), sans changer de pression; son volume devient v' , et sa température t' est donnée par la relation

$$[4] \quad p'v' = H(1 + at'); \quad \text{d'où} \quad p'(v' - v) = Ha(t' - t_1),$$

en la combinant avec [2]. — En désignant par c la capacité du gaz à *pression constante*, la quantité de chaleur dépensée sera

$$q_1 = Pc(t' - t_1) = \frac{P}{Ha} cp'(v' - v).$$

En passant de l'état B à l'état C, le gaz se refroidit sans changer de volume, sa température t_2 est donnée par la relation $pv' = H(1 + at_2)$, qui, combinée avec [4], donne $(p' - p)v' = Ha(t' - t_2)$, et la chaleur *recueillie* est

$$q' = Pc'(t' - t_2) = \frac{P}{Ha} c'v'(p' - p).$$

Enfin, quand le gaz passe de l'état C à l'état primitif A, il se refroidit sans

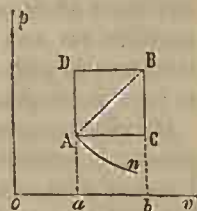


Fig. 948.

changer de pression, sa température redevient t , et la formule $pv = \Pi(1 + at)$, combinée avec $pv' = \Pi(1 + at_2)$, donne $p(v' - v) = \Pi a(t_2 - t)$, d'où

$$q'_1 = Pc(t_2 - t) = \frac{P}{\Pi a} cp(v' - v).$$

La dépense de chaleur sera donc $Q = q + q_1$, la chaleur recueillie, $Q' = q' + q'_1$, et la dépense définitive

$$Q - Q' = \frac{P}{\Pi a}(c - c')(p' - p)(v' - v).$$

La quantité $Q - Q'$ ne pouvant être nulle, on voit que, lorsqu'un gaz change d'état pour revenir à son état initial, il y a toujours une certaine quantité de chaleur anéantie, représentée par l'aire du rectangle ADBC.

Si l'on rapproche le point B du point A jusqu'à ce que la distance devienne infiniment petite, la quantité $Q - Q'$ tend vers la limite zéro; d'où l'on conclut que, si l'on passe d'un état A à un autre B infiniment voisin, la quantité infiniment petite de chaleur $Q - Q'$ est la même, soit que l'on suive la route ADB, soit que l'on suive la ligne droite AB. Il résulte de là qu'on peut remplacer un élément AB de courbe quelconque par ses deux projections DA, DB sur des parallèles aux axes, et considérer les courbes comme composées d'éléments rectilignes parallèles à ces axes; ce qui permet d'étendre l'énoncé qui précède au cas d'un circuit fermé de forme quelconque.

Cherchons maintenant le travail moteur développé pendant que le point A parcourt le rectangle ADBC. Le travail *moteur*, le long du chemin ADB, est $T = p'(v' - v)$, et le travail *résistant* le long du chemin BCA, $T' = p(v' - v)$. Le travail moteur du gaz, le long du circuit fermé, est donc

$$T - T' = (p' - p)(v' - v),$$

c'est-à-dire qu'il est représenté par l'aire du rectangle ADBC. Si l'on compare la valeur de $T - T'$ à celle de $Q - Q'$, on trouve

$$Q - Q' = \frac{P(c' - c)}{\Pi a}(T - T'), \quad \text{ou} \quad Q - Q' = \frac{1}{E}(T - T'),$$

en représentant par $1 : E$ le coefficient constant de $T - T'$. On voit donc que la quantité de chaleur anéantie est proportionnelle au travail moteur, et réciproquement. Ce résultat peut s'étendre au cas d'un cycle fermé de forme quelconque, le travail suivant AB étant égal au travail suivant sa projection sur une parallèle à l'un des axes.

Si nous faisons $Q - Q' = 1$, c'est-à-dire s'il y a une calorie d'anéantie, nous aurons $T - T' = E$. Nous voyons donc que *tout se passe comme si la chaleur se transformait en travail, à raison de E kilogrammètres par calorie perdue.*

Si le circuit était parcouru en sens inverse, les valeurs de $T - T'$ et de

Q — Q' seraient négatives; il y aurait du travail anéanti et de la chaleur engendrée, et l'énoncé précédent serait encore vrai.

1317. Conséquences. — Nous avons posé $\frac{1}{E} = \frac{P(c - c')}{Ha}$ [1]. Si nous prenons $H = 10333^k$, $a = 0,003665$, $P = 1,293$, $c = 0,2377$, et $c' = 1,42$, nous aurons, en nombre rond, $E = 424^{km}$.

La démonstration de M. Bourget conduit à des conséquences importantes. On voit que s'il existe réellement un équivalent de la chaleur, la valeur de E doit être mathématiquement constante, et, comme a est sensiblement le même pour tous les gaz, $P(c - c')$ doit aussi être le même; d'où l'on conclut que les différences des deux chaleurs spécifiques, rapportées au poids, doivent être en raison inverse des densités; ou bien, en rapportant les capacités aux volumes, que la différence doit être la même pour tous les gaz.

Comme c a la même valeur pour tous les gaz simples permanents, et que l'on a $P(c - c') = Pc \left(1 - \frac{c'}{c}\right) = \text{Constante}$, on voit que $c' : c$ doit être constant pour un même gaz, quelles que soient la pression et la température. Si donc on pouvait vérifier cette conséquence par l'expérience, on aurait ainsi une vérification importante de l'existence de l'équivalent mécanique.

Le calcul analytique appliqué à cette question a conduit aussi M. Bourget à l'énoncé de la loi de Dulong sur l'égalité de la chaleur dégagée par la compression des différents gaz. Il résulte aussi de ce calcul que, pour un même gaz, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la pression d'où l'on part.

Tous ces résultats avaient été déduits par M. Clausius, comme conséquences de l'existence de l'équivalent mécanique. M. Bourget y arrive d'une manière toute différente, en montrant d'abord qu'il doit y avoir un équivalent (1316).

1318. Comparaison des gaz réels aux gaz parfaits. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé nul le travail intérieur moléculaire des gaz; autrement dit, nous avons supposé des *gaz parfaits*, dans lesquels l'énergie intérieure est indépendante du volume, et ne peut être modifiée que par des changements de température. D'après les expériences de M. Joule indiquant qu'il n'y a ni perte ni création de chaleur dans le passage de l'air d'un récipient fermé où il est comprimé à 22 atmosphères, dans un autre où il y a le vide, expériences qui ont été répétées avec le plus grand soin par M. Regnault, il semble que l'air se comporte comme un gaz parfait. Cependant, il s'écarte légèrement de la loi de Mariotte; d'où l'on peut conclure que ses molécules ne sont pas complètement indépendantes les unes des autres, et qu'il doit y avoir dans l'expérience de M. Joule une légère perte de chaleur inaperçue. En effet, M. Joule pouvait apprécier une variation de $\frac{1}{360}$ de degré dans les $7^k,5$ d'eau de son calorimètre; ce qui correspond à $\frac{1}{48}$ de calorie et à $\frac{423}{48} = 8,8$ kilogrammètres. La masse d'air, qui occupait $2^{lit},25$ à 22 atmosphères, pesait $0^k,064$, et, sa chaleur spécifique étant $0,238$, il est facile de voir que $\frac{1}{48}$ de calorie en plus ou en moins ferait varier sa température de $1^o,4$. Si donc l'expansion du

gaz, de 22 à 11 atmosphères sans travail extérieur, avait modifié sa température de 1°,4, le calorimètre n'aurait pu faire connaître ce changement.

M. Hirn¹ a modifié l'expérience de manière à constater le changement de température dans le gaz lui-même. Un récipient cylindrique est divisé par une membrane, en deux compartiments remplis d'air à la pression atmosphérique. On fait passer, au moyen d'une pompe, l'air de l'un des compartiments dans l'autre, et quand l'équilibre de température est bien établi, on brise la membrane par le choc d'une balle intérieure que l'on fait rouler en inclinant le récipient. Dès qu'on entend l'explosion, on ouvre un robinet de manière à faire communiquer le récipient avec un manomètre à siphon dans lequel les niveaux des deux branches sont à la même hauteur, et l'on voit que ces niveaux ne changent pas. Ici, toutes les parties du gaz se sont mélangées instantanément. Mais, comme le fait remarquer M. Hirn lui-même, les parois cèdent si rapidement leur chaleur au gaz, qu'un faible refroidissement serait insensible.

1349. Travail intérieur des gaz réels. — Il était très-important, au point de vue théorique, de prouver l'existence du travail intérieur des gaz qui se dilatent sans addition ou soustraction de chaleur et sans production de travail extérieur. Plusieurs physiciens ont fait de nombreuses expériences sur ce sujet difficile. MM. W. Thomson et Joule, en 1854, ont opéré de la manière suivante². Le gaz est comprimé par une pompe foulante, dans un serpentín d'où il passe, par un tube de jonction, dans un second serpentín terminé par une plaque percée d'un petit trou, par lequel le gaz s'échappe dans l'atmosphère. Les deux serpentíns sont plongés dans de grandes masses d'eau qui maintiennent leur température constante. La force vive qui chasse le gaz et refoule l'atmosphère étant fournie par le travail de la pompe de compression, un gaz parfait, qui ne dépense pas de travail moléculaire, ne devrait pas se refroidir en sortant. Mais la force vive dépensée pour communiquer au jet de gaz son énorme vitesse détermine un mouvement de chaleur qui dépasse beaucoup celui que l'on veut apprécier. En effet, un thermomètre placé près de l'orifice baissait depuis 6° jusqu'à 13° quand la pression passait de 2 à 8 atmosphères. La force vive absorbée par le jet de gaz pouvait, du reste, reparaître sous forme de chaleur, quand on recevait ce jet dans un tube en gutta-percha contenant la boule du thermomètre, autour de laquelle le gaz glissait en perdant sa vitesse par le frottement. La chaleur ainsi régénérée peut aussi être constatée en mettant le doigt tout près de l'orifice ou en pinçant le jet entre les doigts; la chaleur que l'on ressent devient bientôt intolérable, pendant que l'orifice reste froid.

Pour éviter ces effets perturbateurs, MM. Thomson et Joule ont fait passer le gaz, avant sa sortie, à travers un cylindre de buis rempli de soie ou de coton tassés, de manière que ce gaz sortit régulièrement et eût perdu toute sa force vive avant de rencontrer le thermomètre.

¹ Exposition de la théorie mécanique de la chaleur (1875), t. I, p. 297.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. LXIV, p. 504, et LXV, p. 244.

L'air, avec cette disposition, manifesta, à sa sortie, un léger refroidissement, sensiblement proportionnel à l'excès de la pression intérieure, et diminuant un peu quand la température du gaz intérieur était plus élevée. Par exemple, le rapport du refroidissement à la pression, qui était 0,262 pour une température de 12 à 17°, était 0,206 pour 91°.

L'hydrogène a donné un refroidissement 13 fois plus faible que l'air dans les mêmes conditions; il se rapproche, en effet, davantage d'un gaz parfait.

Pour l'acide carbonique, au contraire, les résultats ont été bien plus prononcés. Le rapport a atteint 1,225 à la température de 13° environ, 1,160 à 19°, et 0,703 à 91°. On voit que la température a une influence notable, pour l'acide carbonique qui n'est pas permanent; ce qui montre que le travail interne diminue quand la distance des molécules augmente, et ce qui est d'accord avec les indications données par la manière dont ce gaz s'écarte de la loi de Mariotte.

M. A. Cazin est arrivé à des conclusions semblables à la suite de nombreuses expériences publiées de 1862 à 1870. Il parlait de la détente du gaz entre deux récipients réunis par un gros robinet. Il observait les variations de pression pendant la communication, dont la durée était mesurée, en s'aidant de la méthode graphique, au moyen d'un électro-aimant. Il construisait ensuite la courbe des pressions, représentées par les ordonnées, les abscisses représentant les temps; et, en comparant les courbes correspondantes à plusieurs expériences successives, il arrivait à déterminer le temps nécessaire pour que la fermeture du robinet coïncidât avec l'instant précis où cessait l'écoulement du gaz, d'un récipient dans l'autre¹.

M. Regnault a publié, en 1870, des recherches très-remarquables et très-étendues sur la détente dynamique des gaz (1283), étudiée dans des circonstances variées et au moyen de nombreux appareils nouveaux². Nous allons citer quelques-unes de ces expériences, faites au moyen de l'appareil qui avait servi aux recherches sur la chaleur spécifique des gaz (fig. 776, p. 299), appareil qu'il avait fallu un peu modifier. Le gaz, comprimé dans le grand réservoir R, prend une température déterminée dans le serpentin S, dont l'extrémité, fermée par une plaque percée d'un orifice de 8^{mm} de diamètre, pénètre jusqu'au milieu de la boîte inférieure du calorimètre c. La vitesse de sortie du gaz à travers cet orifice est réglée par la vis v, V, que l'on manœuvre de manière à maintenir dans le serpentin S un excès constant de pression au-dessus de la pression atmosphérique. Pour les fortes pressions, le gaz passait directement dans le serpentin S par un simple tube venant du réservoir R, et l'on prenait la moyenne entre les pressions initiale et finale de ce réservoir, pour le calcul du poids P de gaz écoulé (1088).

Soit c la capacité du gaz à pression constante, T sa température, θ et θ' les

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXVI, et 4^e série, t. XIX et XX.

² *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XXXVII, p. 579.

températures initiale et finale du calorimètre, on aura pour la quantité de chaleur q , que cède le gaz, par le fait seul de son refroidissement,

$$q = Pc \left(T - \frac{\theta + \theta'}{2} \right), \quad \text{et} \quad q' = M\Delta\theta$$

pour la quantité de chaleur reçue par le calorimètre, en représentant par $\Delta\theta$ le changement de température qu'il éprouve, et par M la masse d'eau qu'il représente.

S'il n'y avait pas de mouvement de chaleur produit par la détente et les changements de force vive du gaz dans le calorimètre, les quantités q et q' seraient égales, comme si le gaz passait sans éprouver de détente. S'il n'en est pas ainsi, la différence $Q = M\Delta\theta - Pc \left(T - \frac{\theta + \theta'}{2} \right)$ représentera la perte ou le gain de chaleur provenant des effets combinés de la détente et des variations de force vive du gaz. Cette différence, pour l'unité de masse du gaz, sera égale à $C - c$, en appelant C une *chaleur spécifique spéciale* comprenant non-seulement la chaleur que le gaz abandonne en se refroidissant, mais encore les effets calorifiques de sa détente et de son mouvement. Suivant que C sera plus petit ou plus grand que c , il y aura eu perte ou dépôt de chaleur provenant des deux dernières causes.

L'effet du mouvement est d'ailleurs complexe et assez difficile à interpréter : les molécules gazeuses, d'abord sensiblement en repos, se détendent à leur sortie de l'orifice capillaire, refoulant la pression atmosphérique en absorbant le travail fourni par l'élasticité du gaz du grand réservoir; mais leur vitesse s'accélère aux dépens de leur propre chaleur, ce qui occasionne un refroidissement. La vitesse diminue ensuite jusqu'à la sortie du calorimètre, ce qui restitue une partie seulement de la chaleur perdue, le gaz conservant encore une grande vitesse à sa sortie.

Il est résulté de ces expériences de M. Regnault que, sous un excès de pression de 1^m de mercure, l'air a donné un léger refroidissement dû à sa détente. Cet effet a été plus prononcé pour l'acide carbonique, et d'autant plus que sa température, qui a varié de -30° à 200° , était plus basse. L'hydrogène n'a donné que des résultats insensibles.

1350. Compression et détente des vapeurs ¹. — D'après les expériences de MM. Hirn et Cazin, la vapeur d'eau surchauffée se comporte comme les gaz non permanents c'est-à-dire qu'elle accomplit un travail interne pendant sa détente.

Quand la vapeur est à saturation et qu'elle se détend lentement dans un espace plus grand, elle s'éloigne de son point de saturation, ce qu'on exprime en disant qu'elle est *surchauffée*. Mais, si l'augmentation de volume se fait brusquement, il y a refroidissement, et l'on conçoit que ce refroidissement puisse

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. X, p. 349, et t. XIV, p. 374.

l'emporter sur l'effet de l'augmentation de volume, et qu'il y ait alors condensation de vapeur. MM. Rankine, Clausius, Combes, Dupré ont traité la question par le calcul, en partant des lois de la thermodynamique, et sont arrivés à cette loi générale que, pour chaque liquide, il y a une température à laquelle sa vapeur saturée peut être légèrement comprimée ou détendue sans subir de condensation et sans être surchauffée. Cette *température d'inversion*, d'après M. Dupré, serait de 520° pour la vapeur d'eau et de — 116°, pour l'éther.

M. A. Cazin a fait de nombreuses expériences pour vérifier ce résultat de la théorie. Le liquide était introduit en petite quantité dans un vase cylindrique plongé dans un bain destiné à le porter à une température constante. Aux deux bases du cylindre étaient ajustés deux tubes opposés, fermés par des glaces à travers lesquelles on pouvait éclairer l'intérieur et voir à quel état s'y trouvait la vapeur. On pouvait détendre cette vapeur en la faisant communiquer un instant avec un récipient dans lequel régnait une faible pression, ou la comprimer brusquement en enfonçant un piston.

Voici quelques-uns des résultats constatés. La détente de la vapeur d'eau saturée, quand sa pression première ne dépasse pas 8^{atm}, est accompagnée d'un brouillard plus ou moins épais, qui indique une sursaturation subite. La compression au contraire n'en produit pas; seulement, les parois enlevant bientôt la chaleur de compression, il y avait condensation de vapeur sur ces parois, mais sans production de brouillard. On conçoit quelle importance doit avoir ce résultat, constaté déjà antérieurement par M. Hirn, dans le calcul du travail des machines à vapeur.

La vapeur d'éther sulfurique donne des résultats opposés, comme l'avait constaté M. Hirn : elle reste transparente pendant la détente, et se trouble par la compression. — Les vapeurs de benzine et de chloroforme donnent un brouillard par la détente et restent transparentes pendant la compression, quand leur température ne dépasse pas 130° environ. Au-dessus de cette limite, les effets sont inverses et le brouillard produit par la compression est d'autant plus épais que la température est plus élevée. Le phénomène de l'inversion, prédit par le calcul, est donc vérifié pour ces deux liquides, et l'on voit que c'est vers 130° qu'il se manifeste.

§ 4. — APPLICATIONS A LA PHYSIOLOGIE ET A LA COSMOLOGIE

I. Origine du travail musculaire.

1351. Relation entre la chaleur animale et la contraction. — Les principes de la thermodynamique ont fait faire des progrès importants à la physiologie, en ce qui concerne la théorie des mouvements. M. Joule, le premier, a trouvé l'origine du travail des muscles dans la chaleur physiologique; tant qu'un animal est en repos, le travail des diverses réactions chimiques qui se

produisent dans son organisme se transforme entièrement en chaleur. Mais quand il accomplit un travail extérieur, ce travail est l'équivalent d'une partie du travail chimique, et la quantité de chaleur dégagée est moindre. Mayer a développé cette idée, qui même avait été son point de départ dans la découverte de l'équivalence. Il restait à prouver par l'expérience que la chaleur physiologique diminue en proportion du travail musculaire accompli. C'est ce qu'a fait M. Hirn, au moyen de l'appareil suivant¹.

Dans une caisse en sapin, bien close (fig. 949), et pouvant contenir une personne, est une roue à palettes r , que fait tourner un moteur extérieur. Quand le sujet, dont le poids est p , monte sur les palettes descendantes, il est dans le même cas que s'il montait une échelle, et le travail accompli par lui pendant que la roue, de rayon R , fait n tours, est $2\pi R \cdot np$. Un appareil à soupapes placé devant la bouche, recevait, par un tube de caoutchouc, l'air nécessaire à la respiration, fourni par un gazomètre jaugé, tandis qu'un autre tube conduisait les gaz exhalés, dans un second gazomètre aussi jaugé.

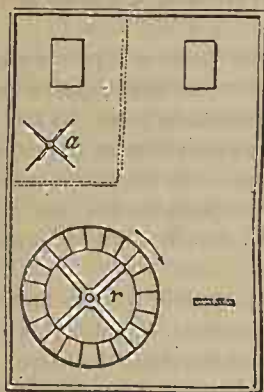


Fig. 949.

On attendait toujours que la température intérieure de la caisse, donnée par plusieurs thermomètres et rendue uniforme par des agitateurs tournants a , fût constante. Alors la chaleur animale dégagée était égale à chaque instant à celle que la caisse perdait au dehors. La chaleur perdue se calculait au moyen de la loi de Newton (894). Des expériences préalables avaient été faites au moyen du gaz hydrogène, dont la chaleur de combustion est bien connue. Un bec de ce gaz, brûlant jusqu'à ce que la température devint constante, avait donné, pour la perte de cha-

leur, pendant une heure, $25^{\text{cal}},75$, l'excès de température étant de 1° . Il n'y avait donc, dans chaque expérience, qu'à multiplier $25,75$ par l'excès constant de la température intérieure sur l'air extérieur, pour connaître la quantité de chaleur dégagée par le sujet.

Comme l'activité de la respiration est plus grande pendant le travail que pendant le repos, il fallait rapporter la chaleur dégagée à la quantité d'oxygène absorbée, quantité qu'on pouvait déduire des volumes de gaz contenus dans les deux gazomètres à la fin de l'expérience, et qui était proportionnelle à la chaleur dégagée, comme l'a prouvé M. Hirn, qui a trouvé sur diverses personnes mises en expérience dans le même appareil, que la chaleur dégagée, par heure et par gramme d'oxygène absorbé, était de $5^{\text{cal}},22$ environ, dans l'état de repos; cette

¹ Exposition de la théorie mécanique de la chaleur (1875), t. I, p. 27.

quantité serait donc $5,22 \cdot \pi$, pour π grammes d'oxygène. Si Q est la quantité de chaleur donnée par l'expérience pendant le mouvement, par heure et par gramme d'oxygène, la différence $5,22 \cdot \pi - Q$ représentera la portion qui s'est transformée en travail musculaire. Q s'est toujours trouvé moindre que $5,22 \cdot \pi$, souvent de plus de 63 pour cent, quand, la roue descendant, il y avait travail positif. Quand, au contraire, la roue allait en montant sous les pieds du sujet qui alors faisait le mouvement de descente, Q était plus grand que $5,22 \pi$; il y avait donc création de chaleur, le travail de la pesanteur étant détruit à chaque mouvement de descente.

M. Béclard a fait des expériences sur la chaleur absorbée par le travail musculaire du bras, sur lequel était appliqué un thermomètre divisé en cinquantièmes de degré. Ce thermomètre baissait de quelques divisions, quand la main soulevait un poids, et montait au contraire, quand elle s'abaissait, à cause du travail détruit de la pesanteur. Quand la main n'était pas chargée, il n'y avait pas de changement de température. Du reste, les résultats étaient tellement faibles qu'ils peuvent laisser quelques doutes.

M. Heidenhain a expérimenté depuis, sur des muscles dépouillés de grenouilles mortes, dont il appréciait la température au moyen d'une aiguille thermo-électrique (1261), et dont il excitait les contractions au moyen de décharges électriques, le muscle étant tendu ou non par un poids. Mais il n'est pas permis de conclure des résultats obtenus sur des muscles morts excités par l'électricité, à ce qui se passerait dans des muscles vivants contractés par la volonté.

1352. Remarques. — On peut conclure des expériences de M. Hirn que le travail musculaire s'effectue aux dépens d'une partie de la chaleur produite dans l'organisme. Si un exercice violent ou prolongé excite la chaleur du corps jusqu'à provoquer la sueur; c'est que, pendant le mouvement, la respiration devient plus active et la quantité d'oxygène absorbée, plus grande. La chaleur fournie en 1^h peut ainsi quintupler; par exemple, M. Hirn a constaté sur lui-même que, pour une vitesse d'ascension correspondant à 450^m par heure, le nombre d'inspirations par minute était de 30 au lieu de 18, et le volume d'air absorbé, de 2300 litres, au lieu de 700. C'est pourquoi, quand on veut comparer les quantités de chaleur dégagées pendant le repos et pendant le mouvement, il faut toujours rapporter les quantités de chaleur aux poids d'oxygène absorbé.

On connaît la nécessité, pour que les muscles se contractent, de l'intervention des nerfs, qui suit celle de la volonté. En partant de là, certains physiologistes ont attribué la force de contraction à l'action nerveuse. Mais les nerfs jouent un rôle tout différent; ils agissent comme l'étincelle qui détermine l'explosion de la poudre, comme l'effort par lequel on ouvre la vanne d'entrée de la vapeur dans une machine à feu, dont le mouvement est produit par une toute autre cause que cet effort. Les nerfs ne font donc que provoquer l'action calorifique et permettre à la chaleur de se transformer en travail musculaire.

II. Entretien et effets généraux de l'énergie solaire.

1353. Entretien de la chaleur du soleil. — Nous avons vu comment on a évalué la quantité de chaleur versée sur le globe par le soleil (1250), et à la suite de quelles expériences et par quelles considérations (1254) on a été conduit à admettre que la température de sa surface est beaucoup moins élevée qu'on ne l'avait supposé d'abord.

D'après les principes de la thermodynamique, on doit considérer le soleil comme un immense réceptacle de force vive incessamment dépensée par communication à l'éther qui l'environne, et dont une très-faible partie est reçue par notre globe et par les autres corps du système planétaire.

On s'est demandé depuis l'antiquité la plus reculée comment le soleil peut ainsi perdre continuellement des torrents de chaleur sans que sa puissance semble s'affaiblir. Tant qu'on a supposé que sa température s'élevait à plusieurs millions de degrés, on a pu admettre que les pertes annuelles, quelque grandes qu'elles fussent en valeur absolue, étaient tout à fait insensibles par rapport à une aussi immense accumulation de chaleur. Mais maintenant qu'il est reconnu que la température de la surface du soleil ne dépasse pas quelques centaines de mille degrés, on ne peut plus raisonner ainsi. En effet, si la chaleur spécifique du soleil était égale à celle de l'eau, une des plus grandes que l'on connaisse, d'après le calcul, le refroidissement de la masse totale serait de plus de 8000° en 3000 ans. Ajoutons que la perte énorme de chaleur correspondante étant supportée principalement par la surface, celle-ci subirait un abaissement de température beaucoup plus considérable.

On a supposé ensuite que la chaleur du soleil était due à une combustion. Or, si l'on suppose sa masse composée d'hydrogène, substance qui possède la plus grande chaleur de combustion connue, le calcul indique qu'il ne faudrait que 3000 ans environ pour épuiser cette masse de combustible, brûlant assez activement pour réparer à chaque instant les pertes du soleil.

La thermodynamique a suggéré de nouvelles explications. Mayer, en 1848, puis M. Waterston, ont émis une hypothèse hardie, qui rappelle celle de Buffon supposant que des comètes tombaient dans le soleil en guise de combustible, mais qui en diffère essentiellement quant au mode de production de la chaleur. On sait qu'il circule autour du soleil une multitude innombrable de petits corps, dont les aéroolithes nous apportent des spécimens (1277), et auxquels on attribue la *lumière zodiacale*, lueux lenticulaire, qui se distingue, après le coucher du soleil, aux époques voisines des équinoxes, où elle fait un angle suffisamment grand avec l'horizon. Ces petites masses tomberaient sur le soleil qui les attire, en perdant leur force vive qui se transformerait en chaleur. D'après les calculs, la quantité de ces corps nécessaire à l'entretien de l'énergie du soleil, n'augmenterait son diamètre angulaire que de $\frac{1''}{400}$ pendant un siècle. Mais, à cause

de l'augmentation de masse, la distance de la terre au soleil subirait une diminution assez rapide pour que le commencement de l'année fût avancé de 6 mois au bout de 4000 ans. M. W. Thomson, après avoir reconnu cette difficulté, a modifié l'hypothèse de Mayer, de manière à la faire disparaître. Mais il en est une autre à laquelle on ne peut échapper; c'est que la masse totale des petits corps qui composent la lumière zodiacale est tellement faible qu'elle n'exerce aucune influence sur les mouvements de Mercure, comme l'a prouvé Leverrier dans son étude sur les perturbations de cette planète.

M. Helmholtz a proposé d'expliquer la conservation de l'énergie solaire, par la concentration lente et continue de la matière qui compose l'astre, d'où résulterait un dégagement de chaleur, qui suppléerait aux pertes produites par rayonnement. La diminution de diamètre résultant de ce travail intérieur ne serait, au bout de 2000 ans, que de 0',004 au plus.

Tous ces systèmes, très-ingénieux, ont leur degré de probabilité, et l'on peut dire même que les phénomènes qu'ils supposent concourent en partie à entretenir la chaleur solaire. Mais l'explication de la conservation de cette chaleur découle naturellement de la théorie de M. Faye sur la constitution du soleil (1246). Nous rappellerons que, d'après cette théorie, la *photosphère* est constituée par une précipitation de particules solides, dans les couches superficielles suffisamment refroidies pour permettre les actions chimiques, empêchées d'abord par une température supérieure à la limite de dissociation (1301), actions chimiques qui sont accompagnées d'un dégagement abondant de chaleur. Les poussières précipitées tendent à descendre, sont remplacées par des masses gazeuses plus chaudes, qui, après s'être aussi refroidies au-dessous de la limite de dissociation, éprouvent à leur tour des actions chimiques qui dégagent de nouvelle chaleur. Avant que toutes les parties de la masse solaire soient ainsi venues successivement à la surface pour y dégager de la chaleur de combinaison, il s'écoulera des millions de siècles, et ce n'est qu'alors que la température de cette surface pourra éprouver une diminution graduelle de température.

1354. Mouvements sur le globe dus à l'action solaire. — C'est à l'énergie solaire, envoyée sous forme de radiations à la surface de la terre, que sont dus la plupart des phénomènes que nous y observons; les mouvements vibratoires qui constituent ces radiations se transformant en travail, dans les conditions les plus variées. Ce rôle général de la chaleur solaire, vaguement entrevu dans l'antiquité, quant aux phénomènes du règne inorganique, avait été nettement reconnu dans l'action qu'exercent les rayons solaires sur les êtres organisés, qui n'existent et ne se développent qu'aux dépens de cette influence vivifiante et nécessaire. Il n'est donc pas étonnant que l'adoration du soleil ait formé la base de la religion de plusieurs peuples primitifs.

Il est facile de voir que tous les moteurs que nous connaissons doivent leur puissance, directement ou indirectement, à l'énergie empruntée aux radiations solaires. Par exemple, le vent est dû, comme nous le verrons, aux dilatations inégales produites dans les masses atmosphériques par l'absorption des rayons

solaires. Le travail d'une chute d'eau a son point de départ dans l'action solaire, qui, provoquant l'évaporation des eaux, détermine la formation des nuages. De ces nuages viennent les pluies qui, coulant sur les pentes et se rassemblant au fond des vallées, forment et alimentent les cours d'eau.

Les moteurs animés empruntent leur puissance musculaire à la chaleur qu'engendre l'élaboration des aliments (1351), et ceux-ci sont toujours empruntés, directement ou indirectement, au règne végétal. Or, les végétaux doivent leur développement à la chaleur solaire. Formés principalement d'eau et d'acide carbonique, moins une certaine quantité d'oxygène, il faut, pour enlever ce gaz, apporter une quantité considérable d'énergie, qui est fournie par les radiations solaires; et plus le végétal en reçoit dans un temps donné, plus sa croissance est rapide. Cette absorption de l'énergie solaire par les plantes explique pourquoi les rayons n'échauffent que faiblement une surface couverte de verdure, comme une prairie, une forêt, tandis qu'un terrain dénudé s'échauffe fortement. Les plantes peuvent donc être considérées comme des réceptacles d'énergie emmagasinée, que l'on peut faire reparaître sous forme de chaleur en rendant, par la combustion, l'oxygène soustrait pendant leur croissance. L'énergie qu'elles contiennent est à l'état *potentiel*, c'est-à-dire inactive pour le moment, mais prête à manifester ses effets. C'est ainsi qu'une masse P élevée à une hauteur h contient un travail potentiel égal à Ph , que l'on pourra réaliser en laissant tomber cette masse. Il en est de même du poids ou du ressort d'une horloge que l'on vient de monter et qu'un obstacle arrête; si l'on vient à la faire partir, elle réalise peu à peu un travail égal au travail musculaire, ou autre, qui a été dépensé pour la monter.

Les moteurs thermiques doivent également, en principe, leur puissance à l'action solaire. C'est, en effet, par la combustion des corps organisés, ou du charbon qu'on en extrait, c'est-à-dire de corps qui ont dû leur développement à une dépense d'énergie solaire, qu'on produit la chaleur qui donne leur force d'expansion aux fluides qui animent ces moteurs. La houille elle-même provient de grands végétaux décomposés, que la chaleur solaire avait fait croître dans les temps géologiques; elle représente une immense provision d'énergie à l'état potentiel, que l'on fait apparaître par la combustion. Lors donc que Stephenson osa dire le premier que le charbon de terre est un rayon de soleil emprisonné, il ne fit qu'énoncer une vérité dont on devait longtemps après trouver la démonstration.

J. Herschel, dès 1833, avait formulé en termes remarquables le rôle de la chaleur solaire sur la terre, mais sans en connaître la véritable interprétation, la théorie mécanique de la chaleur étant alors inconnue. Aujourd'hui, nous voyons que tous les effets des radiations solaires sont des conséquences de cette théorie; c'est toujours l'énergie se transportant d'un corps à l'autre sans perte ni gain, et nous arrivant du soleil sous forme de vibrations, calorifiques, lumineuses ou chimiques, pour se transformer ensuite en mouvements divers, moléculaires ou de translation.

Parmi ces mouvements, ceux qui intéressent particulièrement l'atmosphère méritent d'être considérés à part. Nous avons indiqué plus haut (1, 466) la composition de cet océan aérien, dont les fluctuations ont tant d'influence sur nous, et qui va nous occuper spécialement dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IX

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES

DÉPENDANT DE LA CHALEUR — CLIMATOLOGIE

Le Liban porte l'hiver sur sa tête, le printemps sur ses épaules, l'automne dans son sein, pendant que l'été dort nonchalamment à ses pieds.

(Proverbe oriental.)

1355. Définitions. — On nomme *météorologie* l'étude de l'atmosphère et des phénomènes qui s'y accomplissent avec intervention des fluides ou des matières en suspension qu'elle contient habituellement. Ces phénomènes sont désignés sous le nom de *météores* : le vent, la pluie, le tonnerre, l'arc-en-ciel sont des *météores*. Dans ce chapitre, nous allons étudier les phénomènes atmosphériques qui dépendent de la distribution de la chaleur à la surface du globe, et de la vapeur d'eau répandue en plus ou moins grande quantité dans l'air. Ces phénomènes exercent une grande influence sur les êtres vivants, principalement sur les végétaux qui, fixés au sol, en subissent les effets sans pouvoir s'y soustraire.

Climatologie. — La partie de la météorologie qui va nous occuper peut se diviser en deux parties : dans l'une, on explique les phénomènes, en montrant comment ils se rattachent aux lois de la physique ; dans l'autre, on les constate, on note leur fréquence, leur intensité, et l'ordre de leur succession, afin de caractériser le *climat* du lieu des observations.

On nomme *climat* d'une contrée l'ensemble de tous les phénomènes atmosphériques qui peuvent exercer une influence quelconque sur les êtres organisés, principalement les phénomènes relatifs à la distribution de la chaleur et de l'humidité. La *climatologie*, ou étude des climats, dont on trouve quelques notions chez les peuples anciens, présente une utilité incontestable. Indépendamment de l'influence qu'exerce le climat sur la végétation, sur les stations géographiques

des plantes et des races animales, sur le tempérament, l'intelligence et le caractère de l'homme, la connaissance des climats doit présider aux essais agricoles et aux tentatives d'acclimation de plantes ou d'animaux; elle doit servir de guide au médecin dans ses prescriptions hygiéniques, à l'ingénieur dans l'établissement de certains travaux, aux gouvernements pour le choix des localités où ils se proposent d'établir des habitations, de fonder des colonies.

La climatologie est la partie la moins avancée de la météorologie. On est arrivé à expliquer la plupart des phénomènes atmosphériques; mais on a fait peu de progrès dans l'étude des climats. Les influences que subissent les êtres organisés, et particulièrement les végétaux, sont si variées, si changeantes, et elles se compliquent tellement par leur coexistence, qu'il faut un très-grand nombre d'observations pour démêler les lois de l'évolution de chacune d'elles. Il y a à considérer l'humidité de l'air et du sol, les brouillards, la rosée, les quantités de pluie, de neige, les saisons où elles tombent; la perméabilité du sol, qui permet à l'eau de pénétrer à une plus ou moins grande profondeur; la fréquence des orages, de la grêle; les vents, secs ou humides, leur direction, leur violence. Relativement à la chaleur, il faut étudier la température moyenne de l'année, du mois, du jour, les maximum et les minimum, la durée de chaque état, la fréquence et la rapidité des changements. La radiation solaire, suivant la pureté de l'air, a aussi une influence marquée; chacun sait combien l'exposition au midi est favorable à la végétation. Les plantes qui croissent à l'ombre sont faibles, donnent peu de fruits; celles qui couvrent les montagnes, étant exposées à une radiation intense, ont une vigueur inconnue dans les plaines du Nord, à égalité de température. — Caractériser un climat est donc une entreprise longue et laborieuse, et il y a peu de temps qu'on se fait une idée exacte du nombre des éléments à considérer. Pendant longtemps on a cru qu'il suffisait de connaître la température moyenne du lieu et les maximum et minimum. L'énumération qui précède montre combien d'autres circonstances sont à considérer.

Il résulte aussi des observations de MM. de Humboldt, de Candolle, Boussingault, de Gasparin, Quételet..., que chaque plante exige, à partir d'une certaine température, la même quantité de chaleur, pour se développer également, ce qui s'explique facilement au moyen des principes de la thermodynamique (1354); d'où il résulte qu'elle croît d'autant plus rapidement que cette chaleur est plus vite fournie. Il faudrait donc aussi évaluer les *quantités* de chaleur.

1356. Historique. — La météorologie est une science très-ancienne, car Aristote a laissé un traité en quatre parties sur les météores. Mais les observations sérieuses ne datent que du dix-septième siècle, après l'invention du thermomètre et du baromètre. Elles ont pris un grand développement depuis une cinquantaine d'années. Des voyageurs intrépides parcourent les mers, pénètrent dans les contrées inexplorées, rassemblant des observations de toutes sortes, qui, malgré le peu de durée qu'elles embrassent, donnent néanmoins une idée de quelques-uns des caractères de ces climats inconnus. Les instruments ont été perfectionnés; on en a imaginé qui enregistrent d'eux-mêmes leurs propres

indications. La plupart des gouvernements, comprenant combien les études climatologiques ont d'importance pour la navigation, l'agriculture et l'hygiène publique, ont fait construire des observatoires de météorologie placés dans des stations choisies avec soin. Nous citerons, en France, celui de Montsouris, près Paris, dirigé par M. Marié Davy. On en a même établi sur de hautes montagnes, pour étudier ce qui se passe dans les couches élevées de l'atmosphère; par exemple, près de Berne, par les soins de M. Wild; sur le pic du midi de Bigorre, à 2877^m au-dessus du niveau de la mer, où M. de Nansouty dirige les observations; sur le Puy-de-Dôme, à une altitude de 1465^m, par l'initiative de M. Alluard. Plusieurs ascensions aérostatiques, dont nous avons cité les plus remarquables (I, 482), ont aussi été faites pour recueillir des données précieuses sur l'état des couches des hautes régions de l'atmosphère.

Depuis quelques années, la météorologie est entrée dans une nouvelle phase. Anciennement Lavoisier avait conçu le plan d'observations simultanées devant conduire à la prévision du temps un ou deux jours à l'avance, et cette idée a été réalisée de nos jours. De Humboldt, Dove, M. Kaemtz avaient, depuis, fait faire de grands pas à la climatologie, lorsque Maury commença, en 1831, une longue série d'études qui lui ont imprimé une vive impulsion, en centralisant les observations faites en mer, et démontrant leur importance pour la navigation. C'est d'après son initiative que s'est réuni en 1853 le congrès météorologique de Bruxelles, où fut arrêté un plan uniforme d'observations qui a conduit déjà à la découverte de lois importantes. On s'appliqua dès lors à rapprocher les résultats obtenus au même instant ou à de faibles intervalles, dans toutes les parties du monde, de manière à pouvoir suivre la marche de certains météores, et, grâce au télégraphe électrique, avertir de leur approche les contrées éloignées vers lesquelles ils se dirigent. — On a formé, en outre, des associations destinées à centraliser les efforts de ces observateurs modestes et dévoués qui, livrés à leurs propres forces, recueillent avec une persévérance digne des plus grands éloges, des observations nombreuses et suivies.

Aujourd'hui toutes les observations sont centralisées dans divers observatoires. De cette centralisation, de la collaboration des observatoires de l'Europe et de l'Amérique, et du concours des navigateurs et des observateurs répandus dans toutes les parties du monde, sont déjà sortis des résultats précieux pour la navigation, et des lois importantes sur les mouvements de l'atmosphère.

§ 4. — DISTRIBUTION DE LA CHALEUR A LA SURFACE DU GLOBE

I. Instruments et appareils d'observation.

1357. THERMOMÈTRES A MAXIMUM ET A MINIMUM. — Les thermomètres destinés aux observations météorologiques doivent avoir peu de masse, afin de pouvoir se mettre à chaque instant en équilibre avec la température variable de l'air. Il suffit dans nos climats, que l'échelle s'étende de -25° à 50° . Les

degrés doivent être assez grands pour qu'on puisse en marquer les dixièmes ou les évaluer par estime, et il faut vérifier de temps en temps la position du zéro.

Pour connaître le *maximum* et le *minimum* des températures qui ont lieu pendant un certain temps, sans être astreint à en guetter le moment, on emploie des instruments spéciaux que nous allons d'abord décrire.

Thermomètres de Rutherford. — La tige de ces instruments est placée à peu près horizontalement. Le thermomètre à *maximum*, *i* (fig. 950), est à mercure, et ne diffère du thermomètre ordinaire qu'en ce que le mercure pousse, en se dilatant, un petit cylindre d'acier ou d'émail, *i*, qui reste au point où il a été transporté, quand ensuite le mercure se contracte; conservant ainsi l'indication de la plus haute température qu'a indiquée l'instrument. Il peut arriver que l'index pénètre dans le mercure, et il est alors assez difficile de l'en faire sortir. Pour éviter cet accident, M. Greiner recouvre le ménisque de

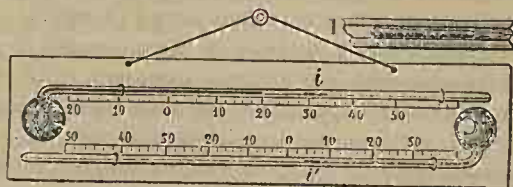


Fig. 950.

mercure, d'une calotte de verre très-mince, sur laquelle s'appuie l'index. — M. Baudin fait des index en bois de chanvre qui ne peuvent jamais être noyés.

Le thermomètre à *minimum* est à alcool. Un petit cylindre d'émail, *i'*, plongé dans le liquide, qui le mouille, sert d'index. Quand la colonne d'alcool se contracte, le ménisque qui la termine entraîne l'index, à cause de son adhérence capillaire. Si le liquide vient ensuite à se dilater, le ménisque concave se sépare de l'index, autour duquel passe le liquide, et cet index reste à l'endroit où il avait été entraîné par la contraction de l'alcool. On voit, en I, l'index *i'* en grandeur naturelle. — Remarquons que le *minimum* est indiqué par l'extrémité de l'index opposée au réservoir, et le *maximum*, par l'extrémité qui se trouve du côté de ce réservoir, près duquel le tube est soudé, pour empêcher l'index de s'y introduire.

Pour installer l'appareil, on commence par ramener les index aux extrémités des colonnes thermométriques, en abaissant l'extrémité de gauche de la tablette qui porte les deux tubes; les réservoirs étant à l'opposé l'un de l'autre, les index glissent jusqu'aux extrémités des colonnes.

1358. Thermomètres donnant à la fois les maximum et minimum.

— La figure 951 représente le thermomètre de Six perfectionné par Bellani. Il consiste en un thermomètre renversé à alcool R, dont le tube se recourbe en *n*, de manière à présenter deux branches verticales *an*, *nr*. L'extrémité de la colonne

d'alcool pousse une colonne de mercure remplissant la partie courbe, et s'élevant dans l'autre branche, où elle est surmontée d'une autre colonne d'alcool qui occupe en partie un réservoir *r* contenant aussi de l'air. Ce gaz, par sa tension, empêche le mercure de s'écarter de l'extrémité de la colonne d'alcool du thermomètre. Deux index d'émail sont noyés dans l'alcool, de chaque côté; ils portent un cheveu qui fait ressort et les empêche de glisser quand une fois ils ont été soulevés. On voit, au-dessus de *n*, un de ces index figuré à part. Au lieu d'employer un cheveu, on peut simplement tirer à la lampe, l'extrémité de l'index en une pointe effilée que l'on replie de manière à former un léger ressort à pincette.

La température est indiquée en même temps par les deux niveaux du mercure; c'est pourquoi chaque branche porte sa graduation. Supposons que les index touchent ces niveaux; si l'alcool se contracte en *R*, l'index est soulevé par le mercure dans la branche *na*, tandis que l'index de l'autre branche reste en place et indique le *maximum*. Si la température s'élève ensuite, le mercure abandonne l'index de la branche *na* qui indique alors le *minimum*, et soulève l'autre. Pour installer l'instrument, on fait descendre les index jusqu'à la colonne de mercure, soit en imprimant de petites secousses, soit au moyen d'un aimant qui attire un brin de fil de fer renfermé dans chacun d'eux.

L'idée des index solides nous vient des académiciens de Florence, qui avaient imaginé un instrument analogue à celui que nous venons de décrire.

Thermomètre à deux index. — M. Baudin emploie souvent dans le thermomètre à *minimum* de Rutherford, un index en forme d'épingle à pointe émoussée, dont la tête est *en avant*, c'est-à-dire tournée à l'opposé du réservoir. M. Doucet ayant tourné la pointe en avant à vu, en renversant l'instrument, l'index descendre jusqu'au ménisque qui termine la colonne d'alcool et s'y arrêter. Si ensuite l'alcool se contracte, la pointe perce le ménisque qui se retire en laissant en place l'index retenu par un peu de liquide qui le fait adhérer au tube. On a ainsi le *thermomètre à maximum de Doucet*. Dans cet instrument, qui est à alcool, il peut couler un peu de liquide à l'extrémité de la tige, à cause de sa position renversée.

M. E. Barbier évite cet inconvénient, et construit un thermomètre à maximum et minimum à la fois, en employant deux index, et séparant une petite partie de la colonne d'alcool par une bulle d'air *ab* (fig. 952)¹. L'index *m* a la tête en avant

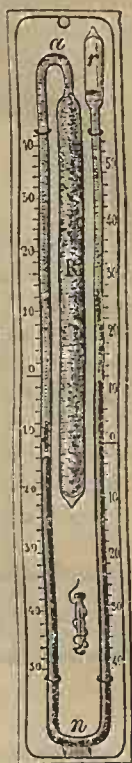


Fig. 951. — $\frac{1}{3}$.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. II, p. 67.

et indique le minimum, le ménisque *a* l'entraînant vers le réservoir. L'index *n* logé dans la petite colonne séparée *bc*, la pointe en avant, est éloigné du réservoir par le ménisque *b*, tandis que le ménisque *c*, quand il se retire pendant le refroidissement, est percé et laisse l'index en place, indiquant ainsi le *maximum*.

Pour former une bulle, on renverse l'instrument et, quand l'index, qui a alors sa pointe en bas, touche le ménisque, on imprime au thermomètre deux ou

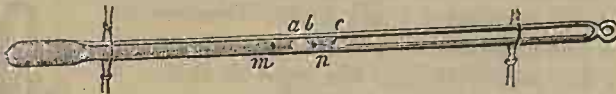


Fig. 952.

trois mouvements de pendule, l'index sort du ménisque, par la secousse, et emporte avec lui un peu de liquide, qui se trouve ainsi séparé de la colonne du thermomètre.

1359. Thermomètres à maximum à colonne interrompue. — Ces instruments sont à mercure. La figure 953 représente celui de MM. Negretti et Zambra. C'est un thermomètre ordinaire dont le tube est rétréci près du réservoir R, soit par un simple étranglement, soit par un petit cylindre de verre qu'une courbure du tube empêche de se déplacer. L'instrument étant placé horizontalement, si le mercure se dilate, le liquide passe autour du cylindre, et la colonne s'allonge comme à l'ordinaire. Si la température s'abaisse ensuite, le

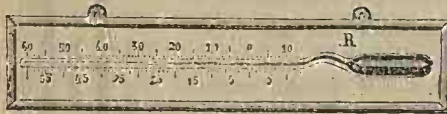


Fig. 953.

mercure se contracte et tend à rentrer dans le réservoir ; mais, à cause de la résistance qu'il éprouve à l'endroit où le tube est rétréci, la colonne s'y divise, de sorte que le sommet de cette colonne ne

peut se déplacer que par la contraction tout à fait négligeable du mercure qu'elle contient ; son sommet indique donc le *maximum*. Si l'on relève le thermomètre verticalement, les deux parties de la colonne se réunissent, et l'instrument est prêt à servir de nouveau.

L'emploi d'index solides exige que la colonne du thermomètre soit un peu grosse. Wallerudin a trouvé moyen de transformer les thermomètres les plus fins, en thermomètres à maximum, pourvu que l'extrémité de la tige porte une petite chambre vide d'air, comme cela a lieu le plus souvent. Voici comment on procède : on incline le tube avec précaution, de manière à faire arriver le mercure jusqu'à la chambre vide ; alors, par une petite secousse, on détache une gouttelette qu'on laisse à part, et l'on redresse l'instrument pour faire rentrer le mercure dans le réservoir. Par un léger choc de haut en bas, on pousse à son tour la gouttelette dans le tube. Quand elle y est complètement introduite, elle

forme un index liquide qui ne peut se souder à l'extrémité de la colonne de mercure du thermomètre, parce qu'il reste toujours des traces d'air qu'on n'a pu expulser complètement par l'ébullition. L'instrument étant placé horizontalement, l'index liquide reste au point où il a été poussé, quand le mercure se contracte ensuite par le refroidissement.

Quand le tube est très-fin, la gouttelette refuse de s'engager dans le tube par de simples secousses; on l'y contraint alors en chauffant la chambre dans une flamme, et l'on achève de la faire pénétrer, en faisant tourner le thermomètre comme une fronde, le réservoir en dehors. Dans ce cas, il peut fonctionner dans la position verticale, car il faut donner des secousses assez fortes pour faire descendre l'index liquide.

1360. Thermomètres à déversement. — Les instruments à index solides doivent être préservés de toute secousse qui pourrait déranger ces index. On ne peut donc les employer avec sécurité quand ils doivent être déplacés pendant ou après les observations. On se sert alors d'appareils dits à *déversement*, dont l'idée est due à Collardeau et à Cavendish. Le thermomètre à poids (828) nous en offre un exemple; car il indique évidemment le *maximum* des températures auxquelles il a été exposé.

Thermomètres de Walferdin. — Le thermomètre à *maximum*, qui est à mercure, porte une division arbitraire. L'extrémité du tube se termine par un bec *c* (fig. 954) renfermé dans une chambre *a*, qui porte un renflement latéral ou *panse*, et dans laquelle il y a du mercure. On commence par remplir entièrement le tube de ce liquide, à une température connue, *t*, inférieure à celle que l'on veut observer; pour cela, on fait arriver, par dilatation, l'extrémité de la colonne jusqu'au bec *c*, et inclinant ensuite l'instrument de manière que la pointe *c* plonge dans le mercure de réserve; le thermomètre est alors *amorcé*. On le porte ensuite, après l'avoir placé verticalement, dans le milieu dont on veut obtenir la température; du mercure sort du tube et tombe en *a*, en quantité qui dépend du maximum par lequel est passé l'instrument, qu'on porte de nouveau à la température *t*. Le mercure ne remplit plus le tube, et, s'il y a *n* divisions entre la pointe *c* et le niveau, on en conclut que le mercure sorti remplirait ces *n* divisions, et que la température cherchée est égale à *t* augmenté du nombre de degrés qui correspond à *n* divisions.

Pour connaître la valeur d'une division en degrés, il suffit de porter l'instrument à une température connue, *t'*, moindre que *t*; si le niveau se trouve à *n'* divisions au-dessous du bec *c*, $(t - t') : n'$ sera la valeur d'une division en degrés, et alors $t + \frac{(t - t')}{n'} n$ exprimera le maximum cherché.

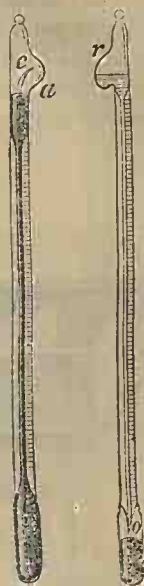


Fig. 954. Fig. 953.

Si l'instrument est amorcé à la température t , il fonctionne comme un thermomètre ordinaire pour toutes les températures inférieures.

Thermomètre à minimum. — La tige de ce thermomètre porte une pointe effilée o (fig. 955) faisant saillie dans le réservoir, qui contient du mercure et de l'alcool. A l'extrémité opposée de la tige, est une ampoule à panse latérale r , contenant de l'alcool et de l'air. On commence par porter l'instrument à une température inférieure de plusieurs degrés au minimum que l'on veut observer, puis on l'incline de manière que la pointe o plonge dans le mercure. Si alors on élève un peu la température, il entre du mercure dans le tube, et l'on observe le nombre de divisions qu'il y occupe, à une température connue, t , supérieure au minimum que l'on veut observer. On redresse ensuite l'instrument, et l'on procède aux expériences. Si la température s'élève, la colonne de mercure

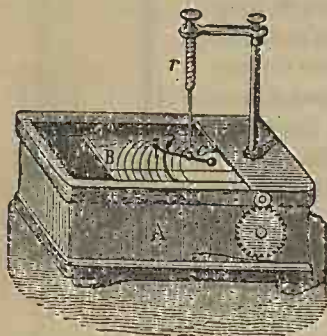


Fig. 956.

s'éloigne de la pointe o , et peut même entrer en partie dans le réservoir supérieur. Si au contraire elle s'abaisse, la colonne redescend jusqu'au point o , puis du mercure tombe en o à travers l'alcool. La colonne de mercure peut ensuite remonter, et le nombre de divisions n dont sa longueur a diminué, fait connaître l'abaissement de température au-dessous de t^o . — Il reste à évaluer la valeur des divisions en degrés centigrades. Pour cela, on pousse du mercure dans le tube, à une température connue t' ; on refroidit ensuite l'appareil jusqu'à t'' , et l'on observe la quantité n' dont s'est raccourcie la colonne, par la sortie d'une partie du

mercure. Alors $(t' - t'') : n'$ représente la valeur d'une division en degrés, et le minimum cherché est égal à $t - n \frac{t' - t''}{n'}$.

On peut opérer autrement : tout le mercure étant rassemblé dans le réservoir inférieur, à une température supérieure au minimum cherché x , on renverse l'instrument et on le plonge dans le milieu à explorer. De l'alcool passe alors dans le réservoir à mercure. On redresse le thermomètre et, le bec o plongeant dans le mercure, on le porte à une température connue t supérieure à x . Alors du mercure monte dans le tube, et s'il occupe n divisions, c'est que la température t surpasse le minimum, du nombre de degrés qui correspond à n .

Les thermomètres à déversement sont employés principalement au fond de la mer, dans les puits artésiens. La forte pression qu'ils supportent à de grandes profondeurs pouvant les briser ou en fausser les indications, on les renferme dans de forts tubes de métal, fermés hermétiquement par un bouchon à vis, auquel est attachée la corde destinée à remonter l'appareil. A la partie inférieure du tube, est suspendu un boulet servant de lest.

1361. Thermomètres enregistreurs. — Les observations météorologiques sont singulièrement facilitées par l'usage des instruments enregistrant automatiquement leurs propres indications.

Thermomètre à pointage de Bréguet. — Cet appareil (fig. 956) consiste en un thermomètre métallique *r*, de A. Bréguet (1006), dont l'aiguille, *e*, porte à son extrémité un petit tube vertical rempli d'encre grasse. A, est une caisse contenant un mouvement d'horlogerie, qui fait avancer une plaque horizontale, B, sur laquelle sont tracés 24 arcs égaux. Ces arcs viennent se placer successivement sous la pointe de l'aiguille *e*, à la fin de chaque heure. En ce moment, un ressort qui dépend de l'horloge, abaisse brusquement la pointe de l'aiguille, qui vient alors marquer un point noir sur l'arc qui se trouve immédiatement au-dessous. La place de ce point sur l'arc fait connaître la position de l'aiguille, et par conséquent la température, à l'heure du passage de cet arc sous la pointe.



Fig. 957.

Despretz a indiqué un *thermométrographe* qui donne la température pour tous les instants de la journée : une lame double, *ab* (fig. 957), de fer et de cuivre, de 2 à 3^m de longueur, est fixée par son extrémité *a*. L'extrémité inférieure, *b*, se déplace à droite ou à gauche quand la température varie, à cause de l'inégale dilatation des deux métaux. Elle porte un crayon dont la pointe décrit alors une courbe sur une bande de papier, *mn*, mue verticalement par une horloge ; les inflexions de la courbe indiquent les variations de température, à partir de celle qui correspond à la position suivant *ab* de la double lame.

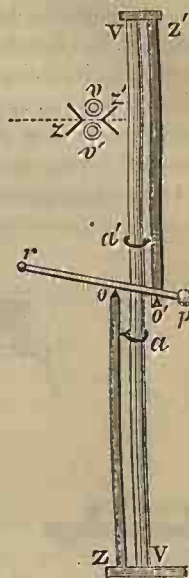


Fig. 958. — 1/20.

La figure 958 représente le thermomètre de M. Kreeke, qui enregistre depuis longtemps les températures à l'observatoire d'Utrecht ; *v, v'* en est une coupe par un plan horizontal. *VV* ; *v, v'* sont deux tubes de verre verticaux portés par un socle F, sur lequel est fixée une mince bande de zinc *Zo, z*, pliée en gouttière, pour lui donner de la rigidité. En *Z'*, est fixée une seconde bande de zinc *Z'o', z'*, identique à la première. Ces bandes sont maintenues par des anneaux *a, a'* qui peuvent glisser librement sur les colonnes de verre, et elles sont terminées par des couteaux en acier, dont un, *o'*, soutient l'extrémité *p* d'un levier *pp*, et l'autre *o*, l'extrémité *r*, un peu moins pesante que *p*. Quand la température s'élève, les deux bandes de zinc, en se dilatant, font basculer le levier *pr* autour d'un point idéal situé entre *o* et *o'*, et son extrémité *r*, munie

d'un crayon, trace une courbe sur une bande de papier qui se meut horizontalement. Comme le zinc se dilate environ 4 fois plus que le verre, le crayon se déplace beaucoup, et d'autant plus que les points d'appui o, o' sont plus rapprochés, et le bras or' , plus long.

On a imaginé d'autres systèmes mécaniques, pour enregistrer les températures ; dans quelques-uns, l'électro-magnétisme est mis à contribution. On a même construit des appareils réunissant tous les instruments de météorologie, et enregistrant mécaniquement la température, la pression de l'air, le vent, l'humidité, la pluie. Le *météorographe* du P. Secchi est un des appareils les plus complets de ce genre. M. Von Baumhauer a aussi imaginé un système qui permet, entre autres, de recueillir les indications d'instruments spéciaux installés dans des *observatoires solitaires* que l'on ne visite que de temps en temps. On retire alors les feuilles sur lesquelles sont tracées les courbes, on les remplace par d'autres, et l'on remonte l'horloge motrice.

1362. Enregistreurs photographiques. — Au moyen de la photographie, on peut enregistrer les variations de position du niveau d'une colonne de mercure.

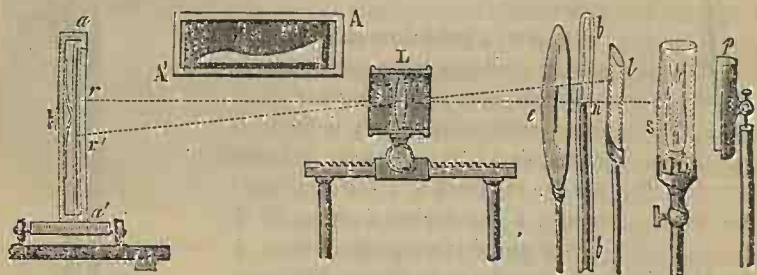


Fig. 959.

Mais quand il s'agit du thermomètre, cette colonne devant être placée dans l'obscurité, tandis que le réservoir doit être au dehors, on emploie un thermomètre différentiel spécial, composé d'un tube de verre en forme de U contenant du mercure. Une des branches communique par un tube flexible avec un réservoir métallique, enfoncé dans le sol qui le maintient à une température constante connue, et l'autre communique avec un second réservoir semblable au premier exposé au dehors où il doit prendre la température de l'air. Les mouvements de l'un des niveaux dans le tube en U font connaître les variations de température de l'air extérieur.

La figure 959 représente l'ensemble de l'enregistreur photographique de M. Ronals. L'appareil est placé dans une chambre obscure. n est le niveau dont il s'agit d'enregistrer les mouvements ; on a pris pour exemple celui de la colonne d'un baromètre. En s , est la flamme d'une lampe ou d'un bec de gaz, placée au foyer d'un miroir cylindrique vertical p à section parabolique, qui réfléchit les

rayons lumineux parallèlement les uns aux autres. Ces rayons sont reçus par une lentille cylindrique verticale l , qui les concentre en un foyer linéaire, sur le tube bmb . Un écran e percé d'une fente étroite verticale, ne laisse passer qu'un mince faisceau de rayons lumineux. Une lentille L forme en rr' une image renversée de la partie de la fente qui dépasse le niveau n de la colonne de mercure; les rayons correspondant à la partie de cette fente, inférieure à ce niveau étant arrêtés par le mercure. L'image est reçue sur une feuille de papier sensible, c'est-à-dire imprégnée de substances susceptibles d'être modifiées par la lumière. Ce papier sensible est tendu sur un châssis aa' , auquel une horloge imprime un mouvement lent et régulier perpendiculaire à la direction des rayons lumineux. Quand tous les points du papier sont passés successivement sous l'image lumineuse, on trempe ce papier dans l'acide pyrogallique, qui le noircit dans les parties où a agi la lumière, et le laisse blanc partout où le mercure du baromètre l'a préservé de l'action des rayons. La courbe formée par le bord de la partie blanche, indique les variations de position du niveau du mercure. On voit en AA' l'aspect de la feuille sensible à la fin d'une expérience. Une division tracée sur le côté vertical du châssis permet d'évaluer les différences de hauteur. Une autre division tracée sur un des côtés horizontaux indique les heures correspondantes.



Fig. 960.

M. Regnault¹ a proposé un thermomètre formé d'un réservoir d'argent rempli d'air, placé au dehors, et communiquant avec un manomètre à mercure disposé comme celui du pyromètre à air (1041) et placé dans la chambre noire, où les mouvements du niveau sont enregistrés par la photographie. La communication entre le réservoir et le manomètre est obtenue au moyen d'un de ces tubes capillaires d'argent que M. Regnault a appris à tirer à la filière, et qui, sous un diamètre intérieur de $\frac{1}{3}$ mm, peuvent atteindre une vingtaine de mètres.

1363. Montre-thermomètre. — M. J. Jürgensen a imaginé un appareil qui donne de lui-même la moyenne des températures qui ont eu lieu pendant un certain temps. Il consiste en une montre dont le balancier est muni de doubles lames a, a, a (fig. 960) formées de platine et de cuivre, comme dans les chronomètres compensés (842); seulement, le métal le plus dilatable est, ici, en dedans. Il résulte de là que, si la température s'élève, les masses n, n, n s'éloignent de l'axe, et la montre retarde; elle avance, au contraire, quand la température baisse. On cherche, par tâtonnement, à quelle température t le balancier fait une oscillation par seconde, ou 86400 oscillations en 24 heures. La différence entre le nombre des oscillations accomplies pendant un temps donné et le nombre de secondes qu'il contient, sert à calculer la différence entre la température moyenne pendant ce temps et la température t ; car, chaque

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIV, p. 236.

température agit, pour modifier le mouvement, proportionnellement à sa durée et à son intensité. Une table, construite par comparaison, fait connaître combien de degrés correspond un battement de plus ou de moins pendant un temps donné. On a fait de ces montres-thermomètres qui varient de 32^s, et même de 51^s, en 24 heures, pour une différence de température de 1^e.

M. Ed. Becquerel obtient la température moyenne, par une méthode analogue, au moyen d'une horloge dont le mouvement est réglé par un pendule analogue aux pendules compensateurs (1003), mais dont la disposition est renversée, de manière que les oscillations se ralentissent quand la température s'élève, et s'accroissent quand elle s'abaisse.

II. De la température de l'air en un même lieu.

1361. Manière d'observer la température de l'air. — Un thermomètre exposé à l'air libre, est influencé par diverses causes qui rendent ses indications incertaines : par exemple, la chaleur émise par le sol et les corps environnants, la reverberation des rayons solaires, le rayonnement du thermomètre lui-même vers les corps plus froids, vers l'espace. Il suffit souvent de déplacer l'instrument de quelques mètres, ou même de l'orienter différemment, pour que ses indications changent. Pour obtenir des résultats comparables, il faut donc éliminer ces diverses influences, et s'attacher à évaluer la température de l'air, ce qui exige de nombreuses précautions.

Position du thermomètre. — Le thermomètre doit être suspendu à deux mètres environ au-dessus du sol, à l'ombre et exposé au nord. Il ne doit y avoir au devant, ni édifices, ni aucun obstacle capable de renvoyer la chaleur du soleil; on l'abrite entre deux plateaux de bois placés horizontalement, de manière qu'il ne voie ni le ciel ni la terre. — Pour contrôler ses indications, on attache à un cordon un petit thermomètre, et on le fait tourner comme une fronde. L'air se renouvelant sans cesse autour de l'instrument, l'effet produit par son contact est très-grand par rapport à celui des divers rayonnements. Bravais a reconnu que les températures obtenues par ce moyen sont inférieures pendant le jour à celles que donne un thermomètre fixe, et supérieures pendant la nuit; ce que l'on pouvait prévoir. En général, un thermomètre fixe donne une température comprise entre celle du sol et celle du *thermomètre fronde*.

Pour éviter les effets du rayonnement, M. Renou a imaginé de renfermer le réservoir du thermomètre dans un double tube noirci en dedans, et dans lequel on fait circuler l'air dont on veut obtenir la température. Viard, de son côté, a employé avec succès une disposition analogue : le thermomètre était placé au milieu de deux tuyaux concentriques; l'air, entrant par le bas du plus étroit, descendait par l'espace qui les séparait et se rendait dans une caisse, d'où il sortait par un tuyau de tôle dans lequel brûlait une lampe produisant un tirage. Si l'on modifiait la vitesse du courant d'air, le thermomètre ne variait pas de $\frac{1}{10}$ de degré, ce qui montre qu'il indiquait bien la température de l'air.

On place souvent aussi le thermomètre dans une sorte de cage à jalousies qui le préserve du rayonnement des corps extérieurs, tout en permettant à l'air de circuler facilement autour de l'instrument. Enfin, le Congrès météorologique de Bruxelles, en 1853, et la Société royale de Londres, ont engagé à observer plusieurs thermomètres à pouvoirs absorbants différents, les uns couverts de noir de fumée, les autres argentés ou à surface vitreuse. Il est évident que, s'ils sont d'accord, c'est qu'ils ne sont pas influencés par les divers rayonnements, et qu'ils donnent exactement la température de l'air.

1365. Températures moyennes. — Si l'on observe le thermomètre pendant 24 heures, en un lieu donné, à des instants assez rapprochés pour que les changements soient peu étendus pendant les intervalles, et si l'on divise la somme des degrés observés par le nombre des observations, on a la *température moyenne* du jour. Comme les variations sont assez lentes, il suffit d'observer d'heure en heure. Cette manière d'opérer est assujettissante; mais on a constaté que la moyenne obtenue coïncide avec celle qui serait donnée par trois observations seulement, faites l'une à *midi* et les deux autres au *lever* et au *coucher* du soleil. Enfin, de Humboldt a reconnu, en discutant un grand nombre d'observations recueillies en Europe et sous l'équateur, que, dans tous les climats et sous toutes les latitudes, la moyenne entre le *maximum* et le *minimum* coïncide, à quelques dixièmes de degré près, avec la moyenne du jour. On peut donc se contenter d'observer les thermomètres à maximum et à minimum. Cette méthode, suivie par beaucoup de météorologistes, n'exige pas qu'on observe à heure fixe. Aujourd'hui, l'usage des instruments enregistreurs rend la tâche encore plus facile.

En divisant par le nombre des jours du mois la somme des moyennes de tous les jours, on obtient la *moyenne mensuelle*. En divisant par 12, la somme des 12 moyennes mensuelles, on a enfin la *moyenne annuelle*.

Moyenne d'un lieu. — La moyenne annuelle n'est pas la même tous les ans en un même lieu; cependant les différences ne dépassent pas généralement 5 à 6°. A Paris, pendant 30 ans, elles n'ont pas atteint 3°. Si l'on fait la somme des moyennes annuelles observées pendant un certain nombre d'années, et qu'on divise cette somme par ce nombre, on obtient la *température moyenne du lieu*, et avec d'autant plus de sûreté qu'on embrasse un plus grand nombre d'années. Par exemple, à Paris, des observations poursuivies pendant 30 ans ont donné la moyenne 10°,67. Comme la différence d'une année à l'autre n'atteint jamais 3°, l'erreur sur la moyenne du lieu ne peut dépasser $\frac{3}{30}$ ou $\frac{1}{10}$ de degré. Il faut au moins 10 années pour que les différences accidentelles entre les années successives se compensent sensiblement, et qu'on puisse compter sur une bonne moyenne.

1366. Variations diurnes en un même lieu. — La température varie d'un moment à l'autre du jour de 24 heures, à cause des changements de distance du soleil à l'horizon, tant au-dessus qu'au-dessous. Pour avoir une idée générale de la marche de la température pendant les 24 heures, il faut se

débarrasser de l'influence des saisons et des variations accidentelles dues à diverses causes, comme le degré de pureté de l'atmosphère, la présence des nuages, la direction du vent, la pluie, etc. Pour cela, on prend, pour chaque heure du jour, la moyenne des températures observées à cette heure pendant plusieurs années. On doit à Bouvard une série d'observations semblables faites pendant 16 ans, de 1816 à 1831, à l'Observatoire de Paris. Le thermomètre était consulté quatre fois : à 9 h. du matin, à midi, à 3 h. et à 9 h. du soir ; avec le maximum et le minimum de chaque jour, on avait donc six résultats. Les températures des autres heures étaient intercalées au moyen de formules d'interpolation, ou de constructions graphiques. La figure 961 montre la loi générale de la marche de la température pendant 24 heures, à Paris. Les abscisses représentent les heures, et les ordonnées, les températures à l'échelle de 2^{mm} par degré.

En prenant la moyenne des températures de toutes les heures, on trouve, pour la moyenne de Paris, $10^{\circ},67$. Le *minimum moyen* est $7^{\circ},13$; il a lieu à

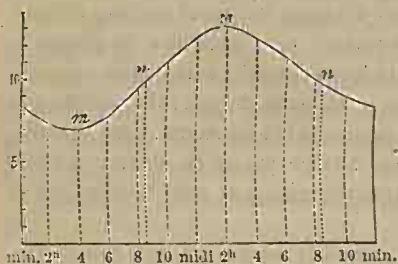


Fig. 961.

4 heures du matin (*m*, fig. 961). Le *maximum moyen*, *M*, a lieu à 2 heures après midi ; il est égal à $14^{\circ},47$. On voit donc que l'air s'échauffe pendant 10 heures, de 4 heures du matin à 2 heures du soir. A partir de 2 heures, l'action du soleil sur le sol et sur les couches inférieures de l'atmosphère est trop faible pour compenser le refroidissement par rayonnement, et la température baisse jusqu'à 4 heures du matin, c'est-à-dire pendant 14 heures.

Si l'on prend la moyenne entre le *maximum* et le *minimum moyens* à Paris, on trouve $10^{\circ},80$, qui diffère à peine de la moyenne $10^{\circ},67$.

Enfin, à $8^{\text{h}},20^{\text{m}}$ du matin et du soir (*n*, *n*, fig. 961), on trouve la *moyenne de l'année*, $10^{\circ},67$. Il résulte de là qu'on pourrait à la rigueur, pour obtenir cette moyenne, se contenter d'observer une fois chaque jour, à $8^{\text{h}},20^{\text{m}}$ du matin ou du soir ; mais, comme la température varie très-rapidement quand on approche de ces heures, on commettrait des erreurs notables si l'on observait un peu trop tôt ou un peu trop tard. — Si l'on voulait ne consulter le thermomètre qu'aux heures du *maximum* et du *minimum*, on n'obtiendrait pas le même résultat qu'avec les thermomètres à index, parce que les époques du *maximum* et du *minimum* sont souvent déplacées de plusieurs heures par des causes accidentelles.

Il s'agit, dans tout ce qui précède, de la moyenne générale annuelle, sans distinction de mois ou de saisons. Si l'on considère à part les différents mois, on trouve que l'heure unique à laquelle il faut observer pour avoir la *moyenne mensuelle* change d'un mois à l'autre. A Paris, l'heure de la moyenne du matin

est, pour janvier, 10^h, et pour juillet, 7^h. Les heures de la moyenne des autres mois sont intermédiaires entre ces deux-là. — Les heures du maximum et du minimum éprouvent aussi des déplacements suivant les saisons. On peut dire, en général, que le *maximum* a lieu un peu avant 2^h en hiver, et un peu après, en été. Le *minimum* se présente, dans nos climats, une demi-heure environ avant le lever du soleil, quand cet astre est à 12° au-dessous de l'horizon, si l'on considère les résultats de toute l'année. Mais, si l'on veut séparer les saisons, on trouve que le minimum a lieu, en hiver et en automne, quand le soleil est à 18° au-dessous de l'horizon, et, en été, quand il n'est qu'à 6°. A Paris, le minimum, qui a lieu à 4^h du matin quand on considère toute l'année, a lieu vers 6^h en hiver, et vers 3^h en été.

1367. Moyennes mensuelles. — Les climats dépendent tout particulièrement des variations de la température d'un mois à l'autre, et des maximum et minimum qu'on observe aux différentes époques de l'année.

Voici, pour Paris, les moyennes des différents mois, et leur maximum et leur minimum moyens; résultats déduits par Bouvard d'observations poursuivies pendant 16 ans.

MOIS	MAXIMUM	MINIMUM	MOYENNE
Janvier.....	4,0	—0,1	2,0
Février.....	6,8	1,2	4,0
Mars.....	10,5	3,5	7,0
Avril.....	15,2	6,1	10,7
Mai.....	18,6	9,4	14,0
Juin.....	21,8	12,1	17,0
Juillet.....	23,4	13,9	18,7
Août.....	23,0	13,7	18,2
Septembre.....	20,1	11,4	15,8
Octobre.....	15,2	7,8	11,5
Novembre.....	9,4	4,5	7,0
Décembre.....	5,8	2,0	3,9

En divisant par 12 la somme des moyennes mensuelles, on trouve pour moyenne de l'année 10°,80. On arrive au même nombre en prenant la moyenne des maximum et des minimum.

La figure 962 fait embrasser d'un seul coup d'œil les résultats consignés dans le tableau qui précède. Les températures sont représentées par les ordonnées, à l'échelle de 1^{mm} pour 1°. Les courbes supérieure et inférieure passent par les extrémités des *maximum* et des *minimum moyens* des différents mois, et la courbe tracée en points correspond aux *moyennes mensuelles*.

On voit que, pour Paris, 1° les mois les plus chauds sont juillet et août; dont

les températures ne diffèrent que de quelques dixièmes de degré; le maximum moyen tombe le 26 juillet. — 2^o Le mois le plus froid est janvier; le minimum se présente vers le 15 de ce mois. — 3^o La différence entre le minimum et le maximum est plus grande dans les mois chauds que dans les mois froids, et, par conséquent, dans les jours chauds que dans les jours froids; ce qui s'explique facilement, le rayonnement de la terre vers l'espace étant d'autant plus prononcé pendant la nuit que la température est plus élevée pendant le jour. — 4^o La moyenne du mois d'avril se confond, à un dixième de degré près, avec la moyenne annuelle; et celle du mois d'octobre en diffère peu. Il résulte de cette dernière remarque qu'il suffirait, à Paris, pour obtenir la moyenne annuelle, d'observer la température chaque jour du mois d'avril; mais il ne faut pas oublier qu'on ne pourra obtenir un résultat exact qu'autant qu'on prendra la moyenne des résultats obtenus ainsi pendant un assez grand nombre d'années, afin de faire disparaître les variations accidentelles que pourraient présenter les moyennes de ce mois.

1368. Marche annuelle de la température. — L'inspection de la courbe

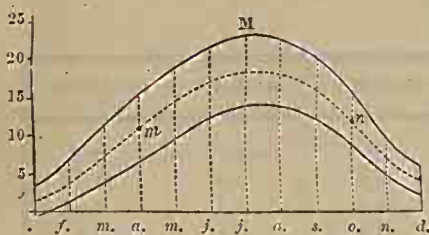


Fig. 962.

des moyennes mensuelles *mn* (fig. 962) montre comment la température moyenne des mois croît de janvier à juillet, pour décroître ensuite. La loi paraît être sensiblement la même dans tout l'hémisphère nord; cela résulte d'observations faites à des stations très-éloignées les unes des autres : en Laponie, au golfe Persique, en Amérique. Cette marche de la température s'expli-

que par les changements qui surviennent dans la durée relative des jours et des nuits, et dans la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon à midi, changements dus eux mêmes à l'inclinaison de l'axe de la terre sur le plan de l'écliptique. À partir de janvier, les jours croissent aux dépens des nuits; et la hauteur du soleil augmente. Ces changements sont d'abord lents; aussi n'est-ce que vers l'équinoxe que la température commence à croître notablement. Alors, les jours devenant plus longs que les nuits, le gain de chaleur pendant le jour est plus grand que la perte qui se fait pendant la nuit. L'accroissement devient moins prononcé quand on s'approche du solstice d'été, qui a lieu du 20 au 21 juin, parce que les changements dans la hauteur du soleil et dans la durée des jours sont alors peu prononcés. Après le solstice, la température continue cependant à augmenter jusqu'au 26 juillet, la chaleur reçue dépassant toujours la perte nocturne. À partir de cette époque, la température baisse rapidement jusqu'au milieu de janvier.

Saisons météorologiques. — Le *maximum* et le *minimum* de température annuelle n'ayant pas lieu à l'époque des solstices, les météorologistes ont géné-

ralement adopté une division de l'année en *saisons météorologiques*, différentes des saisons astronomiques. Le *minimum* de l'année ayant lieu vers le 15 janvier, ce jour est pris pour le milieu de l'hiver, qui se compose alors des mois de décembre, janvier et février. Le *printemps* est formé des trois mois suivants; l'*été* de juin, juillet et août, et l'*automne* de septembre, octobre et novembre. Le *minimum*, le *maximum* et la *moyenne* annuelle, qui tombe en avril et octobre, arrivent alors vers le milieu des saisons.

1369. Variations accidentelles. — Moyennes de 5 jours. — Indépendamment des variations périodiques de la température, il y a à considérer, en un même lieu, les *variations accidentelles* que les moyennes font disparaître. Ces variations peuvent affecter en même temps de vastes contrées; et d'autres, en sens inverse, se produisent ordinairement, au même moment, dans des régions différentes aussi très-étendues. Pour saisir ces fluctuations, les périodes mensuelles sont trop longues et les périodes diurnes trop courtes, les causes purement locales ayant par trop d'influence dans un aussi court délai. On a adopté, dans plusieurs observatoires, des *périodes de 5 jours* partant du 1^{er} janvier. En comparant les *moyennes de 5 jours* obtenues dans un même lieu aux différentes époques de l'année, on pourra connaître les saisons où les variations sont le plus fréquentes et le plus étendues. On pourra aussi, en comparant les résultats obtenus dans divers pays, connaître leur *variabilité comparative*, et calculer le coefficient de *disposition* à des variations irrégulières, qui ont tant d'influence sur la nature des climats.

III. Température de l'air à différentes latitudes.

1370. MOYENNES A DIFFÉRENTES LATITUDES. — La température moyenne aux différents points d'un même méridien va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur; ce qui s'explique par la diminution de hauteur du soleil à midi au-dessus de l'horizon. Mais cette moyenne dépend aussi de diverses causes qui font qu'elle n'est pas la même sur tous les points ayant même latitude. En effet, si l'on fait passer une courbe par tous les lieux qui possèdent une même température moyenne, on trouve que cette ligne n'est pas une circonférence parallèle à l'équateur; mais une courbe d'autant plus irrégulière qu'elle correspond à une moyenne plus basse.

Lignes et bandes isothermes. — De Humboldt nomme *lignes isothermes*, des courbes tracées sur la surface du globe, et passant par tous les points qui ont même température moyenne. Il appelle *bande* ou *zone isotherme* l'espace compris entre deux lignes isothermes. C'est en 1817, dans un travail remarquable qui a fait époque dans la météorologie, qu'il est parvenu, le premier, à construire des *lignes isothermes* dans notre hémisphère, en discutant les observations recueillies jusqu'alors¹. Depuis, le nombre de points connus s'est consi-

¹ Mémoires de la Société d'Arcueil, t. III, p. 462.

dérablement accru; si bien que M. Muhlmann a pu calculer les moyennes de 305 stations, prises dans toutes les parties du monde. Profitant des nombreuses données recueillies de tous côtés, M. Kaemtz, en 1831, a repris le travail de De Humboldt, et a trouvé des lignes isothermes qui se confondent, sauf en quelques points, avec celles de son illustre devancier¹.

La fig. 963 montre les courbes isothermes de 25°, 20°, 15°, 10°, 5°, 0°, — 5°, — 10°, et — 15°; elles sont aussi tracées en lignes pleines sur la figure 965. On voit qu'elles s'écartent des pôles, dans l'Asie et dans l'Amérique. Ce sont donc des continents plus froids que l'Europe et que le grand Océan. A partir de l'isotherme de 5°, on voit se dessiner deux inflexions tournant leur



Fig. 963.

convexité vers le pôle et se prononçant de plus en plus, et la courbe finit par prendre la forme d'un 8. Elle se sépare ensuite en deux parties distinctes, de manière à envelopper deux points voisins des pôles, nommés *pôles du froid*, où la moyenne est plus basse que partout ailleurs.

1371. Pôles du froid. — On a admis pendant longtemps qu'il n'en existait qu'un dans notre hémisphère. Mais, il y en a deux comme Brewster l'a reconnu le premier, en remarquant comment les lignes isothermes se dépriment et finissent par se diviser en deux systèmes de courbes fermées. M. Kaemtz les place, l'un au nord du détroit de Barow, en Amérique, et l'autre en Sibérie, à l'est du cap Taymour. Leur position se reconnaît facilement sur la figure 963,

¹ Cours de météorologie de M. Kaemtz, traduction française, p. 475 et suiv.

d'après les courbes isothermes qui les entourent. Suivant M. Berghaus, la moyenne du premier serait de -19° , et celle du second de -17° . Ces nombres sont fort incertains, ainsi que les positions des pôles du froid; des observations suivies étant impossibles dans ces régions glacées, où les plus intrépides voyageurs ne séjournent qu'au péril de leur vie.

Quant à la moyenne du pôle terrestre, on n'a pu l'observer directement, et les valeurs qu'on lui assigne diffèrent notablement les unes des autres. Ce qui est certain, c'est que cette température n'est pas la plus basse, comme on l'a cru longtemps. Ainsi, Parry, qui a séjourné 10 mois à l'île Melville, y a trouvé une moyenne de $-18^{\circ},5$; les extrêmes ont été -47° et $+15^{\circ},6$. Tandis que W. Scoresby, plus près du pôle, à la latitude de 78° n'a trouvé que 8° à -9° . On a donc pu dépasser les points les plus froids de l'hémisphère boréal. C'est par le nord de l'Europe, en suivant à peu près le méridien de Paris, pour éviter les pôles du froid, qu'on peut espérer d'atteindre le pôle terrestre.

1372. Équateur thermal. — De Humboldt, d'après des observations faites aux bords de la mer, fixe à $27^{\circ},7$ la température moyenne de l'équateur. Dans l'intérieur des continents, on trouve une moyenne plus élevée : M. Douville a trouvé 32° au Congo; M. Boussingault 28° , d'après des observations faites dans diverses parties des Andes; et, dans l'intérieur de l'Afrique, on a trouvé 29° . On voit donc que l'équateur géographique n'est pas une ligne isotherme. On nomme *équateur thermal*, ET (fig. 965), la ligne isotherme dont la moyenne est la plus élevée.

M. Berghaus a reconnu qu'elle s'élève un peu vers le nord, en Afrique, et coupe la ligne équinoxiale en deux points opposés, situés, l'un dans l'île de Sumatra, et l'autre sur la côte du Pérou; ce qui montre qu'elle redescend vers le sud dans le grand Océan. Au reste, la figure de l'équateur thermal est mal connue, à cause du trop petit nombre d'observations, et de l'incertitude qui règne sur l'exactitude de la plupart d'entre elles.

On distingue aussi l'*équateur thermique*, courbe qui passe par les points de chaque méridien où la température moyenne est maximum. Ce n'est donc plus une ligne isotherme.

1373. Températures sur un même méridien. — La température moyenne va en diminuant sur les divers méridiens, suivant des lois différentes, puisque les isothermes ne sont pas des cercles. La figure 964 donne une idée de la loi de cette diminution, sur le méridien qui traverse l'Asie et l'Amérique, méridien qui paraît présenter des températures moyennes intermédiaires entre celles du demi-méridien le plus chaud, qui traverse l'Afrique, et du demi-méridien le plus froid, qui coupe le grand Océan. Sur ox sont les latitudes, et sur des parallèles à oy , les températures, à l'échelle de $0^{\text{mm}},5$ par degré. En France, il faut s'avancer de $185\ 200^{\text{m}}$ vers le nord pour trouver 1° de moins.

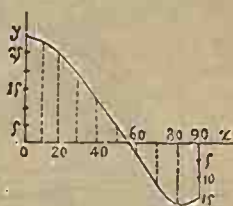


Fig. 964.

Zones isothermes. — Les météorologistes partagent généralement la surface du globe en *sept zones isothermes*, de la manière suivante :

1. Zone torride, ou équatoriale.....	de 30° à 25°
2. Zone chaude.....	de 25 à 20
3. Zone douce.....	de 20 à 15
4. Zone tempérée.....	de 15 à 10
5. Zone froide.....	de 10 à 5
6. Zone très-froide.....	de 5 à 0
7. Zone glaciale, ou polaire.....	de 0 à —T°

1374. MOYENNES HIVERNALE ET ESTIVALE. — La nature d'un climat ne dépend pas seulement de la température moyenne, mais encore de la plus basse et de la plus



Fig. 965.

élevée. On conçoit que, avec une même moyenne annuelle, les hivers soient très-doux, ou assez rigoureux pour faire périr certaines espèces animales ou végétales ; et les étés, très-chauds, ou trop modérés pour que certains fruits puissent mûrir. Par exemple, à Paris, où la moyenne dépasse 10°, le raisin ne donne qu'un vin à peine potable, tandis qu'à Astrakhan, sur la mer Caspienne, tous les fruits sont exquis, et cependant la moyenne n'est que de 9°. Il est donc important de considérer séparément les températures moyennes de l'hiver et de l'été. — Si l'on fait passer des lignes par les points qui possèdent la même *moyenne hivernale*, on obtient ce que de Humboldt appelle une ligne *isochimène* ($\chi\epsilon\iota\mu\acute{\epsilon}\nu\eta$, hiver). Il nomme ligne *isothère* ($\theta\acute{\epsilon}\rho\omicron\varsigma$, été), une ligne qui passe par les points

qui ont la même *moyenne estivale*. Ces lignes, dont quelques-unes sont représentées (fig. 965), les premières en traits ponctués, les isothermes en lignes mixtes, sont moins connues que les lignes *isothermes*, qui sont tracées sur la même figure en lignes pleines. ET est l'équateur thermal, et e l'équateur d'été.

Les *lignes isochimènes* sont surtout importantes en ce qu'elles forment la limite géographique de certains végétaux : par exemple, l'olivier ne dépasse pas celle de 5°; celle de 0° sert à peu près de limite au hêtre, au mûrier et au châtaigner. On peut dire, en général, que les lignes isochimènes descendent rapidement à travers l'ancien continent, de l'ouest à l'est. La ligne de — 1° à + 1° passe à Uleaborg (Norvège), Berlin, Bade, Sébastopol et Pékin; en franchissant ainsi 21 degrés de latitude. A égale latitude, les hivers sont donc beaucoup plus froids en Chine que dans l'ouest de l'Europe, où la mer s'enfonce profondément dans les terres. Dans l'Amérique du nord, on remarque un fait analogue : à latitude égale, les contrées à l'ouest des monts Apalaches ont des hivers plus rudes que celles de l'est, plus rapprochées de la mer. Les étés sont aussi plus chauds du côté de l'ouest. — Les lignes isochimènes qui traversent l'Europe, se rapprochent rapidement de l'équateur quand on marche vers l'est, et la différence entre les étés et les hivers est d'autant plus prononcée qu'on s'approche davantage du milieu de l'ancien continent et de l'équateur.

Sur un même méridien, les différences entre les moyennes estivales et hivernales sont en général d'autant plus grandes que la *moyenne annuelle* est plus basse; et ces différences sont encore plus prononcées quand, au lieu des moyennes de l'été et de l'hiver, on considère celles du mois le plus chaud et du mois le plus froid. Ces résultats s'expliquent par l'augmentation de l'inégalité des jours et des nuits quand on s'avance vers le pôle. Enfin, on remarque que la différence entre les saisons, est moins prononcée près des points où les courbes *isothermes* se relèvent vers le nord, que près des points où elles s'abaissent vers l'équateur.

1375. Température de l'hémisphère austral. — On ne possède qu'un très-petit nombre d'observations dans l'hémisphère austral. On a reconnu cependant que l'*isotherme* de 5° coupe l'Amérique à la latitude de 55°, vers le détroit de Magellan. C'est aussi à la latitude de 55° que l'*isotherme* de 5° coupe l'Amérique du nord. Au cap de Bonne-Espérance, la température moyenne est plus basse de 3° que dans l'hémisphère boréal, et les eaux de l'Océan austral sont plus froides que celles des mers du nord, à égale latitude. On admet assez généralement que l'hémisphère austral est plus froid que l'autre, mais ce point n'est pas parfaitement établi. On sait du moins que, contrairement à ce qui a lieu au pôle nord, les isothermes sont de plus en plus régulières à mesure qu'on s'approche du pôle austral, ce qui tient à la prédominance des mers autour de ce pôle. En outre, les hivers y sont plus doux, et les étés moins chauds, quoique le globe terrestre soit plus près du soleil quand l'hémisphère austral est dans l'été, que lorsque cette saison arrive pour l'hémisphère boréal.

1376. Températures extrêmes. — Les *températures extrêmes* observées pendant l'année forment un élément très-important du climat. En effet, un froid

intense, ne durât-il que quelques jours, peut suffire pour faire périr certaines plantes, et en rendre la culture impossible. Ces températures extrêmes peuvent être considérées, soit d'une manière absolue, c'est-à-dire avec la valeur très-variable qu'elles présentent chaque année, soit en *moyenne*, d'après les extrêmes observés pendant plusieurs années. Saige y a formé le tableau suivant des extrêmes moyens correspondants à diverses moyennes annuelles ¹ :

Températures moyennes...	30°	20°	10°	0°	— 10°	— 20°	— 23°
Extrêmes de chaud.....	48	41	34	26	19	12	9
Extrêmes de froid.....	12	— 4	— 14	— 26	— 36	— 52	— 57
Variations totales.....	36	42	48	52	58	64	66

On voit que les extrêmes sont d'autant plus écartés l'un de l'autre que la moyenne est plus basse, c'est-à-dire la latitude plus élevée; résultat analogue à celui que présentent aussi les moyennes hivernale et estivale (1374).

La plus forte chaleur qu'on ait notée dans l'air est de 54°; elle a été supportée à l'oasis de Mourzouk par Lyon et Ritchie. Burckard a observé 47°,4 à Esné, dans la haute Égypte, par un khamsin, vent chaud venant du centre de l'Afrique.

Les plus grands froids ont lieu près du pôle nord. Quelquefois, le mercure y reste gelé pendant plusieurs semaines; ce qui suppose un froid de — 40° au moins. Parry a vu le thermomètre descendre à — 50°; et Kane et Black, au nord de l'Amérique, à — 50° et — 56°,7. C'est le froid le plus intense qu'on ait observé. On a bien cité des froids invraisemblables de 59°,5 et même 63° qui auraient été observés en Sibérie; mais on sait combien le thermomètre à alcool est peu sûr pour d'aussi basses températures.

À Paris, la chaleur extrême a été, *en moyenne*, depuis le commencement de ce siècle, de 32°,8; et le froid extrême, de — 10°,5. Quant aux extrêmes *absolus*, la plus haute température a été 38°,4, le 8 juillet 1793; et la plus basse, — 22°,5, le 31 décembre 1788.

Quand il s'agit d'apprécier les effets des températures extrêmes sur la végétation, il ne suffit pas d'en connaître la mesure : il faut encore savoir combien de temps elles ont duré. C'est ainsi qu'un froid vif, mais qui ne dure que quelques instants, à la fin de la nuit, peut n'être pas préjudiciable aux plantes, qui n'en ressentent l'influence que dans les organes superficiels; tandis qu'un froid moins vif, mais persistant plusieurs heures, peut les faire périr. Flaugergues avait imaginé d'apprécier la durée du froid pendant la nuit, en observant l'épaisseur de la glace formée sur l'eau; il avait même imaginé un instrument nommé *kruomètre*, destiné spécialement à ces sortes d'observations. De Gasparin emploie un simple vase rempli d'eau, exposé à l'air et abrité sur les côtés par des nattes de paille. L'épaisseur de la glace formée, qui dépend essentiellement de la durée du minimum, donne une idée de la *somme de froid* éprouvée par les plantes.

¹ *Petite physique du globe*, t. I, p. 63.

1377. CLASSIFICATION DES CLIMATS. — On a distingué les climats les uns des autres non-seulement d'après la température moyenne, mais encore d'après l'écart des températures extrêmes. Déjà Hippocrate, dans son *Traité des airs, des eaux et des lieux*, semble diviser les climats en *uniformes et variables*. Buffon a désigné sous le nom de *climats excessifs* ceux dans lesquels les extrêmes diffèrent beaucoup. Quand la différence est modérée, on a un *climat variable*; et un *climat uniforme ou constant*, quand la différence est faible. Par exemple, Paris possède un climat variable; la différence entre la moyenne du mois le plus chaud, 18°,01, et celle du plus froid, 3°,59, est de 14°,42. Les climats de New-York et de Pékin sont excessifs, la différence entre le mois le plus chaud et le plus froid étant de 30°,8 et 33°,2. Il en est de même de Pétersbourg, Moscou, Iakouz; les différences entre les moyennes estivale et hivernale sont 23°,6, 27°,7, 56°,1. Les îles Feroë et Shetland jouissent d'un climat constant, car les différences entre les moyennes estivales (11°,6 et 11°,9) et les moyennes hivernales (3°,9 et 4°) ne sont que de 7°,7 et 7°,9.

Nous allons voir que les climats constants appartiennent aux îles basses et aux côtes, et les climats excessifs à l'intérieur des continents. De là, la division des climats en *climats marins* et *climats continentaux*.

1378. Causes qui modifient les climats. — Les irrégularités des courbes *isothermes, isochimènes et isothères*, montrent que les climats ne dépendent pas seulement de la latitude. Ils sont influencés par l'étendue relative des mers et des terres, la configuration des côtes plus ou moins découpées, le relief des continents, la direction des chaînes de montagnes, les vents régnants, les courants marins, la nature du sol, la végétation qui le recouvre, etc.

Si la surface de la terre était unie et partout identique, la température ne dépendrait que de la latitude; mais il n'en est pas ainsi. On peut dire, en général, que le voisinage des grandes masses d'eau élève la température moyenne et rapproche les extrêmes. Ce résultat s'explique facilement : les rayons solaires pénètrent à une certaine profondeur dans la mer, et échauffent une couche d'eau assez épaisse, de manière que la température ne s'élève pas beaucoup à la surface pendant l'été. D'un autre côté, la chaleur qui se perd pendant l'hiver, venant d'une assez grande profondeur, le refroidissement de la surface est peu prononcé. Or, l'air en contact avec la mer tend à en prendre la température, et il en est de même de l'air des îles basses et des côtes qui présentent un grand nombre de golfes. — Les vents de mer adoucissent le froid pendant l'hiver, et diminuent la chaleur pendant l'été. Ainsi, les vents d'ouest, qui soufflent très-fréquemment, surtout pendant l'hiver, donnent aux côtes occidentales des deux continents un climat plus égal que celui des côtes orientales. De plus, ces vents humides n'activent pas l'évaporation, qui est une cause de refroidissement; et, en précipitant leur vapeur, pendant l'hiver, ils forment une brume qui empêche le refroidissement par rayonnement vers l'espace.

Sur les continents, au contraire, dans les parties éloignées de la mer, la sécheresse relative (869) et la transparence de l'atmosphère, qui favorisent à la

fois la transmission des rayons solaires et le rayonnement vers l'espace, l'accumulation de la chaleur dans les couches superficielles du sol, qui s'échauffent fortement à une très-faible profondeur et se refroidissent de même, rendent les climats excessifs.

Ces considérations, développées pour la première fois par L. de Buch, nous expliquent pourquoi l'Europe, dans laquelle on remarque de nombreuses mers intérieures et des golfes multipliés, possède un *climat marin*, surtout sous le méridien du mont Blanc, qui rencontre relativement le moins de terre. A partir de ce méridien, les extrêmes se séparent un peu quand on marche vers l'ouest, et de plus en plus quand on s'avance vers l'est. Les hivers scythes étaient un épouvantail pour les anciens Grecs. Le climat de la Chine est *excessif*; à Pékin, avec la moyenne de la Bretagne, l'été est plus chaud qu'au Caire, et l'hiver aussi rude qu'à Upsal. Plus au nord de l'Asie, on trouve à Irkoutsk, sur la Léna, et à Tobolsk et Barnaul, sur l'Obi, les étés de Cherbourg, Berlin et Münster; le thermomètre se tient des semaines entières à 30 et 31°, mais la moyenne des hivers est de — 18° à — 20°. Du pôle glacial au pôle géographique, le froid s'adoucit, à cause de la présence d'une mer libre et profonde, reconnue par le capitaine Weddel. — L'Amérique du Nord présente des faits analogues : le climat de la nouvelle Californie est uniforme, et celui de la partie orientale des États-Unis, excessif.

Le climat des pays voisins de la mer est aussi adouci par certains *courants marins*, sur lesquels nous reviendrons (1401), qui apportent sur certains rivages des masses d'eau échauffées par le soleil de l'équateur : par exemple, sur les côtes occidentales du nord de l'Europe, ainsi que sur quelques points des côtes orientales de l'Amérique.

1379. Climats locaux. — Les *climats locaux*, qui affectent des régions peu étendues, se distinguent du climat général d'une contrée par des caractères qui dépendent de circonstances locales : nature du sol, état de la culture, étendue des forêts, direction et configuration des vallées, marécages, voisinage et orientation des chaînes de montagne. Toutes ces causes locales impriment aux courbes des températures une foule de petites sinuosités que l'on néglige dans le tracé général de ces lignes.

Partout où règnent des vents chauds et humides, la température s'élève; les vents secs et froids la font, au contraire, baisser. Les marécages sont une cause de refroidissement, par l'évaporation abondante qui s'y fait, et, dans les latitudes élevées, par la glace qu'ils conservent jusqu'au milieu de l'été. Quant aux forêts, il semble qu'elles rendent les climats plus irréguliers; car on a observé, en Amérique, que le déboisement rapproche les extrêmes et élève probablement un peu la moyenne. Les forêts refroidissent les contrées qu'elles recouvrent, en absorbant les rayons solaires, par le travail physiologique (1354) et par l'active évaporation qui se fait à la surface des feuilles. De plus, elles arrêtent les vents de mer et les empêchent de pénétrer dans l'intérieur des continents.

IV. Température de l'atmosphère à différentes hauteurs.

1380. Froid des hautes régions de l'air. — Il résulte des expériences faites sur les hautes montagnes, et de l'observation des neiges perpétuelles qui couvrent leur sommet, que la température décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Depuis l'invention des aérostats, cette loi a été souvent confirmée : En 1804, Gay-Lussac, parti de Paris à la température de 28°, trouva — 9°,5, ou 37°,5 de moins, à la hauteur d'environ 7000m; à la même hauteur, Barral et Bixio, en 1850, trouvèrent — 30°. Nous verrons que le décroissement varie suivant la saison et l'heure du jour (1384), et que ce n'est qu'à partir d'une centaine de mètres qu'il se manifeste d'une manière constante et régulière (1385).

Causes du froid des hautes régions. — La chaleur que reçoit l'atmosphère vient du soleil; une partie des rayons de cet astre parvient à la surface du sol, l'autre est absorbée par l'air, mais en proportion d'autant plus faible qu'il est plus pur, moins dense et plus sec (869). Les couches supérieures de l'atmosphère s'échauffent donc peu. En outre, les rayons transmis élèvent la température du sol, qui chauffe ensuite par contact l'air qui le recouvre, et émet à travers l'atmosphère des rayons de chaleur *obscure* que l'air et la vapeur absorbent particulièrement, de manière qu'il n'en parvient que très-peu aux couches élevées. Les couches inférieures s'échauffent donc de trois manières : par contact du sol échauffé, par absorption des rayons directs du soleil, et par celle des rayons obscurs émis par le sol.

Les couches inférieures échauffées et dilatées tendent bien à s'élever et à transporter ainsi de la chaleur dans les régions supérieures; mais remarquons que ces couches se raréfient en montant, ce qui les refroidit. De plus, ces mouvements n'ont lieu que près du sol échauffé. En effet, il suffit, pour qu'il y ait équilibre *stable*, que les couches diminuent de densité de bas en haut; ce qui dépend à la fois de leur température et de leur pression. Par exemple, supposons que le sol soit à 25°, et que la température de l'air diminue de 1° pour 30m d'élévation, la couche d'air inférieure échauffée à 25° ne pourra s'élever; car, pour qu'elle monte de 30m, il faudrait que sa densité fût moindre que celle de la couche d'air qui se trouve à cette hauteur. Or, si 1 est la densité de l'air à 0°, sous la pression de 760mm, sa densité à 25°, sous la même pression, sera $\frac{273}{273 + 25} = 0,916$. La densité de la couche située à 30m de hauteur, dont la température n'est que de 24°, serait $\frac{273}{273 + 24}$ si la pression était la même; mais, comme la pression diminue à peu près de 1mm pour une élévation de 10m,5, ce qui fait 2mm,86 pour une hauteur de 30m, la densité ne sera que $\frac{273}{273 + 24} \cdot \frac{760 - 2,86}{760} = 0,909$, un peu plus faible que celle de la couche à 30°. Il n'y a donc pas de raison pour que celle-ci s'élève et vienne prendre la place de l'autre, à moins d'agitations accidentelles.

1381. Froid des hautes montagnes. — Quand on fait l'ascension d'une haute montagne, on remarque que la température s'abaisse graduellement

jusqu'à ce qu'on arrive à la limite des neiges qui couronnent les sommets les plus élevés. Il semble que l'on traverse des régions dont le climat est de plus en plus froid ; et, en effet, le botaniste, à mesure qu'il monte, rencontre successivement des flores différentes, lui présentant la même succession de plantes que s'il avançait graduellement vers le pôle.

Le froid des montagnes s'explique autrement que celui de l'air. Les sommets élevés rayonnent vers l'espace dans une infinité de directions à travers une atmosphère rare et pure, très-diathermane et d'une épaisseur moindre que dans les plaines. De plus, il n'y a pas, comme au-dessus des régions basses, une couche d'air échauffé rayonnant vers la terre la chaleur qu'elle a reçue. Il est vrai que si les couches d'air qui règnent au-dessus des montagnes sont facilement traversées par les rayons qu'émet le sol, elles laissent aussi passer facilement les rayons solaires ; mais l'excès d'intensité de ces derniers rayons ne compense pas l'excès de déperdition de ceux qui partent du sol, puisque c'est surtout pour les rayons obscurs que la différence de diathermanéité de l'air des plaines et des montagnes est sensible. Ch. Martins, qui a publié un bon travail sur ce sujet¹, ajoute à ces causes de refroidissement l'ascension des courants d'air sur le flanc des montagnes qui leur font obstacle. Aussi, peut-il arriver, pour les hauts plateaux éloignés des sommets isolés, que la température soit plus élevée sur ceux qui sont à la plus grande altitude. Cependant, de Humboldt a trouvé dans les villes de Popayan, Mexico, Bogota et Quito, qui sont situées sur des plateaux ayant des altitudes de 1769^m, 2277^m, 2660^m et 2907^m, des températures de 20°, 17°, 16° et 15°.

Saigey considère comme une des causes du refroidissement des montagnes, l'évaporation abondante qui se fait à leur surface, dans un air très-raréfié. Ch. Martins a particulièrement insisté sur cette cause, et c'est à la vapeur abondante qui se dégage, et qui se condense bientôt dans l'air froid, que sont dus ces brouillards qui s'élèvent des flancs des montagnes très-humides, et qui forment ce que Peltier a appelé le *fumage* des montagnes.

1382. Loi du décroissement de la température quand on s'élève. —

Cette loi est très-importante pour le calcul des réfractions astronomiques, et pour établir la formule qui donne les hauteurs au moyen du baromètre (I, 472). Jusqu'à 3000^m, l'abaissement de température est à peu près proportionnel à la hauteur ; mais au delà, cette loi ne peut plus être admise. Une des meilleures séries d'observations sur ce sujet a été faite par Gay-Lussac en 1804, lors de son voyage aérostatique ; il observa le thermomètre à 20 hauteurs différentes, et, arrivé à 6977^m, il trouva une différence de 40°,2 sur la température à Paris au même moment. D'où l'on conclut un abaissement de 1° pour 173^m d'élévation, en admettant que le décroissement de température soit uniforme, ce qui est loin d'être vrai, comme nous allons le voir.

Presque toutes les autres séries que nous possédons ont été faites sur les

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LVIII, p. 208.

montagnes ; or, il paraît certain que la température de l'air y est plus basse que dans les couches atmosphériques de même niveau ; c'est pourquoi le voisinage des hautes chaînes de montagnes rend les climats plus rigoureux. Il faut, du reste, observer autant que possible sur des pics isolés, autour desquels l'air circule librement.

Parmi les observations les plus remarquables, nous citerons celles de de Saussure, au sommet du mont Blanc, où il trouva — 2°,25, tandis que le thermomètre marquait 24° à Chamouni, et 28° à Genève, à 4372^m plus bas. D'où l'on conclut un abaissement de température de 1° pour une élévation de 144^m. De Humboldt a trouvé 191^m pour 1° sur différents sommets des Andes, et 218^m dans son ascension au Chimborazo, où il est parvenu à 5876^m au-dessus de la mer. Ramond a trouvé, dans les Pyrénées, 148^m ; Ch. Martins, 144^m sur le mont Ventoux ; M. Kaentz, 149^m sur le Rigi.... Les différences entre ces résultats ne proviennent pas seulement de ce que la température est plus basse sur les montagnes qu'au même niveau au-dessus des plaines, et de ce qu'elle est influencée par la forme de la montagne et l'état de sa surface, mais surtout de ce que le décroissement de la température dépend de l'heure du jour, de la saison, et de la latitude du lieu d'observation, comme nous le verrons bientôt (1384).

Quand on veut se contenter d'une première approximation, on peut admettre, en nombre rond, 180 mètres par degré dans nos climats, et 200 mètres sous l'équateur.

1383. Relation entre la température et la pression à différentes hauteurs. — L'intérêt majeur qu'ont les astronomes à connaître la loi du décroissement de la température jusqu'aux limites de l'atmosphère, a engagé les géomètres à soumettre la question au calcul. Mais on n'a disposé d'abord que d'un petit nombre d'observations, dont aucune n'avait été faite pendant la nuit. De plus, la plupart des géomètres ont supposé que l'atmosphère n'avait pas de limite, et que les couches supérieures étaient indéfiniment refroidies ; hypothèses qui les ont conduits à des résultats inadmissibles. Ils sont cependant arrivés à reconnaître que la diminution de la température n'est pas proportionnelle à la hauteur, et ils ont cherché une relation entre la température des couches atmosphériques et leur pression. Saigey¹, en discutant et combinant toutes les observations connues, est arrivé, de la manière suivante, à une relation très-simple entre ces deux éléments :

Supposons qu'on descende, du haut de l'atmosphère où la pression est nulle, à la surface de la terre où la température soit de 30° et la pression de 760^{mm}, et qu'on note la température toutes les fois qu'on trouve une augmentation de pression de 50^{mm} ; admettons enfin que la température de la dernière couche atmosphérique soit de — 62° (nous verrons plus loin (1387) comment on arrive à ce nombre), on formera le tableau suivant :

¹ *Petite physique du globe*, t. I, p. 79.

PRESSIONS	TEMPÉRATURES	DIFFÉRENCES	PRESSIONS	TEMPÉRATURES	DIFFÉRENCES
0 ^{mm}	— 62°,0		400 ^{mm}	— 1°,7	
50	— 53,0	9°,0	450	4,0	5°,3
100	— 44,4	8,6	500	9,3	4,9
150	— 36,2	8,2	550	14,2	4,4
200	— 28,5	7,7	600	18,6	4,0
250	— 21,2	7,3	650	22,6	3,6
300	— 14,3	6,9	700	26,2	3,2
350	— 7,8	6,5	750	29,4	
400	— 1,7	6,1	760	30,0	

Les différences étant inégales, on voit que les températures n'augmentent pas uniformément comme les pressions. Mais si l'on retranche chacune d'elles de celle qui la précède, on trouve sensiblement le même excès 0°,4. La température varie donc en progression arithmétique dont la raison est 0°,4, quand la pression varie en progression arithmétique dont la raison est 50^{mm}.

Saigy, en s'appuyant sur les observations faites à Fribourg, à Genève et à l'hospice du mont St-Bernard, admet que cette loi se vérifierait de même pour toute autre température de la surface du sol; et, de plus, que la première différence et l'excès d'une différence sur la suivante seraient proportionnels à l'excès de la température du sol sur celle de la couche limite de l'atmosphère; de manière qu'on pourrait calculer, en partant des valeurs 9°, 0°,4 et 30°, les deux nombres dont dépendent toutes les différences, pour des températures quelconques de la surface du sol.

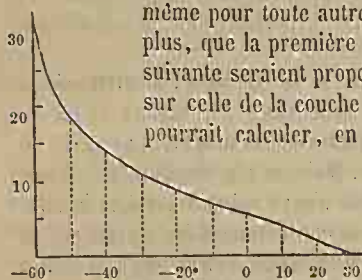


Fig. 966.

Les hauteurs qui correspondent aux températures du tableau précédent, s'obtiennent au moyen de la formule du baromètre (I, 472). La courbe de la figure 966 montre comment varient, pour des diminutions de température égales, ces hauteurs, qui sont représentées par les ordonnées, à l'échelle de 1^{mm} pour 1000^m. On voit que, si l'on suppose la température du sol à 30°, les hauteurs qui correspondent à une même diminution de température vont d'abord en croissant assez régulièrement jusqu'à la hauteur de 3 à 4000^m, pour laquelle la température est comprise entre 5 et 10°; au delà, les hauteurs correspondantes à 1° de moins, croissent un peu moins vite, puis de plus en plus rapidement. On voit donc que le refroidissement, qui d'abord va en s'accéléralant et présente l'accéléralation la plus prononcée vers 3000^m de hauteur, est ensuite de moins en moins prononcé à mesure qu'on approche des limites de l'atmosphère.

La hauteur à laquelle la température décroît le plus rapidement dépend de la

température du sol. On pourra toujours la calculer en suivant la marche que nous venons d'indiquer pour le cas où cette température est de 30° .

De Humboldt a reconnu, sur le Chimborazo, que le décroissement est peu prononcé entre 1000^m et 3000^m , où se trouve, sous l'équateur, la région des nuages. M. J. Welsh, dans 4 ascensions aérostatiques faites à Londres dans des circonstances atmosphériques très-diverses, a reconnu l'existence d'une couche d'air de 600^m environ d'épaisseur, dans laquelle la température est sensiblement constante, et qui paraît liée avec la précipitation des vapeurs atmosphériques abandonnant leur chaleur latente. A cette cause il faut joindre, avec de Humboldt, la chaleur solaire retenue par les nuages.

1384. Circonstances qui modifient le décroissement de la température. — Tout ce que nous venons de dire suppose qu'en prenant la moyenne d'un grand nombre de résultats, on a fait disparaître l'effet des circonstances accidentelles, telles que l'heure, la saison et la latitude du lieu.

Influence horaire. — Cette influence se reconnaît en faisant des obser-

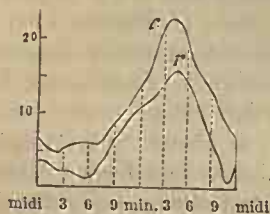


Fig. 967.

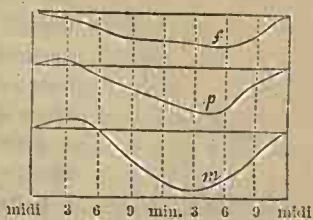


Fig. 968.

vations horaires simultanées à des hauteurs très-différentes. C'est ce qu'ont fait de Saussure pendant 17 jours, au Col du Géant, à 3428^m au-dessus de la mer, pendant que l'on observait en même temps à Chamouni et à Genève; et M. Kaemtz sur le Rigi, à 1810^m pendant qu'on observait simultanément à Bâle, à Berne, à Genève et à Zurich¹. Les résultats sont représentés par les courbes de la figure 967; les hauteurs correspondant à un abaissement de 1° sont indiquées par les ordonnées, à l'échelle de 1^m pour 4^m , en prenant pour point de départ la hauteur de 120^m ; les heures sont comptées sur la ligne des abscisses. La courbe *r* correspond aux observations du Rigi, et la courbe *c* à celles du Col du Géant. On voit que c'est vers 5 h. du soir que le décroissement de la température est le plus rapide, la hauteur qui correspond à 1° de moins étant la plus petite. Le décroissement est le plus faible vers le lever du soleil. Les irrégularités des courbes proviennent de ce que les valeurs qui ont servi à les construire sont trop peu nombreuses.

Il résulte des changements aux différentes heures, du décroissement de la température quand on s'élève, que les courbes des variations diurnes du

¹ Cours complet de météorologie, par M. F. Kaemtz, p. 409.

thermomètre (1366) ne peuvent être parallèles quand elles représentent les observations faites à différentes hauteurs. C'est, en effet, ce qui a lieu. Des observations faites par Bravais pendant 44 jours sur le Faulhorn (2673^m), et à Milan, Genève et Zurich, ont mis ce résultat en évidence. La figure 968 représente les courbes des températures horaires pour Milan *m*, Paris *p*, et le sommet du Faulhorn *f* pendant l'été; pendant l'hiver, elles seraient un peu différentes, comme il résulte des observations de M. Eschmann sur le Rigi.

Influence des saisons. — M. Kaemtz a formé le tableau des différences de niveau correspondant à un abaissement de 1°, dans les divers mois de l'année, pour Genève et le Saint-Bernard, et pour l'Allemagne méridionale et le nord de l'Italie. Les deux courbes de la figure 969 montrent ces différences de niveau pour les divers mois. La courbe *m* correspond à Genève et au Saint-Bernard, et la courbe *n* à l'Allemagne et l'Italie. On voit que c'est pendant les mois les plus chauds que le décroissement de la température est le plus rapide, ce qui se conçoit facilement. On voit aussi que l'influence des saisons diminue à mesure que le point de départ est plus élevé; la différence entre les moyennes estivales et hivernales doit donc diminuer à mesure qu'on s'élève. En effet, cette différence est de 19° dans les plaines de la Suisse, à 400^m environ; de 15° sur le Saint-Gothard (2091^m); de 13°,5 sur le Saint-Bernard (2493^m).

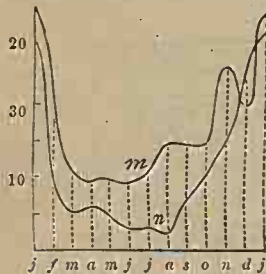


Fig. 969.

Influence de la latitude. — Le décroissement de la température à mesure qu'on s'élève étant plus rapide en été qu'en hiver, on pouvait prévoir qu'il serait plus rapide dans les pays chauds que dans les pays froids. En s'arrêtant au point où le décroissement est le plus rapide, M. Saigey trouve que, si le sol est à 30°, le décroissement est, en moyenne, de 1° pour 175^m de hauteur. Si la température du sol baisse de 10° en 10°, cette hauteur devient successivement 190, 209, 235, 270, 323, 411, 588, 1038 et 6144 mètres. L'influence des saisons dépend aussi de la latitude; nulle à l'équateur, cette influence va en augmentant à mesure qu'on s'avance vers le pôle nord. Mais on ne possède que peu d'observations à ce sujet.

Tout ce qui précède ne s'applique qu'à l'atmosphère qui recouvre les continents. Au-dessus de la mer, dont la température change peu pendant le jour et même pendant toute l'année, les résultats seraient sans doute différents.

1385. Interversions. — Pendant les hivers rigoureux, on observe souvent une *inversion* dans les variations de la température; au lieu d'aller en diminuant à mesure qu'on s'élève, elle augmente jusqu'à une hauteur d'une centaine de mètres, après laquelle elle diminue. M. Fournet a recueilli dans le sud-est de la France et en Suisse un grand nombre d'exemples de ce phénomène, qu'il attribue à la superposition du vent du sud sur le vent du nord.

Six, Pictet, Marcet, ont constaté en outre que, une heure environ avant et

après le coucher du soleil, et pendant la nuit, la température croît avec la hauteur. Ce fait souvent constaté par les aéronautes, a été étudié avec soin par Ch. Martins, à Montpellier, au moyen de six thermomètres à index, placés à des hauteurs au-dessus du sol, variant de 0^m,05 à 49^m,4. Sur 94 nuits d'observations, échelonnées dans 15 mois consécutifs, 88 ont donné un accroissement avec la hauteur. L'excès moyen du thermomètre supérieur sur l'inférieur était de 4°,36, l'air étant pur et calme. Les 9 autres nuits, pendant lesquelles le ciel était couvert, ont donné un très-faible décroissement. L'accroissement nocturne avec la hauteur est donc le cas général; il s'explique par le froid que communique aux couches inférieures de l'air, le sol qui se refroidit par rayonnement vers les espaces célestes. C'est surtout dans les vallées que ces effets sont sensibles, l'air refroidi tendant à couler dans les dépressions du sol, et c'est pourquoi les végétaux y souffrent davantage du froid que sur les collines. Ch. Martins conclut de là qu'il faut apporter le plus grand soin au choix de la position des observatoires météorologiques, une différence d'altitude de quelques dizaines de mètres suffisant pour modifier notablement la température. C'est ainsi que, à Montpellier, le minimum moyen annuel est de 2°91 plus bas au Jardin des plantes qu'à la Faculté des sciences, plus élevée de 30^m 1.

L'interversion a été souvent observée dans les régions boréales. Des expériences faites en 1840 à Bosekop, au moyen de cerfs-volants et de ballons captifs munis de thermomètres, ont donné une augmentation de 1°,6 pour les 100 premiers mètres, après lesquels la température décroissait, d'abord lentement, puis plus rapidement. Dans ces climats, cette loi peut se montrer même en plein jour. La différence a atteint quelquefois 6°. On a expliqué ces faits en partie par la présence fréquente du contre-courant supérieur venant de la mer. Le refroidissement du sol privé pendant plusieurs semaines des rayons solaires, dans ces latitudes élevées, doit aussi contribuer à ce résultat.

1386. Limite des neiges perpétuelles. — Les neiges qui recouvrent les cimes des hautes montagnes ont une limite inférieure qui varie avec les saisons. L'amplitude de ces variations, qui n'est que de 25 à 30^m sous l'équateur, va en augmentant à mesure qu'on s'en éloigne. Par exemple, dans les Andes, elle est de 600 à 750^m, à la latitude de 19 à 20°. On prend pour *limite des neiges perpétuelles*, le niveau auquel elles s'arrêtent pendant l'été. De loin, la limite paraît horizontale; et il en part de longues traînées blanches, formées par les glaciers que produisent les neiges glissant dans les vallées transversales.

La limite des neiges perpétuelles va généralement en s'abaissant quand on s'avance vers les pôles; mais cette loi présente de nombreuses anomalies. Ce n'est pas entre les tropiques que la limite est la plus élevée, et le phénomène est d'autant plus irrégulier qu'on s'avance davantage vers les pôles. La limite dépend d'une foule de circonstances : de la température moyenne et des extrêmes, elle suit principalement les inflexions des lignes *isothermes*; de la direction des vents

¹ Comptes rendus des séances de l'Acad. des sciences de Paris, t. LI, p. 1083.

régnants et des régions qu'ils ont traversées; de l'épaisseur de la neige déposée pendant l'hiver; de la forme des massifs et de la proximité d'autres pics neigeux; du voisinage de plateaux étendus.

En Amérique, la limite des neiges est, sous l'équateur, à 4800^m; elle s'abaisse quand on marche vers le tropique septentrional, tandis qu'elle s'élève en marchant vers le sud. Ainsi, Pentland l'a trouvée, au Chili, aux latitudes de 15° à 18°, à 800^m plus haut qu'à l'équateur sur le Chimborazo, le Cotopaxi et l'Antisana. La neige disparaît quelquefois sur le volcan d'Aconcagua (lat., 32°, 5), qui dépasse de 450^m la cime du Chimborazo. Sous l'équateur, on n'a observé les neiges perpétuelles qu'en Amérique; les îles qu'il coupe ne présentent pas de hautes montagnes, et en Afrique, où il y a de hautes montagnes, il ne paraît pas qu'il y ait de neiges perpétuelles, ou du moins la hauteur des plateaux et l'accumulation des sables doivent en rendre la limite prodigieusement élevée¹.

Dans l'Asie, sur le versant méridional de l'Himalaya, la limite des neiges est, d'après M. Webb, à 3956^m d'altitude, tandis qu'elle s'élève sur le versant septentrional, jusqu'à 5067^m; presque autant que sous l'équateur. Cette anomalie s'explique par l'influence du plateau tibétain, dont la hauteur moyenne au-dessus de la mer paraît être de 3500^m. — Voici le tableau des limites des neiges perpétuelles dans différents pays, en suivant l'ordre des latitudes :

	LATITUDE	LIMITE des neiges.	TEMPÉRATURE MOYENNE	
			annuelle.	estivale.
Ne Mageroe:	71°, 15'	720 ^m	0°, 2	6°, 4
Norwége.....	66 à 67	1266	»	»
Islande.....	65	936	4, 5	12
Laponie.....	60	1169	»	»
Oural.....	59, 40	1460	1, 2	16, 7
Kamtschatka.....	»	1600	2, 0	12, 6
Altai.....	»	2144	2, 8	17, 8
Alpes.....	»	2700	11, 2	18, 4
Caucase.....	»	3372	13, 8	21, 6
Pyrénées.....	42 à 43	2728	15, 7	24, 0
Etna.....	37, 36	2905	18, 8	25, 1
Himalaya (versant nord).....	30 à 31	5067	»	»
Id. (versant sud).....	»	3956	»	»
Mexique.....	19	4500	25	27, 8
Abyssinie.....	13, 40	4287	»	»
Andes de Quito.....	0 à 2	4812	»	»
Chili.....	33	4483	»	»
Détroit de Magellan.....	53 à 54	4130	»	»

¹ De Humboldt, *Ann. de ch. et de ph.*, 2^e série, t. XIV, et *Cosmos*, t. I, p. 393.

V. Température de l'espace. — Rayonnement nocturne.

1387. Température des espaces planétaires. — Fourier a admis le premier que l'espace dans lequel se meuvent les planètes possède une température propre, due aux rayons de chaleur émis par tous les corps célestes, en exceptant le soleil et les planètes de notre système. Cette température est nécessairement plus basse que la plus faible qu'on ait pu observer dans les régions polaires. Or, on a vu le thermomètre descendre à -57° ; ce nombre donne donc un premier aperçu de la température de l'espace. Saigey a cherché à l'évaluer par trois méthodes différentes¹ :

1^o En considérant la loi du décroissement de la température correspondant à une diminution constante de la pression (1383), il a trouvé -60° , pour une pression nulle, c'est-à-dire aux limites de l'atmosphère.

2^o Les variations diurnes en un même lieu sont d'autant plus faibles que la moyenne est plus basse (1367). En supposant que cette loi se vérifie au-delà des limites des observations, la moyenne pour laquelle les variations deviendraient nulles serait la température de l'espace; car la chaleur reçue en un lieu se compose de l'action variable du soleil, et de l'action constante des rayons venant de l'espace. S'il n'y a plus de variations diurnes, c'est que la première disparaissant, l'autre reste seule. Des observations faites à Genève, à Fribourg, sur le Saint-Bernard et dans le nord de l'Amérique, Saigey a déduit les résultats moyens qui suivent :

Moyenne du jour.....	20°	10°	0°	-10°	-20°	-30°
Variations extrêmes du jour à la nuit.	10°,5	9°	7°,8	6°,5	5°,2	3°,6

Chacune des variations peut s'obtenir en retranchant 1,3 de celle qui la précède. Si l'on continue cette loi, on trouve qu'on arrive à une variation nulle en considérant trois termes de plus, qui correspondent aux moyennes -46° , -50° et -60° , dont la dernière représenterait la température de l'espace.

3^o Les moyennes températures s'abaissant à mesure qu'on s'élève, et les extrêmes s'écartant à mesure que la moyenne est plus forte, les différences des températures observées à différentes hauteurs doivent être d'autant plus prononcées que la température au point le plus bas est plus élevée; c'est, en effet, ce qui a lieu. En cherchant à quelle température la différence devient nulle, on aura encore la température de l'espace, puisqu'elle doit être la même pour toutes les hauteurs. Or, les observations faites à Genève, à Fribourg et à l'hospice du Saint-Bernard, donnent les résultats suivants :

Température à Genève.....	30°	20°	10°	0°	-10°	-20°
Excès sur la température à Fribourg..	2,3	2	1,8	1,6	1,3	1
Id. au Saint-Bernard.	15	13	11	9	7	5

¹ *Petite physique du globe*, par A. Saigey (1832), t. I, p. 73.

La série des différences au Saint-Bernard forme une progression arithmétique dont la raison est 2; et le terme égal à 0° correspondrait à une température comprise entre — 40° et — 50°. La série des différences à Fribourg ne suit pas une loi aussi simple; mais on peut en obtenir les différents termes en retranchant de celui qui précède tantôt 0,2, tantôt 0,3. En adoptant 0,3, on trouve que la température qui correspond à une différence nulle est comprise entre — 50° et — 60°; et en adoptant 0,2, on trouve — 70°. On peut donc admettre — 60°.

1388. Méthode par le rayonnement vers l'espace. — Pouillet a trouvé de nouvelles valeurs de la température de l'espace, au moyen d'un appareil particulier, auquel il a donné le nom d'*actinomètre*¹. Supposons un thermomètre exposé pendant la nuit au rayonnement vers l'espace, il reçoit de la chaleur :

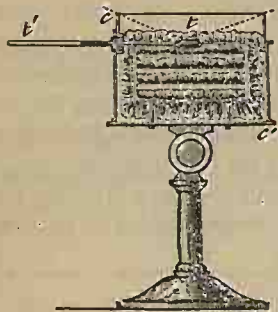


Fig. 970. — $\frac{1}{3}$.

1° de l'espace, en quantité constante; 2° du rayonnement variable des molécules de l'atmosphère. Or on peut concevoir une enceinte d'une température telle que son rayonnement remplace celui de l'espace et de l'atmosphère. Pouillet appelle la température inconnue de cette enceinte, *température zénithale*. Elle est variable comme la température de l'air, dont elle dépend. Voyons d'abord comment on observe la température zénithale au moyen de l'*actinomètre*.

Actinomètre de Pouillet. — Cet appareil (fig. 970) est composé de plusieurs peaux de cygne, garnies de leur duvet, et étendues sur des anneaux superposés horizontalement, de manière que le duvet ne soit pas comprimé. Un thermomètre *t* repose sur la partie supérieure.

Le tout est enveloppé d'un cylindre en plaqué d'argent, recouvert lui-même d'une peau de cygne, et renfermé dans un second cylindre *cc'*. Le rebord *c* de ce dernier dépasse le thermomètre, qui ne voit que les deux tiers de la voûte céleste. Des trous pratiqués au niveau du duvet permettent à l'air froid de s'écouler.

L'*actinomètre* étant exposé pendant la nuit au rayonnement vers un ciel pur, on observe d'heure en heure la différence entre sa température et celle, plus élevée, d'un thermomètre placé à un demi-mètre au-dessus du sol, et donnant la température de l'air ambiant.

Il faut déduire de ces différences, la température zénithale. Remarquons d'abord que, si l'*actinomètre* était placé dans le vide sous une enceinte hémisphérique, dont son thermomètre pût voir l'hémisphère entier, il en indiquerait la température (924); mais s'il n'en voit que les deux tiers, et s'il est entouré d'air qui l'échauffe, il donnera une température plus élevée que celle de l'enceinte. Pour

¹ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris*, t. VII, p. 53.

trouver le rapport entre la température de l'enceinte et l'abaissement de l'actinomètre au-dessous de celle de l'air, Pouillet a formé un ciel artificiel au moyen d'un vase de zinc d'un mètre de diamètre, au-dessous duquel il a placé l'actinomètre. Le vase de zinc était rempli d'un mélange réfrigérant qui lui donnait une température de -20° , et l'actinomètre était placé successivement à des distances telles que son thermomètre pût voir $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ d'hémisphère. Dans chaque position, on notait la différence, a , entre la température de l'actinomètre et celle de l'air. On a trouvé ainsi que : si, de la température quelconque t de l'air ambiant, on retranche les $\frac{2}{3}$ de la différence a , on trouve sensiblement la température z du ciel artificiel ; de sorte qu'on a $z = t - \frac{2}{3} a$.

Au moyen de cette loi, appliquée à la voûte céleste, Pouillet a calculé les températures zénithales à différentes époques de l'année et à différentes heures du jour, et il a reconnu que ces températures s'élèvent et s'abaissent à peu près comme celles de l'air ambiant, résultat d'accord avec ceux qu'avaient constatés plusieurs observateurs : Ainsi, Wells, Daniell ont vu, dans nos climats, la température du sol descendre à 7° ou 8° au-dessous de celle de l'air ; Wilson a trouvé la neige à 9° au-dessous de l'air, et Scoresby et Parry ont observé la même différence pendant que l'air se trouvait à -20° . La différence entre les températures de l'air et de l'actinomètre étant à peu près constante, on voit que la chaleur de l'espace ne produit qu'un effet insensible ; cette chaleur est donc extrêmement faible.

Il s'agit maintenant de trouver une relation entre la température zénithale z et la température de l'espace. D'abord, la quantité de chaleur émise dans l'unité de temps par l'unité de surface de l'enceinte zénithale, est donnée par la formule $v = ma^z$ (935). D'un autre côté, l'atmosphère émet une quantité de chaleur égale à mea^t , en appelant e son pouvoir émissif, et t la température moyenne de la colonne d'air verticale ; et l'espace émet une quantité de chaleur égale à ma^x , en représentant par x sa température. Une partie de cette dernière chaleur est absorbée par l'air, de sorte qu'il n'arrive au sol que la quantité $(1 - e') ma^x$, en appelant e' le pouvoir absorbant de l'atmosphère pour les rayons de l'espace. La quantité de chaleur envoyée par l'espace et par l'air étant égale, par définition, à celle qu'envoie l'enceinte zénithale, on aura

$$ma^z = mea^t + (1 - e') ma^x, \quad \text{ou} \quad a^z = ea^t + (1 - e') a^x.$$

En considérant cette équation comme une équation de condition à laquelle doivent satisfaire les valeurs de la température zénithale données par l'expérience, Pouillet a pu déterminer des limites entre lesquelles est comprise la température de l'espace.

L'évaluation de la température moyenne t de la colonne atmosphérique laissant beaucoup d'incertitudes, Pouillet a cherché à se passer de cette donnée, en s'appuyant sur la constance des phénomènes qui se manifestent annuellement dans les régions équatoriales. Il est arrivé, au moyen de diverses considérations

ingénieusement déduites, et pour lesquelles nous renverrons à son Mémoire, à l'équation

$$ax = 1,235 \frac{2 - e}{2 - e'} - 0,489,$$

dans laquelle les lettres représentent les mêmes quantités que dans les formules précédentes. L'ensemble des expériences faites sur les rayons solaires donnant $e' = 0,35$ (1250), cette équation revient à

$$ax = 1,008 - 0,748 e,$$

formule qui ne contient plus que l'inconnue x et le pouvoir émissif ou absorbant e de l'atmosphère pour les rayons terrestres. On voit que la plus petite valeur de a correspond à la plus grande de e . Or, e ne peut pas être plus grand que 1. En lui donnant cette valeur, on trouve $x = -175^\circ$. La température de l'espace ne serait donc pas inférieure à ce nombre. Les expériences de température zénithale montrent que e ne peut être moindre que 0,8; ce qui donne $x = -115^\circ$. Des observations multipliées, faites à des latitudes et à des hauteurs très-différentes, pourront seules faire connaître la valeur comprise entre ces deux limites. Pouillet a conclu de ses expériences, pour la valeur approximative de la température de l'espace, le nombre -142° , qui est bien plus bas que ceux qu'on avait obtenus jusque-là.

Des expériences de Ch. Martins et A. Bravais montrent bien l'influence de la couche atmosphérique sur la température zénithale : sur le Faulhorn, l'actinomètre était à $6^\circ,27$ au-dessous de la température de l'air; et à Brientz, à 2110^m plus bas, la différence n'était que de $4^\circ,62$. Sur le grand plateau du mont Blanc, et à Chamouni à 2800^m plus bas, les différences étaient $10^\circ,82$ et $5^\circ,62$. Le rayonnement est donc beaucoup plus fort sur la montagne que dans la plaine, et le rapport des rayonnements croît plus rapidement que la hauteur; car, pour les deux premières stations, dont les hauteurs au-dessus de la mer sont 570^m et 2680^m , le rapport est 1,36; tandis qu'il est 1,98 pour les deux autres stations, dont les altitudes sont 1050^m et 3930^m .

1389. Rôle de l'atmosphère dans la distribution de la chaleur sur le globe. — Quel que soit le nombre qu'on adopte pour exprimer la température de l'espace, il est certain que cette température est très-basse. Le sol que nous habitons se trouve donc dans une étrange situation : d'un côté règne la chaleur excessive du feu central (1257), et de l'autre le froid de l'espace. La croûte solide intercepte la chaleur qui vient de l'intérieur, tandis que l'air, surtout quand il est humide, empêche la chaleur du sol de se dissiper dans l'espace. On peut appeler l'atmosphère le *vêtement* de la terre; sans son action modératrice, nous passerions de la chaleur excessive produite par la totalité des rayons solaires, dont aucune portion ne serait interceptée, au froid intense qui résulterait, pendant la nuit, du rayonnement libre vers l'espace. Remarquons

aussi, avec Saigey, que l'atmosphère tend à rendre plus uniforme la distribution de la chaleur solaire : pendant le jour, l'air en absorbe une partie, qui sert à l'échauffer, ou devient latente en le dilatant; pendant la nuit, il intercepte une partie des rayons obscurs émis par le sol, et, en se refroidissant, se contracte et ramène à l'état sensible la chaleur latente qu'il avait absorbée. L'atmosphère se comporte donc comme un régulateur de la chaleur, qui la retient en partie quand elle arrive trop abondamment, et la restitue en l'absence du soleil.

1390. Effets du rayonnement nocturne. — Quand, pendant la nuit, l'atmosphère est pure et sèche, les corps rayonnent vers l'espace, qui ne leur envoie en échange que des rayons très-faibles, et la température de ces corps s'abaisse au-dessous de celle de l'air ambiant. Wilson a, le premier, étudié ces phénomènes. Il vit, vers la fin de 1783, un thermomètre couché sur la neige, dont le pouvoir émissif est grand, marquer $-21^{\circ},7$, pendant qu'un autre, suspendu à 4 pieds de hauteur, marquait $-13^{\circ},9$. Des nuages étant survenus, le thermomètre inférieur remonta à $-13^{\circ},9$. Le même observateur remarqua aussi que la différence entre les températures du sol et de l'air, à un ou deux mètres de hauteur, restait sensiblement la même, quelle que fût la température de cet air; résultat qui a été confirmé depuis par Pouillet et divers autres physiciens, et par Parry et Scoresby, dans les régions boréales. Après Wilson, Pietet et Six constatèrent que l'herbe présente, pendant une nuit calme et sereine, 7° à 8° de moins que l'air à 2^m de hauteur. Wells a surtout multiplié ces sortes d'expériences dans ses recherches sur la rosée.

Melloni, pour éviter le rayonnement du thermomètre supérieur, en a garni le réservoir d'une enveloppe mince d'argent poli, fermée par un bouchon que traversait la tige. L'instrument ainsi armé était placé dans un tronc de cône renversé en fer-blanc, soutenu par de minces tubes aussi en fer-blanc. Le thermomètre placé sur le sol était disposé de la même manière; seulement, l'enveloppe d'argent était noircie. Melloni a vérifié, au moyen de ces instruments, les faits constatés par Pietet et Six.

1391. Applications. — Depuis un temps immémorial, on se sert, au Bengale, pour fabriquer de la glace, du froid produit par le rayonnement nocturne. Des vases plats contenant de l'eau sont disposés dans une excavation remplie de paille de maïs. Un rebord en terre règne tout autour et retient l'air refroidi. Quand le ciel est serein, l'air calme, pas trop humide, et au-dessous de 10° , l'eau se congèle, même quand un thermomètre couché sur la paille marque 5° . D'après M. Williams, il y a de ces manufactures de glace qui occupent plusieurs centaines d'ouvriers. Wells est parvenu, en Angleterre, à faire de la glace, pendant l'été, par le même moyen. A Saint-Ouen, près Paris, on a réussi également; mais la rareté des nuits sereines et le bas prix de la glace conservée dans les glaciers ont fait renoncer à l'entreprise.

1392. Causes qui modifient les effets du rayonnement nocturne. — C'est surtout quand l'air est pur, calme et sec, que le froid produit par le rayonnement est intense. Les voyageurs qui traversent les plaines desséchées

des déserts souffrent autant du froid pendant la nuit que de la chaleur pendant le jour.

Parmi les causes qui atténuent les effets du rayonnement, nous citerons d'abord le vent, qui renouvelle sans cesse autour des corps l'air qui leur cède de la chaleur. C'est à un effet semblable qu'il faut attribuer le succès qu'on obtient quand, pour empêcher les vignes de geler, on les détache de leurs échelas, afin de les mettre en contact, dans leurs ballottements, avec une grande masse d'air. Les gelées du printemps sont plus à redouter au fond des vallées que sur les pentes des collines, l'air, refroidi au contact du sol, abandonnant les pentes et coulant dans les bas fonds, où il ajoute à l'effet du rayonnement le froid produit par son contact. C'est ainsi qu'en 1873, dans le bas Languedoc, les vignes gelèrent dans les fonds, et furent préservées, sur les collines. Les brouillards, les nuages, garantissent du froid, en substituant les rayons qu'ils émettent à ceux beaucoup plus faibles de l'espace. En 1762, la Seine fut prise après six jours d'un ciel pur, pendant lesquels la température moyenne fut de $-3^{\circ},9$, et le minimum de $-9^{\circ},7$; tandis qu'en 1748 la même rivière ne gela pas, quoique la température moyenne fût pendant huit jours de $-4^{\circ},5$; c'est que le ciel fut constamment nuageux.

D'après Garcilasso di Vega, les Péruviens, quand ils voyaient le temps très-clair, brûlaient du fumier pour dégager une épaisse fumée, et former un nuage artificiel qui préservait d'un froid trop vif les pousses des jeunes plantes. Cette pratique, conseillée par Olivier de Serres en 1604, commence à se répandre en France. On a proposé de brûler des huiles lourdes, des bitumes; mais les balles de blé sont bien préférables, n'ayant pas de valeur et donnant une épaisse fumée. On a aussi proposé, pour éviter une surveillance et des déplacements pénibles, d'installer auprès des tas de matière combustible préparés d'avance, des thermomètres métalliques qui, dès qu'ils seraient arrivés à 0° , feraient partir une détente qui mettrait le feu aux tas. — Les arbres, les édifices, les rochers, en un mot tous les obstacles qui cachent une partie du ciel, empêchent ou atténuent les effets du rayonnement nocturne. En 1794, les vignes de la Bourgogne furent gelées, excepté celles qui étaient plantées d'arbres. Pendant les nuits sereines, il fait moins froid sous les arbres, au pied des murs, qu'en rase campagne. Les troupeaux qui passent la nuit dehors recherchent instinctivement le voisinage des arbres ou des rochers. On a imaginé de semer dans les vignes diverses plantes, colza, navette, qui s'élèvent à 1^m de hauteur, et préservent ainsi les bourgeons du rayonnement.

1393. Lune rousse. — Les campagnards désignent sous le nom de *lune rousse* celle qui devient pleine à la fin d'avril ou dans le courant de mai. Ils attribuent à ses rayons la propriété de faire roussir, c'est-à-dire geler, les bourgeons des plantes, alors jeunes et gorgés de sève. Arago a prouvé que cet effet est dû au froid que produit le rayonnement vers l'espace, la présence de la lune ne faisant qu'attester que le ciel est pur. Pour préserver les plantes, les ardiniers disposent à peu près horizontalement des nattes ou autres abris, dont

l'efficacité vient, non de ce qu'ils interceptent les rayons de la lune, mais de ce qu'ils cachent une partie du ciel.

1394. Éthrioscope. — Le rayonnement nocturne ayant une grande influence sur les plantes, on a cherché à en mesurer l'intensité. On emploie pour cela l'*éthrioscope*, demi-sphère en métal poli, au centre de laquelle est placée la boule d'un thermomètre pouvant voir tous les points du ciel. — Leslie employait, dans un autre but, un miroir parabolique au foyer duquel se trouvait l'une des boules d'un thermomètre différentiel, et dont l'ouverture était tournée vers le ciel. Un semblable appareil, muni d'un thermomètre à minimum et installé sur une haute montagne, où la présence de l'air n'a que peu d'influence sur la température zénithale, pourrait conduire à une nouvelle évaluation de la température de l'espace.

VI. Température de la terre et des eaux à différentes profondeurs.

1395. Moyens d'observation. — Pour mesurer la température du sol à une petite profondeur, on enfonce dans la terre des thermomètres à tige assez longue pour que le niveau du mercure dépasse la surface du sol, et l'on tient compte de la différence entre les températures des divers points de la tige et celle du réservoir. M. Boussingault pratiquait un trou de sonde, au fond duquel il descendait le thermomètre, et dont il fermait l'ouverture, pour éviter la circulation de l'air; il opérât sous un hangar ou dans une cabane de sauvage.

M. Becquerel a mesuré la température du lac de Genève à différentes profondeurs, au moyen d'un appareil qui peut servir aussi à observer celle du sol. Cet appareil se compose d'un fil de cuivre et d'un fil de fer (*fig. 971*) soudés l'un à l'autre par un de leurs bouts, et communiquant par l'autre avec les extrémités du fil de cuivre d'un *rhéomètre multiplicateur*. La soudure *s* est plongée dans le milieu dont on veut obtenir la température; un lest sert à l'y maintenir. Les fils sont recouverts de coton goudronné qui les sépare de la terre humide ou de l'eau, et peuvent s'enrouler sur un petit treuil *t*. Les déviations de l'aiguille du rhéomètre font connaître la différence entre la température de la soudure plongée *s*, et celle de l'air. Pour obtenir des résultats faciles à apprécier, le fil de fer ne doit pas avoir plus de 200^m de longueur, quand son diamètre est de 1^{mm}. Un semblable appareil, installé d'une manière fixe, apporte à chaque instant au dehors l'indication de la température de la couche profonde dans laquelle est enfoncée l'une des soudures.

1396. TEMPÉRATURE DU SOL A DIFFÉRENTES PROFONDEURS. — Les rayons solaires produisent dans les couches supérieures du sol des variations diurnes et annuelles de température, qui dépendent de sa conductibilité, de l'état de sa surface, de sa perméabilité qui permet aux eaux pluviales de transporter à une profondeur plus ou moins grande la chaleur de sa surface. Plus est grande l'amplitude des changements à la surface, plus les variations se font sentir

profondément. Remarquons, du reste, que la température de la surface est généralement très-différente de celle de l'air; pendant le jour, elle est échauffée par les rayons solaires qui ont traversé l'atmosphère, et, pendant la nuit, elle est refroidie par le rayonnement vers l'espace. Les différences sont surtout sensibles sur les montagnes, où la présence de l'air ne les atténue pas autant. Ils dépendent aussi de l'obliquité des rayons solaires. En été, la température superficielle peut atteindre, dans nos climats, 50 à 60°.

Fourier a étudié par le calcul la marche de la chaleur solaire à travers les couches superficielles du globe, dans plusieurs Mémoires dont le premier date de 1807. Il a établi que la chaleur qui se distribue dans la terre est assujettie à trois mouvements : 1° le passage presque insensible de la chaleur centrale à travers la croûte solide; 2° un mouvement extrêmement lent, devenu sensiblement uniforme, qui entraîne la chaleur accumulée par le soleil dans les régions équatoriales, vers les régions polaires où cette chaleur se dissipe dans l'espace; 3° un mouvement périodique qui se fait sentir jusqu'à une certaine profondeur. La quantité de chaleur solaire qui détermine ce mouvement oscille dans les couches extérieures de la terre, s'enfonçant pendant une partie de l'année et remontant pendant la saison opposée, pour rayonner vers l'espace. Voici les lois de ce mouvement périodique :

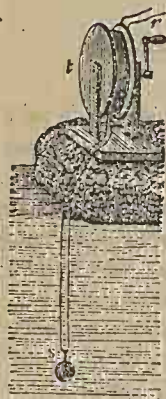


Fig. 971.

I. Il y a une profondeur à laquelle les variations diurnes disparaissent; il en est de même pour les variations mensuelles et annuelles. La profondeur où la disparition a lieu est proportionnelle, en un même lieu, à la racine carrée de la période considérée. Ainsi, les variations diurnes cessent à une profondeur 19 fois plus petite environ que les variations annuelles, 361, carré de 19, différant peu du nombre de jours de l'année. En France, la limite des variations diurnes est à 1^m environ de profondeur, et en Allemagne à 6 ou 8 décimètres.

La couche dans laquelle les variations annuelles cessent d'être sensibles se nomme *couche invariable*; elle se trouve à une profondeur d'autant plus petite, que les extrêmes diffèrent moins, c'est-à-dire qu'on s'approche davantage de l'équateur, où elle n'est qu'à quelques mètres, tandis qu'en France elle est entre 20 et 30^m, et en Allemagne entre 6 et 10^m.

II. Les différences entre le maximum et le minimum diminuent dans les couches en formant une progression géométrique, quand les profondeurs croissent en progression arithmétique. Ces différences, d , peuvent donc être représentées par la formule $d = cn^h$, dans laquelle h représente la profondeur, et c et n des constantes que l'on détermine au moyen de deux observations.

Quételet a commencé, en 1834, une série d'observations pour vérifier cette loi; il a enfoncé des thermomètres à longue tige jusqu'à 8^m de profondeur. Les

résultats observés n'ont différé de ceux que donne la formule, que de quelques dixièmes de degré, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. Cependant, la formule ne se vérifie pas pour $h = 0$; elle ne donne donc pas la température à la surface.

III. La moyenne annuelle, observée à une même profondeur quelle qu'elle soit, coïncide sensiblement avec celle qu'on observe dans l'air; d'où il résulte que cette dernière peut être évaluée au moyen de l'observation d'appareils enterrés à l'abri de l'influence du rayonnement. Mais il faut remarquer que le maximum et le minimum ne se manifestent pas au même moment dans les différentes couches, à cause du temps que met la chaleur à pénétrer dans la terre. Quételet a trouvé, à Bruxelles, que la vitesse moyenne de transmission à partir de la surface du sol, avait fait parvenir la chaleur jusqu'à 7^m,80 pendant 144 jours, ce qui donne 0^m,3 en 6 jours. Les variations diurnes mettent à peu près 3 heures à parvenir à une profondeur de 0^m,1. Voici quelques conséquences de cette lenteur de transmission :

1^o Pendant les mois de *décembre*, *janvier* et *février*, la température va en croissant à peu près uniformément avec la profondeur jusqu'à la couche invariable. 2^o En *mars* et *avril*, la température décroît très-vite jusqu'à 0^m,45 environ, puis moins vite, pour augmenter ensuite. 3^o Pendant les trois mois qui suivent, la température suit les mêmes lois; seulement, la température décroît moins rapidement et jusqu'à une plus grande profondeur. 4^o Au mois d'*août*, la température diminue à peu près uniformément jusqu'à la couche invariable. 5^o En *septembre*, elle est sensiblement uniforme jusqu'à une petite distance de la couche invariable, près de laquelle elle décroît un peu. 6^o En *octobre* et *novembre*, la température augmente jusqu'à une profondeur de 6^m environ, puis devient sensiblement constante jusqu'à la couche invariable. 7^o Dans la couche où la température ne varie que de 4^m par an, le maximum se manifeste pendant que le minimum a lieu dans l'air, et réciproquement; les saisons sont donc renversées. Cela a lieu à une profondeur de 8^m environ dans nos climats, et à 8^m,50 à Bosekop, d'après les observations de Bravais.

1397. De la couche invariable. — D'après ce que nous venons de voir, il y a, à une certaine profondeur, une couche, où les variations annuelles de la température cessent d'être sensibles. C'est à partir de cette couche de *température invariable* que la chaleur centrale commence à se faire sentir. De tout temps, on avait remarqué que les cavernes, les caves profondes paraissent froides en été et chaudes en hiver, effet dû à la constance de leur température, qui contraste avec celle de l'air, mais qu'on ne pouvait expliquer avant l'invention du thermomètre. D. Cassini, en 1671, a fait les premières observations précises à ce sujet : il constata que la température des caves de l'Observatoire de Paris, dont la profondeur est de 27^m,60, ne change pas pendant toute l'année, ce que Lahire vérifia en 1730. En juillet 1783, Cassini de Thury et Lavoisier y établirent à demeure un thermomètre à mercure très-sensible, destiné à constater indéfiniment le phénomène. Chaque degré est divisé en 200 parties égales, qui ont

une longueur de $\frac{1}{2}$ millimètre, et le réservoir est plongé dans du sable fin remplissant un vase de verre. Ce thermomètre marque $11^{\circ},82$. La moyenne de l'air, à Paris, est de $10^{\circ},67$; celle des caves est donc un peu plus élevée.

1398. Application à l'évaluation de la moyenne d'un lieu. — Puisque les moyennes annuelles observées à différentes profondeurs sont égales entre elles, la température de la couche invariable doit être égale à la moyenne température de l'air. C'est, en effet, ce qui a lieu à peu près. De là, une méthode prompte pour trouver la moyenne des lieux où l'on ne peut séjourner. Mais il faut éviter de descendre au delà de la *première couche invariable*; autrement, on pourrait éprouver l'influence de la chaleur centrale. Par ce moyen, M. Boussingault, en suivant la méthode décrite plus haut (1395), a pu obtenir la température moyenne de 128 localités situées entre 41° de latitude nord et 5° de latitude sud. M. Erman a trouvé, à Iakoutzk, en Sibérie, à une profondeur de 16 à 17^m, une température de $-7^{\circ},5$, d'accord avec la moyenne donnée par des observations faites dans l'air pendant plusieurs années. A de plus grandes profondeurs, la température était plus élevée; à 130^m, elle était à $0^{\circ},5$. Au-dessus de cette limite, la terre reste donc constamment gelée¹. Nous ajouterons enfin que, le plus souvent, la température de la terre est un peu plus élevée que la moyenne de l'air. M. Wahlenberg attribue à cette circonstance la floraison de certaines plantes à racines profondes, dans des régions où la *moyenne* est très-basse.

Température des sources. — Roebuck a eu l'idée de prendre pour température moyenne d'un lieu la température des sources qui ne varient pas pendant l'année. Mais on a à craindre l'influence de leur passage par des canaux très-profonds, et leur participation à la température de la pluie qui les alimente. Tantôt la température des sources dépasse la *moyenne* de l'air, surtout sous les latitudes élevées, où la différence peut aller à 3 ou 4^o, d'après M. Wahlenberg; tantôt c'est le contraire, comme de Buch et de Humboldt l'ont constaté sous l'équateur. Ces résultats ont été confirmés par M. Kupffer, en partant des observations faites sur un grand nombre de sources par de Buch et par lui-même; et de Buch les a expliqués, en remarquant que la température des sources est plus élevée que la moyenne de l'air dans les contrées où il pleut plus abondamment pendant l'été que pendant l'hiver, comme en Suède et en Allemagne, tandis que le contraire a lieu dans celles qui reçoivent plus de pluie pendant l'hiver que pendant l'été, comme en Italie et en Norwége. On voit donc qu'il ne faut adopter la température des sources pour moyenne d'un lieu qu'avec une grande circonspection. Les observations faites dans les puits, où l'eau séjourne assez longtemps pour partager la température du sol, semblent devoir donner des résultats plus sûrs.

1399. TEMPÉRATURE DE LA MER. — Pour prendre la température de la mer à diverses profondeurs, on se sert des thermomètres à maximum ou à minimum

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LIII, p. 225; et LXIX, p. 32.

de M. Walferdin (1360), ou bien encore du *thermomètre plongeur* de M. Buntén, composé d'un thermomètre ordinaire renfermé dans un gros tube de verre, portant une soupape inférieure, par le moyen de laquelle l'eau s'introduit et reste autour du thermomètre quand on le retire de la mer. Péron employait un simple thermomètre enveloppé dans des substances mauvaises conductrices. Pour les grandes profondeurs, il faut tenir compte de la pression, qui rendrait les indications fautives. Tantôt on préserve l'appareil dans un tube hermétiquement fermé, tantôt on fait une correction. On peut encore, comme l'a proposé Despretz, laisser le thermomètre ouvert.

Température à la surface de la mer. — Nous avons déjà dit (1378) que la surface de la mer s'échauffe beaucoup moins que celle du sol, soit parce que les rayons solaires pénètrent à une grande profondeur, soit à cause de l'agitation qui mêle les couches superficielles à celles qui sont au-dessous, soit enfin à cause de la grande capacité calorifique de l'eau. Le refroidissement est aussi très-lent par les mêmes raisons, et, de plus, parce que les parties refroidies descendent et sont remplacées par des couches plus chaudes. La température de la mer n'éprouve donc que de très-faibles variations diurnes.

L'air qui recouvre la mer, tendant à en partager la température, n'éprouve que des variations périodiques peu étendues; ce qui nous a servi à expliquer la constance des climats marins (1378). En pleine mer, les variations diurnes ne dépassent pas 1 à 2° dans la zone torride, et 2 à 3° dans les zones tempérées. Le *minimum* a lieu vers le lever du soleil, comme sur les continents, mais le *maximum* paraît se montrer vers midi, au lieu de 2 heures.

On conçoit que l'air ne peut prendre exactement la température de la surface de la mer. Entre les tropiques, d'après Duperrey, la moyenne de l'air est ordinairement un peu supérieure à celle de la surface de l'eau, dont le maximum est cependant un peu plus élevé que celui de l'air. A partir de la latitude de 25°, l'eau est le plus souvent plus chaude que l'air, et ce résultat, d'autant plus constant qu'on s'approche davantage du pôle, ne souffre presque plus d'exception dans les mers glaciales, où l'air est bien plus froid que l'eau.

La température de la surface de la mer s'abaisse, en général, quand on s'éloigne de l'équateur. Entre les tropiques, elle ne dépasse pas 30°, d'après de Humboldt, et ne descend guère au-dessous de 20 à 25°; et elle est sensiblement constante jusqu'au 27° degré de latitude. Dans les mers polaires, cette température est rarement supérieure à 0°, même pendant l'été. Vers le 50° degré, la mer gèle un peu sur les côtes, mais ce n'est que vers le 80° que l'on trouve des glaces fixes.

1400. Température de la mer à différentes profondeurs. — On a dit quelquefois que la température du fond des mers devait être à + 4°, à cause du maximum de densité. Mais ce maximum, pour l'eau de mer, est à — 3°, 7, et au-dessous du point de congélation (1020); en outre, les courants ne permettraient pas à l'équilibre de s'établir. Du reste, les observations sont tout à fait contraires à cette supposition.

Entre les tropiques, la température de la mer va en diminuant, d'abord rapidement, puis très-lentement, jusqu'à la profondeur de 1000 brasses de 4^m,62. A cette profondeur, Sabine a trouvé 7°, lorsque la température, à la surface, était de 28°,3. La plus basse température observée est de 2°,2. Si l'on dépasse le 25° degré de latitude, on trouve que le décroissement est moins prononcé, et on l'a vu se transformer en une augmentation de température, du 65° au 70° degré. D'où l'on a cru pouvoir conclure qu'il existe une zone où la température serait sensiblement constante jusqu'à de très-grandes profondeurs.

L'augmentation de température avec la profondeur a été constatée, après l'hiver, dans la baie de Baffin, par les capitaines Ross et Franklin. Scoresby l'a observée, de son côté, dans les parages du Spitzberg. Par exemple, la température étant de — 1° à — 2° à la surface, il a trouvé 2° à 3° à la profondeur de 1134^m. Il semble que la température de 2°,2, signalée ci-dessus dans les mers équatoriales à une plus grande profondeur, appartienne à une couche où s'éteindraient toutes les variations périodiques, et qui s'élèverait en s'approchant des pôles. Mais il faut observer que l'accroissement de température avec la profondeur dans les hautes latitudes n'a pas toujours lieu. D'après C. Martins¹, il ne se montre que pendant l'hiver, lorsque l'air est au-dessous de 0°, et que la mer est refroidie à la surface par les glaces flottantes. En effet, en observant pendant l'été, il a reconnu un abaissement de température à mesure qu'on descend dans la mer, résultat confirmé par Bravais, Parry et Scoresby.

M. B. Carpenter a étudié spécialement ce phénomène, dont il a représenté la loi au moyen de courbes dont les ordonnées négatives représentent les profondeurs, et les abscisses, les températures. Dans l'océan Atlantique et la mer de Chine, mers ouvertes, la température baisse d'abord lentement, jusqu'à 2000^m et 1000^m, pour rester ensuite à peu près constante à 2° ou 2°,7. Dans la Méditerranée, la température, qui diminue à peine jusqu'à 150^m, baisse ensuite rapidement, de 28° à 16°, puis reste constante à 12°,7 à partir de 300^m.

1101. Influence des courants. — La température des mers ne dépend pas seulement de l'action solaire, mais de diverses autres causes, principalement des courants, des hauts-fonds et du voisinage de certaines côtes.

Les courants marins ont été étudiés principalement par Ch. Romme, Duperrey, Rennel, et Maury, qui en a adressé la carte et a tracé des itinéraires qui ont diminué la durée de certains trajets presque de moitié. Nous citerons le courant équatorial qui semble partir du cap de Bonne-Espérance, d'où il va en s'élargissant jusqu'au cap Saint-Roch. De Humboldt lui a trouvé une température de 22°,5, tandis qu'à côté il n'a trouvé que 17°,5. Il est limité d'une manière assez tranchée pour que Sabine en le quittant ait pu en 2 heures de marche, voir la température de la mer baisser de 6°,4. Au cap Saint-Roch, ce courant se partage en deux branches : l'une connue sous le nom de *gulf-stream*, ou *courant du golfe*, se dirige vers le nord avec une vitesse de 7 kilomètres environ

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXIV, p. 220.

par heure, s'enfonce dans le golfe du Mexique, traverse le canal de Bahama, où sa température est de 27°, longe le banc de Terre-Neuve, et vient frapper les côtes occidentales de l'Angleterre et de la Norwége, où il apporte des débris végétaux empruntés aux rives américaines. A la latitude de 49°, il fournit une branche, qui descend le long des côtes occidentales de l'Europe et de l'Afrique, pour revenir dans le grand courant des tropiques, parcourant ainsi un immense circuit, en trois ans et demi environ.

La branche, qui, du cap Saint-Roch, se dirige vers le sud, forme un courant d'eau chaude bien moins abondant que le courant du nord. Le point de séparation est à 5 ou 6° au sud de l'équateur. Babinet voit dans cette circonstance, qui se reproduit dans le grand Océan, l'explication de ce fait que l'hémisphère austral est plus froid que l'hémisphère boréal (1375).

De Humboldt a décrit en 1802 un courant d'eau froide qui, parti des mers australes, longe les côtes du Chili et du Pérou dont il refroidit le climat. Le thermomètre n'y marque que 15°,6 en certaines saisons, tandis qu'il monte à 27 ou 28° dans les eaux voisines en repos. Ce courant se continue avec l'immense courant de l'océan Pacifique. Il se replie brusquement vers l'ouest, le long de l'isthme de Panama. Refoulé par les îles de l'Océanie et les côtes occidentales de l'Inde, il se dirige en partie vers le nord, en longeant la Chine et le Japon. Une autre branche passe entre la Nouvelle-Guinée et l'Australie, puis entre Bornéo et Sumatra, revient vers l'est, et redescend le long de la côte occidentale de l'Amérique. — Les eaux de la partie nord de la mer des Indes, ne changeant pas de place parce qu'elles n'ont pas d'issue, s'échauffent considérablement; ce qui explique les étés excessifs qui rendent le climat des Indes si meurtrier pour les Européens.

On admet l'existence de contre-courants régnant au fond des mers profondes, et ramenant vers l'équateur les eaux refroidies des régions polaires. En effet, M. Carpenter, ayant fait des coupes perpendiculaires à la direction du *gulf-stream*, a trouvé que les courbes isothermes, loin d'être parallèles à la surface, suivent la forme du fond de la mer. Ces courants ont pour effet de mêler les eaux des différentes mers, et de concourir ainsi à régulariser la distribution de la chaleur sur le globe. On ignore jusqu'à quelle profondeur se font sentir les courants superficiels; toutefois, elle peut être considérable, car il existe, sur la côte méridionale de l'Afrique, un courant qui se réfléchit sur le banc de Lagullas, à une profondeur de 110 à 130 mètres.

Pour expliquer cette immense circulation des eaux de la mer, on a d'abord invoqué l'action des *vents alizés*, qui soufflent le long de l'équateur de l'est à l'ouest; mais Pouillet, Maury, M. Carpenter y voient un effet de la chaleur solaire, qui, élevant par dilatation les eaux voisines de l'équateur, les force à se déverser dans les mers environnantes. C'est dans les immenses espaces enveloppés par les courants, et où les eaux sont en repos, que l'on trouve les *mers de Sargasse*, dépôts étendus de végétaux flottants qui se développent sans toucher le fond, comme les lentilles d'eau de nos ruisseaux.

1402. Influence des hauts-fonds et des côtes. — J. Williams et Franklin ont reconnu que l'eau est plus froide au-dessus des hauts-fonds qu'en pleine mer. Il. Davy explique ainsi ce phénomène : pendant la nuit, les molécules d'eau refroidies par rayonnement descendent au fond, et, dans les endroits peu profonds, elles s'accumulent assez près de la surface pour exercer une influence sensible sur sa température. De Humboldt et Saigey pensent que les couches inférieures et plus froides, en obéissant au mouvement général des mers, remontent les pentes, comme l'a constaté M. Carpenter, et arrivent sur les hauts-fonds, dont elles abaissent ainsi la température. Elles sont superposées sans être parallèles, et se déplacent progressivement, en s'amincissant quand elles arrivent sur un relief, où la température décroît alors plus rapidement quand on descend, que dans les endroits profonds où les couches ont plus d'épaisseur. Cela ne peut s'appliquer aux mers polaires, dans lesquelles la température peut augmenter avec la profondeur, ce qui porte à adopter de préférence l'explication de Davy. Quoi qu'il en soit, le phénomène dont il s'agit permet de substituer le thermomètre à la sonde, pour reconnaître la présence des hauts-fonds dans les endroits où il n'y a pas de courants prononcés.

La température de la mer est aussi modifiée par le voisinage des terres. L'eau semble un peu chaude le long des côtes de Norwège. La Méditerranée, entourée de terres, est plus chaude que l'Océan. Dans les mers polaires, la proximité des côtes est une cause de refroidissement. MM. Ch. Martins et Pottier, lors du voyage de *la Recherche*¹, ont constaté l'influence refroidissante des côtes du Spitzberg, pendant que la corvette courait des bordées, dans lesquelles elle s'en rapprochait de 26 kilomètres au plus, et s'en éloignait jusqu'à 80 kilomètres. La température était de 1°,70, à une distance de moins de 40 kilomètres; de 2°,66, entre 40 et 60 kilomètres, et de 3°,75 entre 60 et 80. M. Ch. Martins attribue ce résultat : 1° à l'air, qui, refroidi au contact des montagnes neigeuses de l'île, glisse sur les pentes jusqu'à la mer; 2° surtout à l'eau à 0° provenant de la fusion des glaciers qui remplissent les vallées du Spitzberg. Cette eau de fusion est en assez grande quantité pour diminuer la densité de la surface des mers arctiques quand il y a des glaces flottantes, comme M. Marcet l'a reconnu en comparant les résultats obtenus par Ross et Franklin sur de l'eau de mer puisée à différentes profondeurs. Par exemple, la densité étant de 1,027 à la profondeur de 427^m, elle s'est trouvée égale à 1,026 à 144^m, tandis qu'elle n'était que de 1,025 à 1,024 à la surface. Le refroidissement de la mer autour du Spitzberg explique l'existence de la banquise de glace qui l'entoure pendant l'hiver, et qui s'étend progressivement à partir des côtes.

1403. Glaces polaires. — Les glaces polaires ont été étudiées, principalement dans les mers arctiques, par Ross, Parry, Franklin, et surtout Scoresby. On a cru pendant longtemps qu'elles se formaient toujours le long des côtes. Il est vrai qu'il en est souvent ainsi, et l'on voit des masses de glace, dans les baies

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIV, p. 220.

profondes du Spitzberg et entre les îles, des masses de glace se détachent et sont poussées en pleine mer avec les courants formés par la fonte des neiges et des glaciers. Mais on ne pourrait expliquer ainsi l'immense quantité de glace qui recouvre les mers arctiques. Scoresby a vu la glace se former en pleine mer, jusqu'à 20 lieues des côtes¹. D'abord, la surface se recouvre d'une foule de petits cristaux, qui lui donnent l'aspect de l'eau mêlée de neige. La houle s'apaise aussitôt comme par enchantement; il reste cependant une faible agitation. Les cristaux sont brisés, grossissent et finissent par se souder les uns aux autres. Quand la mer est calme, la congélation est plus rapide, et la glace peut prendre 6 à 8^m d'épaisseur en 24 heures². Elle s'accroît ensuite par-dessous, et forme un *champ de glace*, qui peut avoir plusieurs centaines de lieues carrées. Tantôt la surface est unie, tantôt irrégulière et surmontée de distance en distance de monticules, nommés *hummock*, de 8 à 10^m de hauteur, souvent d'un éclat éblouissant relevé par une teinte verte ou bleue très-délicate, qui se montre dans l'intérieur de petites excavations où se joue la lumière.

Scoresby pense que les champs de glace des mers arctiques se forment entre le Spitzberg et le pôle; ils peuvent avoir jusqu'à 8^m d'épaisseur, la partie submergée étant égale à quatre fois environ celle qui s'élève au-dessus de la surface de l'eau. — Les vagues les brisent souvent, quelle que soit leur épaisseur, en fragments de 100 à 200 mètres carrés. Ces fragments, quand ils sont très-rapprochés, forment un *pack* ou *banquise*. Quand ils s'écartent assez pour donner passage à un navire, on dit que la mer est *ouverte*.

Les champs de glace ou les packs sont poussés vers la mer libre par les vents du nord et de l'ouest; ils forment les glaces flottantes, qui parcourent quelquefois 50 lieues en un mois, et sur lesquelles les ours blancs accomplissent des pérégrinations. Souvent des packs, entraînés par des courants contraires, se heurtent et se brisent avec un bruit épouvantable; des masses de glace sont lancées dans la mer, d'autres montent les unes sur les autres en formant des monticules de 10 ou 15^m de hauteur.

Les *montagnes de glace* proviennent de masses gigantesques qui ferment le fond de nombreuses baies plus ou moins profondes, notamment sur les côtes du Groënland. Ces masses se continuent, sous forme de glaciers immenses, dans les vallées qui aboutissent à la mer, qu'elles comblent en effaçant les plus grandes inégalités du sol. Ordinairement à pic du côté de la mer, elles présentent une couleur verte qui contraste avec la blancheur de la neige qui les recouvre. Des blocs énormes s'en détachent de temps à autre, soit par l'effet de leur poids, après qu'ils ont été sapés par l'action des courants du sud, soit par l'expansion de l'eau qui se congèle dans leurs fissures.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. V, p. 59.

² D'après des expériences faites pendant l'hiver, dans la Baltique, à la demande de M. Edlund, l'eau de la mer peut descendre au-dessous de son point de congélation; ce qui explique cette rapide congélation quand la surface est calme.

Les plus hautes montagnes de glace se rencontrent dans la baie de Baffin. Scoresby en a observé, dans le détroit de Davis, qui avaient 10 à 12 kilom. carrés, et dont la surface plane supérieure s'élevait de 25 à 30^m au-dessus de l'eau, la partie plongée s'enfonçant à 170 et 180^m. Des tours colossales surmontaient ces masses imposantes, dont le poids devait atteindre plus de 2 millions de tonnes. Scoresby pense qu'elles se forment et s'accroissent dans certaines baies garanties des vents et des courants, où elles séjournent pendant une longue suite d'hivers.

Les montagnes de glace deviennent très-fragiles quand la température de l'air s'élève au-dessus de 0°; on en a vu se fendre dans toute leur hauteur pour avoir été frappées d'un coup de hache. Malheur au navire qui se trouve dans le voisinage : il est écrasé par les débris, ou submergé dans l'agitation violente des eaux qui suit la catastrophe.

1404. TEMPÉRATURE DES LACS ET DES RIVIÈRES. — L'échauffement de la surface des lacs d'eau douce se fait comme celui de la mer; seulement, les eaux étant moins agitées et n'étant pas continuellement mélangées par des courants, les variations annuelles sont plus prononcées que sur la mer. Ainsi, la surface peut se congeler pendant l'hiver, et atteindre 25° pendant l'été.

Dans les lacs profonds, comme de Saussure l'a constaté dans ceux de la Suisse (1019), l'eau, à une certaine profondeur, se tient à 4° environ en toute saison, à cause du maximum de densité de l'eau douce à 4°. A partir de là, la température s'élève ou s'abaisse à mesure qu'on se rapproche de la surface. Il résulte de ce fait que la surface d'un lac ne peut se congeler qu'après que toute sa masse a passé par la température de 4°, si ce n'est par un froid soudain et rigoureux, l'équilibre des couches ne s'établissant qu'avec lenteur.

Dans les rivières, le mouvement de l'eau et les remous résultant des inégalités du fond et des rives tendent à rendre la température uniforme. Aussi, cette température ne changerait-elle que peu pendant toute l'année, si l'abaissement du niveau pendant l'été ne venait, le plus souvent, mettre à découvert une partie du fond, en ne laissant qu'une faible couche d'eau dans les autres parties. Pendant l'hiver, la congélation ne peut avoir lieu avant que toute la masse ne soit descendue à 0°, excepté peut-être dans des cavités profondes, où l'eau est stagnante et peut rester à 4°.

1405. Glaçons charriés. — Les glaçons que charrient les rivières pendant l'hiver peuvent provenir de glace formée à la surface et sur les bords, puis brisée accidentellement ou par l'effet d'un abaissement de niveau. Mais on ne peut expliquer ainsi la quantité immense de glaçons que charrient certains fleuves, et il paraît bien prouvé que la plupart naissent au fond de l'eau. Plot, le premier, a émis cette opinion en s'appuyant sur le témoignage des bateliers de la province d'Oxford. Haies rapporte qu'on avait retiré de la Tamise, au moyen de crochets, de gros glaçons qui reposaient sur le fond. En 1743, Nollet constata que les glaçons sont composés de deux couches : l'une compacte, placée en dessus; l'autre spongieuse, irrégulière, remplie de graviers et de divers

débris empruntés au fond de la rivière. Desmarest, Brauns, ont pris la nature sur le fait¹ : le premier vit, dans un canal dépendant de la papeterie de Mongolfier, à Annonay, les glaçons se former sur le fond, et, après s'y être trainés quelque temps, venir flotter à la surface. Il rapporte aussi qu'un ponton submergé au fond du Leck, et qu'on n'avait pu en retirer, vint flotter l'hiver suivant, soulevé par un énorme glaçon. Brauns a vu des glaçons s'élever du fond de l'Elbe, et il a constaté l'existence de bancs de glace sur le fond de ce fleuve.

Il résulte de ces observations, souvent répétées depuis, que les glaçons naissent et s'accroissent au fond des rivières. Voici comment on explique ce phénomène. Quand il fait grand froid, l'eau descend au-dessous de 0°, et, par suite des mouvements qui en mêlant toutes les parties, le fond prend la même température. Cependant la congélation n'a pas lieu, à cause de l'agitation (1101). Mais l'eau emprisonnée dans des cavités du fond, ou entre des graviers et des débris de diverses sortes, y trouve un repos qui lui permet de se congeler. Les parcelles de glace les premières formées servent de noyaux, autour desquels la congélation continue, et les glaçons s'accroissent en soulevant l'eau de la rivière, au point, quelquefois, de la faire déborder et même de former des îlots fixes de glace qui dépassent le niveau. Les glaçons, d'abord retenus au fond, soit par des corps fixes, soit par le poids des graviers qu'ils retiennent, montent à la surface quand leur volume est devenu assez grand pour que la poussée du liquide puisse les soulever. Tout adoucissement de la température facilite ce résultat, en déterminant un commencement de fusion qui détruit l'adhérence au fond ou aux graviers soudés en-dessous. On a remarqué, en effet, sur la Seine et sur la Marne, que les glaçons flottants sont plus nombreux quand le soleil vient réchauffer l'eau. On n'en a jamais vu se former au fond des eaux stagnantes, ce qui tient à ce que la température du fond doit être à 4°, quand la glace peut déjà se former à la surface. Cette glace, augmentant ensuite d'épaisseur en-dessous, cède sa chaleur latente aux couches qu'elle recouvre, et les empêche ainsi de se refroidir.

Les explications qui précèdent sont dues à Desmarest; elles ont été confirmées par Brauns, qui a constaté que la glace ne se forme pas indifféremment sur tous les corps. Le chanvre, la laine, le crin, les métaux, les corps rugueux en sont promptement couverts. Les résines, la cire d'Espagne, la soie, le cuir tanné ne donnent pas prise à la glace. Il est à remarquer que ces derniers corps sont mauvais conducteurs de la chaleur.

Les glaçons flottants s'arrondissent en se heurtant mutuellement. Quand, par un froid vif et prolongé, ils se soudent et forment une croûte de glace qui recouvre la rivière dans toute sa largeur, on dit qu'elle est prise. La glace augmente alors d'épaisseur *par-dessous*, d'abord assez rapidement, puis lentement, à cause de son imparfaite conductibilité. Les couches de glace formées

¹ *Journal de physique* de Lametherie, 1783, t. I, p. 30; et 1788, t. II, p. 59.

pendant les nuits successives sont, du reste, assez distinctes pour qu'on puisse les compter. Dès que la glace atteint une épaisseur de 50 centimètres, elle peut supporter des voitures lourdement chargées, pourvu qu'elle soit continue et qu'elle s'appuie sur l'eau dans toute son étendue.

§ 2. — PHÉNOMÈNES BAROMÉTRIQUES.

I. Instruments et appareils d'observation.

1406. Variations du baromètre. — Si l'atmosphère était partout en équilibre, le baromètre n'éprouverait aucune variation et indiquerait la même pression partout où l'altitude serait la même. Mais l'atmosphère est loin d'être en repos; elle forme comme un vaste océan non interrompu, sans cesse agité de mouvements dus à des condensations locales de vapeur et à des dilatations inégales provenant de la distribution irrégulière de la chaleur solaire, combinée, en certains cas, avec le mouvement de rotation du globe. Une perturbation produite en un point se répercute au loin, après s'être propagée plus ou moins rapidement; et, quand le baromètre monte quelque part, il baisse dans d'autres régions, appartenant quelquefois à des continents différents. Ce fait général, signalé par Woodward, Wallis, Brandes, Pictet, Kaemtz, Quetelet, se confirme chaque jour et donne aux observations barométriques une très-grande importance. Du reste, la hauteur du mercure dans le tube ne représente pas, le plus souvent, le poids de la colonne d'air supérieure; il n'en serait ainsi que si l'atmosphère était en repos. Des déplacements de masses d'air, qui refoulent la couche dans laquelle plonge l'instrument, ou qui entraînent cette couche en produisant une sorte d'aspiration, peuvent déterminer un état de pression peu stable et en désaccord avec les pressions supérieures et latérales. Ces mouvements indiquent une tendance vers un état d'équilibre continuellement cherché, mais jamais atteint, les causes multiples de perturbation ne cessant jamais d'agir. Le baromètre traduit toutes ces fluctuations; il ne fait pas connaître seulement, comme le thermomètre, l'état de l'air dans l'endroit où il est placé, mais il indique celui de l'atmosphère dans une étendue considérable, tant en hauteur qu'en largeur. C'est pourquoi le baromètre est l'instrument fondamental de toute organisation météorologique. C'est aussi, heureusement, le plus facile à installer.

1407. Baromètres d'observation. — Dans les observatoires, on se sert souvent du baromètre fixe de M. Regnault, accompagné d'un cathétomètre (I, 359). On emploie aussi fréquemment un baromètre de Fortin, à tube assez gros pour rendre l'effet capillaire négligeable. On le suspend devant une tablette verticale portant un anneau métallique, dans lequel la cuvette est fixée par trois vis de pression, pour la commodité des observations. Une petite glace placée entre le tube et la tablette renvoie le jour à travers la double fente qui laisse apercevoir le niveau, de manière à rendre le pointage facile.

Masson a indiqué un moyen d'observation très-précis, dans lequel on emploie l'électricité. Un fil de platine, scellé dans le verre, pénètre verticalement dans la chambre barométrique, et une vis micrométrique traverse le couvercle de la cuvette. Au moyen du cathétomètre, on a déterminé exactement la distance de l'extrémité du fil de platine à la pointe de cette vis placée dans une position connue. Le fil et la vis communiquent avec les deux pôles d'une faible pile, dans le circuit de laquelle se trouve une sonnerie de Mirand, que nous décrirons plus tard, et qui sonne sous l'influence de l'électricité, tant que le circuit est fermé. Pour faire une observation, la vis plongeant dans le mercure, on soulève le fond de la cuvette jusqu'à ce que le mercure, en montant dans le tube, vienne affleurer l'extrémité du fil de platine; ce qui ferme le circuit et met la sonnerie en action. On retire alors la vis jusqu'à ce qu'elle quitte la surface du mercure, ce qui est indiqué par le silence subit de la sonnerie. La tête de la vis portant 100 divisions, et le pas étant de 1^{mm}, on évalue ainsi la hauteur de la colonne barométrique, avec une approximation de 1^{mm}.

Baromètres à maximum et minimum. —

On en a proposé plusieurs. Celui de M. C. Decharmes consiste en un baromètre à siphon, dont la petite branche est inclinée de manière à pouvoir retenir un index en fer qui indique le *minimum* de pression. Le *maximum* est donné de la même manière à la partie supérieure de la grande branche, qui est coudée au-dessous du niveau et inclinée parallèlement à la plus courte; l'index logé dans la chambre vide reste à l'endroit le plus élevé où il a été poussé. Les baromètres enregistreurs remplacent avantageusement ces instruments, surtout quand il y a plusieurs *maximum* et *minimum* dans la même journée.

1408. Barométrographes. — Ces appareils, qui enregistrent eux-mêmes les hauteurs successives de la colonne du baromètre, sont de plusieurs sortes. Nous citerons d'abord l'*enregistreur photographique* de M. Ronald (1362), qui s'applique très-facilement au baromètre.

La figure 972 représente le *barométrographe à pointage* de M. Hardy, construit et perfectionné d'après un appareil analogue de l'Observatoire d'Utrecht, établi sur les données de M. Krecké. Dans un baromètre à siphon *abn* est un flotteur *n*, qui suit les mouvements du niveau de mercure, et les transmet à une règle mince *ll* par l'intermédiaire d'un cordon passant sur une poulie très-mobile *p*. La règle glisse librement dans deux brides qui la guident; elle porte par derrière un crayon d'horlogerie *H* fait tourner régulièrement autour de son axe, et sur lequel est appliquée une feuille de papier. Toutes les demi-heures,

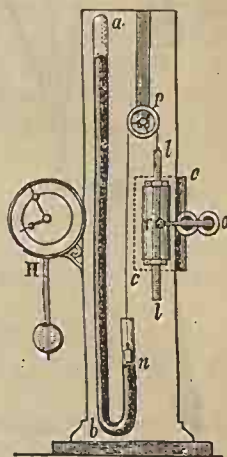


Fig. 972.

l'horloge fait frapper un marteau *or* sur la règle *ll*. Celle-ci étant flexible, la pointe du crayon marque sur le cylindre un point dont la position indique la hauteur du crayon, et par conséquent celle du niveau *n*. Dans l'appareil construit par M. Hardy, l'horloge est mise en mouvement par un courant électrique; et c'est aussi l'électricité qui fait frapper le marteau aux époques voulues. Sur la feuille de papier enveloppant le cylindre est tracée une ligne horizontale divisée en parties égales qui indiquent les heures. On ajuste le papier de manière que cette ligne soit à la hauteur où se trouve le crayon pour une pression connue, par exemple la moyenne du lieu. La différence entre cette pression et celle qui

est marquée par le crayon est alors donnée par la distance du point marqué au trait horizontal. En joignant par une courbe les points marqués, on voit d'un seul coup d'œil la marche du baromètre pendant 24 heures.

1409. Baromètre - balance. —

Quand on veut enregistrer les mouvements du baromètre d'une manière continue, il faut, pour vaincre le frottement du crayon, lui appliquer une force plus grande que celle dont on dispose avec un simple flotteur. Cette condition est réalisée dans le *baromètre - balance*, nommé aussi *baromètre statique*, imaginé par Samuel Morland, en 1670. Cet appareil consiste en un baromètre à cuvette fixe *m* (fig. 973) dont le tube *vm* est suspendu en *a* à un fléau *bo* équilibré par un contre-poids *Q*, de manière que le fléau soit horizontal quand la pression atmosphérique est $H = 760^{\text{mm}}$.

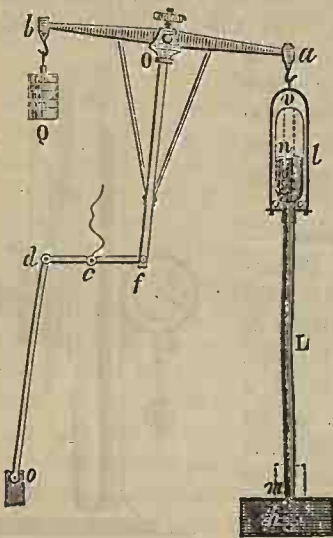


Fig. 973.

La charge appliquée en *a* est égale : 1° au poids *p* du tube et de ses pièces de suspension; 2° à la composante verticale de la pression atmosphérique agissant en *v* sur une étendue correspondant à la section intérieure *s* du tube *L*, étendue sur laquelle cette pression n'est pas contrebalancée en dedans, la chambre barométrique étant vide; cette composante est égale à la colonne de mercure *sH*, *s* étant la section intérieure du tube *L*, et *δ* la densité du mercure. En y ajoutant le poids du mercure logé dans la partie large, autour du prolongement de la colonne *am* de section *s* et s'appuyant en *α, α*, on aura le poids total, *M*, du mercure que contient le tube de *n* en *m*; 3° il faut retrancher de *p + M*, la poussée *heδ* du mercure de la cuvette sur la surface annulaire *e* de l'extrémité inférieure du tube, enfoncée de *h* au-dessous du niveau *m*; 4° il faut encore retrancher la poussée du volume $v\alpha\alpha m$ de l'air déplacé par le tube; car la

pression de l'atmosphère en v est moindre que sa pression en m , du poids d'une colonne d'air $s \cdot \overline{vm}$, et les composantes verticales de bas en haut en α , α sont plus grandes que les composantes de haut en bas sur les parties correspondantes de la voûte v , du poids d'un volume d'air ayant pour hauteur la longueur de la partie large du tube, et pour base la section de l'espace annulaire autour de la colonne L prolongée.

Soit A cette poussée de l'air, S la section droite intérieure de la partie large, et posons $S - s = \sigma$, $nm = H$, $am = L$, $n\alpha = l$; la charge supportée par le point a sera

$$P = p + [Hs + l\sigma - he] \delta - \Lambda \quad [1]$$

Si la pression atmosphérique augmente, l'équilibre sera rompu, et le tube s'enfoncera dans la cuvette, dont nous négligerons les changements de niveau. Mais comme la poussée sur l'extrémité e du tube va en augmentant, il y aura bientôt équilibre, si le rapport entre les surfaces σ et e est convenable. Pour trouver la quantité dont s'enfonce le tube, soit l' , L' , h' ce que deviennent l , L , h , quand la pression devient H' . La charge en a sera

$$P' = p + (H's + l'\sigma - h'e) \delta - \Lambda.$$

En retranchant de cette valeur de P' la valeur [1] de la charge P , on aura pour l'augmentation

$$P' - P = \delta [s(H' - H) + \sigma(l' - l) - (h' - h)e], \quad [2]$$

en supposant qu'on néglige les changements de valeur de Λ . Or on a $H = l + L$, et $H' = l' + L'$ d'où $H' - H = l' - l - (L - L') = l' - l - (h' - h)$, le point α s'abaissant autant que l'extrémité e du tube. De là, on tire $l' - l = H' - H + h' - h$. En portant dans [2] cette valeur de $l' - l$ il vient

$$P' - P = \delta [(H' - H)(s + \sigma) + (h' - h)(\sigma - e)].$$

Supposons que l'axe d'appui du fléau passe par son centre de gravité, comme cela avait lieu dans l'appareil de Morland, il faudra, pour l'équilibre, que cette différence soit nulle, le contre-poids Q ne variant pas. Égalant donc à zéro la valeur de $P' - P$, on a une équation d'où l'on tire

$$h' - h = \frac{(H' - H)(s + \sigma)}{e - \sigma} = (H' - H) \frac{S}{e - \sigma},$$

en remarquant que $s + \sigma$ n'est autre chose que la section intérieure S de la partie l du tube. On voit que $h' - h$, c'est-à-dire la quantité dont s'enfonce

le tube, est proportionnelle à l'accroissement $H' - H$ de la pression. On voit aussi qu'elle est proportionnelle à la section S , et d'autant plus grande que les surfaces annulaires σ et e diffèrent moins entre elles. Quand elles sont égales, on a $h' - h = \infty$, c'est-à-dire que le tube tend à s'enfoncer indéfiniment, et, en réalité, descendra jusqu'au fond de la cuvette, ou jusqu'à ce que le mercure arrive en v . — On voit que la surface annulaire e doit être plus grande que σ , pour que $h' - h$ soit positif. C'est pour que cette condition soit remplie que l'on enveloppe ordinairement le bas du tube d'un manchon de fer dépassant le niveau m , qui augmente la surface e . — Si le diamètre du tube était partout le même, il faudrait poser $\sigma = 0$.

Si l'axe d'appui du fléau est au-dessus du centre de gravité, comme dans les balances ordinaires, la différence $P' - P$ ne devra plus être nulle pour l'équilibre, mais égale à $\frac{R}{\pi r} \text{ tang } \alpha$, (I, 153), R étant la longueur du bras du fléau, π son poids, et r la distance de son centre de gravité à l'axe d'appui.

Pour enregistrer les mouvements du tube vm , on adapte au fléau une longue aiguille Of , articulée en f avec une règle fd portant en son milieu un crayon c qui s'appuie sur une bande de papier appliquée sur un cylindre horizontal qu'une horloge fait tourner. Un levier od , articulé en o et d , force le milieu c à décrire une ligne sensiblement droite, comme dans le parallélogramme de Watt, pendant que le point f décrit un arc de cercle.

II. Résultats des observations barométriques.

1410. MOYENNES BAROMÉTRIQUES. — La hauteur du baromètre en un même lieu variant continuellement, on en cherche les moyennes *diurnes*, *mensuelles* et *annuelles*, en suivant la même marche que pour les températures (1365). En faisant ensuite la somme des moyennes annuelles observées pendant un nombre suffisant d'années et la divisant par ce nombre, on obtient la *hauteur moyenne barométrique* du lieu des observations.

On peut aussi prendre la hauteur *maximum* et la hauteur *minimum* de chaque jour, et chercher les valeurs moyennes de ces hauteurs pendant plusieurs années. A Paris, le *maximum* se manifeste à 9 heures du matin, et le *minimum* à 3 heures du soir, et la moyenne des maximum et minimum moyens coïncide avec la moyenne du lieu. Enfin, une seule observation faite chaque jour entre midi et une heure pourrait donner cette moyenne, comme il résulte des observations faites par Bouvard de 1816 à 1826. L'heure exacte à laquelle il faut observer dépend de la latitude : c'est midi et demi pour Paris, et une heure entre les tropiques. Le moment change aussi un peu avec les saisons.

Toutes les hauteurs doivent être ramenées à zéro. Viard a proposé, au lieu de faire la correction sur chaque observation en particulier, de la faire sur la moyenne, en prenant pour température la moyenne des températures données

par le thermomètre de la colonne de mercure. Le résultat est ordinairement le même. Cette méthode est surtout sûre quand le baromètre est installé dans une chambre dont la température est à peu près constante.

1111. Hauteurs au niveau de la mer. — La hauteur moyenne du baromètre au niveau de la mer est, en France, de 761^{mm},35. A Paris, elle n'est que de 756^{mm}, à cause de l'altitude, qui est de 60^m pour le pavé du Panthéon.

Influence de la latitude. — La hauteur moyenne au niveau de la mer varie avec la latitude. Il résulte d'un travail de M. Schouw, de Copenhague¹, que cette hauteur augmente régulièrement de l'équateur au 38° degré de latitude nord environ, et diminue ensuite pour des latitudes plus élevées. Voici quelques résultats corrigés de l'influence de la variation de la pesanteur avec la latitude :

LIEUX	LATITUDE	HAUTEUR DU BAROMÈTRE au niveau de la mer.	OBSERVATEURS
Christiansborg....	5° 30' N.	756 ^{mm} ,16	Publmanet et Wahlstrand.
Macao.....	23	761,61	Richenet.
Palermo.....	38	762,47	Cacciatore.
Paris.....	49	761,68	Bouvard.
Christiania.....	59° 55'	759,63	Esmark.
Spitzberg.....	75° 30'	758,48	Scoresby.

1112. Moyennes mensuelles. — La hauteur moyenne varie avec la saison.

Si l'on prend la moyenne des mois de *janvier* de plusieurs années consécutives, celle des mois de *février*, de *mars*..., on trouve que cette moyenne diminue généralement de l'hiver à l'été, et augmente ensuite jusqu'en hiver. Les différences sont le plus prononcées pour les basses latitudes, du moins dans l'hémisphère nord. La méthode graphique montre bien ces résultats. Dans la figure 974, les abscisses représentent les mois; et les ordonnées, les moyennes barométriques qui leur correspondent. On voit comment varient ces moyennes : à Calcutta, C; à la Havane, H; à Paris, P; à Saint-Petersbourg, S. Les différences des ordonnées représentent, en grandeur réelle, les différences des hauteurs moyennes;

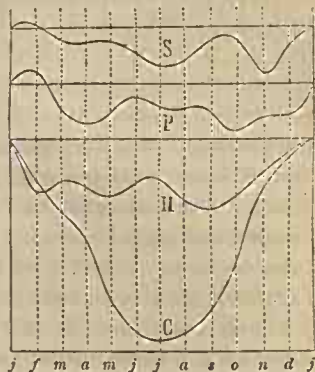


Fig. 974.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LIII, p. 143.

le point de départ de chaque courbe étant d'ailleurs arbitraire. On voit que, à Calcutta et à la Havane, qui ont même latitude, les différences entre les moyennes mensuelles ne sont pas égales; elles sont beaucoup plus prononcées dans l'Inde qu'en Amérique. C'est à de Buch qu'on doit la première observation du changement de la hauteur moyenne avec les saisons. Dove a ensuite généralisé en comparant un grand nombre d'observations.

1413. VARIATIONS ACCIDENTELLES. — Pour comparer les moyennes barométriques des jours successifs par la méthode graphique, on compte les jours sur une droite horizontale qui correspond à la moyenne annuelle, et l'on porte au-dessus ou au-dessous les différences entre cette moyenne annuelle et celle du jour considéré.

Influence des saisons. — L'amplitude des variations accidentelles est plus grande en hiver qu'en été. La figure 975 représente, d'après Ramond, les hau-

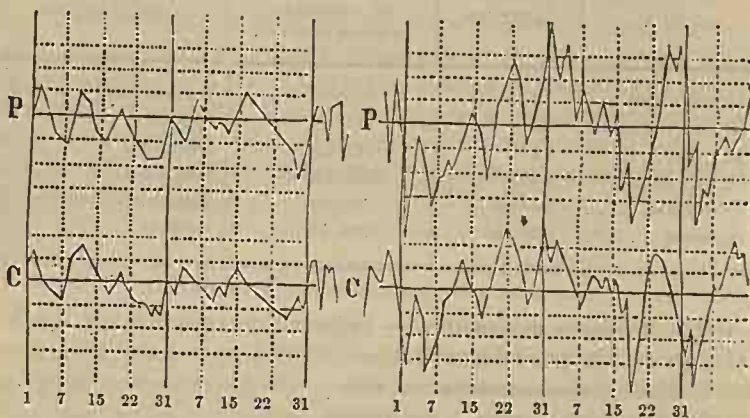


Fig. 975.

teurs moyennes des jours successifs pendant les mois d'août et juillet, et les mois de décembre et janvier de l'année 1806. La courbe supérieure P correspond aux observations faites à Paris, et la courbe C, à celles de Clermont. Les distances des traits horizontaux représentent deux lignes de l'ancien pied, et celles des traits verticaux 7 ou 8 jours. On voit, au premier coup d'œil, que l'amplitude est bien plus grande en hiver qu'en été. On remarque aussi qu'il y a, pour une distance de 320 kilomètres, des différences notables dans les moyennes des mêmes jours. Cependant, les courbes P et C se ressemblent beaucoup; ce qui montre que les changements de pression se font sentir presque en même temps sur une grande étendue de pays. De plus, on remarque que l'amplitude est plus grande, dans chaque saison, à Paris qu'à Clermont, qui est plus élevé au-dessus de la mer. A Paris, la plus grande hauteur qu'on ait observée a été de 781^{mm}, et la plus petite de 719 : toutes les deux en 1821.

La surface du corps d'un homme supporte, dans le cas de la dernière pression, 1000 kil. de moins environ, que sous la pression moyenne. Quand le baromètre est bas, on éprouve une sorte de malaise, dû à l'expansion des fluides intérieurs, qui fait dire que le temps est *lourd*; et l'on voit que, au contraire, l'air est moins pesant.

Relation avec la latitude. — L'amplitude des variations accidentelles augmente notablement avec la latitude. Tandis qu'elle n'est que de 6^{mm} près de l'équateur, elle s'élève à 30^{mm} sous le tropique du cancer, à 40^{mm} en France, et à 60^{mm} à la latitude de 65°. De plus, la différence d'amplitude, d'une saison à l'autre, est d'autant plus marquée qu'on s'approche davantage du pôle. On remarque enfin que le baromètre descend au-dessous de la moyenne plus qu'il ne monte au-dessus, comme on le voit sur la figure 975. Dans nos climats, le rapport entre les écarts dans les deux sens est à peu près de 5 : 3.

Lignes isobariques. — M. Kaemtz nomme ainsi des lignes tracées sur la surface du globe et passant par les lieux où la moyenne des amplitudes diurnes observées pendant toute l'année est la même. Ces lignes, assez irrégulières, courent dans la direction des parallèles géographiques; elles correspondent à des amplitudes de plus en plus grandes à mesure qu'on s'avance vers le Nord, et semblent se resserrer latéralement de manière à se rapprocher de la forme d'un 8, pour finir par former deux systèmes séparés. Les centres de ces deux systèmes, ou *pôles des oscillations irrégulières* du baromètre, paraissent être situés dans les mers qui séparent les deux continents.

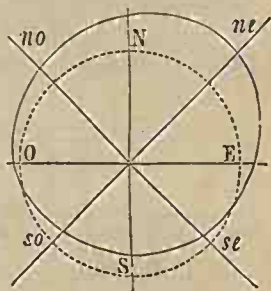


Fig. 976.

Influence du vent. — En prenant la moyenne des hauteurs à midi, quand le vent souffle dans une même direction, on a reconnu que, généralement en Europe, le baromètre est très-haut quand le vent vient des points situés entre le Nord et l'Est, et très-bas, quand il vient de l'espace compris entre le Sud et l'Ouest. Cette loi a été démêlée par de Buch, et confirmée par des observations faites depuis à des latitudes très-différentes. Il y a cependant quelques anomalies inexplicables : à Vienne et à Bude, le baromètre est bas par les vents d'Est, et à Pétersbourg, par ceux du Nord-Ouest.

Dans d'autres contrées, les résultats sont différents : aux États-Unis d'Amérique, ainsi qu'à Pékin en Chine, le baromètre est plus haut avec le vent du N.-O., et plus bas avec le S.-O. On voit donc que, généralement, le baromètre est à son maximum quand le vent vient du Nord ou de l'intérieur des continents, et à son minimum quand il souffle du Sud ou de la mer¹.

La figure 976 représente, en grandeur réelle, les quantités dont la hauteur

¹ Kaemtz, *Leçons de Météorologie*, traduction française, p. 289.

du baromètre diffère de la moyenne générale, à Paris, par les divers vents : la circonférence en ligne ponctuée correspond à la moyenne, et sert de point de départ pour compter ces différences en plus ou en moins. Cette construction se nomme la *rose barométrique des vents*.

1414. VARIATIONS HORAIRES. — En prenant les moyennes hauteurs correspondantes aux différentes heures du jour, de manière à faire disparaître les variations accidentelles, on reconnaît un mouvement régulier dans la pression atmosphérique. Dès 1666, Béalé avait annoncé que le baromètre est plus haut le soir et le matin qu'à midi. En 1722, un observateur hollandais inconnu avait constaté deux minimum et deux maximum diurnes à Surinam. Godin, Bouguer et Lacordamine reconnurent le même fait, et de Humboldt, par des observations de jour et de nuit, publiées en 1807, a démontré complètement l'existence de

la période régulière barométrique entre les tropiques. Une foule d'observateurs, à la tête desquels il faut citer Ramond, sont parvenus depuis, en prenant un grand nombre de moyennes, à distinguer les variations régulières, à des latitudes plus élevées.

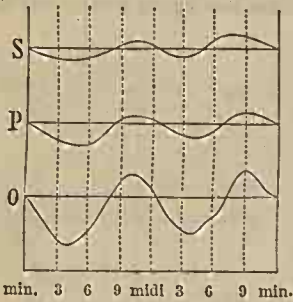


Fig. 977.]

L'amplitude des variations horaires n'est que de quelques millimètres. A l'équateur, où les variations accidentelles ne viennent pas masquer le phénomène, elles sont tellement régulières que de Humboldt, à l'inspection de la colonne barométrique, pouvait connaître l'heure à un quart d'heure près. Dans ces climats, la pluie, le vent, les tempêtes, n'ont pas d'action

sur le baromètre, et, quand on défalque les effets des variations horaires, l'amplitude des changements accidentels ne dépasse pas 2^{mm}.

D'après de Humboldt, le baromètre présente, sous l'équateur, deux *minimum* et deux *maximum*, aux heures indiquées ci-dessous, et il s'écarte de la moyenne, des quantités inscrites à la deuxième ligne :

4 ^h 13 ^m matin	9 ^h 23 ^m matin	4 ^h 8 ^m soir	10 ^h 23 ^m soir
— 0 ^{mm} ,49 (1 ^{re} min.)	+ 1 ^{mm} ,46 (1 ^{re} max.)	— 1 ^{mm} ,09 (2 ^d min.)	+ 0 ^{mm} ,38 (2 ^d max.)

La courbe O (fig. 977) représente ces variations. Les ordonnées sont quintuples de la grandeur réelle, et leurs distances représentent trois heures. La différence entre le *maximum* du matin et le *minimum* du soir, qui sont les plus prononcés, se nomme la *grande période*. Elle est, à l'équateur, de 2^{mm},55. De Humboldt a reconnu les variations horaires entre les tropiques, jusqu'à 2000^m de hauteur; et M. Pentland, jusqu'à 4880^m sur le Potosi, où la grande période n'était plus que de 1^{mm},60.

Les courbes P et S représentent les variations horaires moyennes pour Paris

et Saint-Petersbourg. A Paris, d'après les observations de Bouvard poursuivies de 1816 à 1826, le baromètre, observé à 9^h du matin, 3^h et 9^h du soir, a donné, en millimètres, les moyennes 756,35; 755,59; 755,95. La grande période n'est donc que de 0^{mm},76.

Dans l'hémisphère boréal, les heures des *maximum* et des *minimum* sont les mêmes, quelle que soit la latitude : 3^h 45^m du matin et 4^h 5^m du soir, pour les *minimum*; 9^h 37^m du matin et 10^h 11^m du soir, pour les *maximum*. Ramond a reconnu que les saisons modifient ces heures. Ainsi, le maximum du matin, qui a lieu de 9^h à 10^h pendant l'hiver, se montre de 7^h à 8^h pendant l'été; et le minimum du soir, qui arrive entre 2^h et 3^h pendant l'hiver, a lieu entre 4^h et 5^h pendant l'été.

Ces mouvements du baromètre n'ont aucun rapport avec des marées atmosphériques analogues à celles de la mer, car elles dépendent des heures. Elles sont évidemment liées à l'échauffement inégal de l'air aux différentes époques de la journée.

415. Amplitude des variations horaires. — Cette amplitude change avec la saison, la latitude et l'altitude du lieu, et la direction du vent.

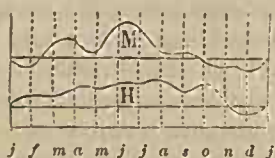


Fig. 978.

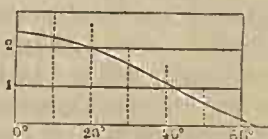


Fig. 979.

Saisons. — L'amplitude des variations horaires est la plus grande vers les mois de juin et juillet, et la plus petite en hiver. Sur la figure 978 ces changements sont représentés, d'après les observations de M. Kaemtz, pour Halle, H; et Milan, M, par des ordonnées présentant 20 fois leur grandeur réelle; elles sont donc très-petites, et les irrégularités des courbes montrent que la période de 10 ans, pendant laquelle les observations ont été recueillies, n'est pas assez grande pour faire disparaître les anomalies.

Latitude. — L'amplitude diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. Ce résultat se voit sur la figure 977, dans laquelle les courbes O, P, S représentent ces variations, dans le Grand Océan, à Padoue et à Pétersbourg. A la latitude de 60°, les variations horaires sont à peu près nulles. On voit (fig. 979) une courbe qui représente la loi du décroissement de l'amplitude avec la latitude. Les ordonnées sont quintuples de la grandeur réelle. Au delà de 70°, il paraît que la période se montre de nouveau, mais les *minimum* seraient remplacés par les *maximum*, et réciproquement.

Enfin, l'amplitude des variations horaires diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère; d'où l'on était en droit de conclure qu'elle devait être nulle.

à une certaine hauteur. C'est, en effet, ce qui a lieu, au Saint-Bernard, à 2491^m d'altitude, et sur le Faulhorn à 2700^m, M. Kaemtz a vu les oscillations se faire en sens inverse de celles de la plaine. — Nous aurons à revenir plus d'une fois, dans la suite de ce chapitre, sur les variations du baromètre et sur leurs causes.

§ 3. — DES MOUVEMENTS DE L'ATMOSPHÈRE, ET DU VENT.

I. Du vent en général. — Anémoscopes et anémomètres.

1416. Du vent en général. — Le vent n'est autre chose que de l'air qui se transporte d'un lieu dans un autre. Épicure disait que c'est de l'air qui coule. L'étude de ce météore a beaucoup d'importance en climatologie ; car la direction des vents dominants, leur fréquence, leur force, leur état de sécheresse ou d'humidité, ont une grande influence sur la végétation. Par exemple, à l'île de la Réunion, le vent du sud-est est tellement contraire aux arbres, que jamais on ne voit de fruits du côté exposé à son influence. L'Algérie est traversée par deux courants opposés : l'un inférieur venant du nord, et les revers des montagnes exposés à son action ne présentent que des broussailles rabougries ; l'autre supérieur, venant du désert, qui empêche la plupart des arbres aborigènes de s'élever au delà de 10 à 12^m quand ils ne sont pas abrités ; arrivés à cette hauteur, leur cime s'aplatit en-dessus et s'étend en largeur. Les vents agissent encore en transportant à de grandes distances la chaleur ou le froid des régions qu'ils ont traversées ; ils adoucissent certains climats, assainissent les villes et les contrées marécageuses ; ils transportent à de grandes distances des graines et le pollen des fleurs, et malheureusement aussi des poussières de toutes sortes, une foule d'ovules de germes d'animaux microscopiques, transportant ainsi à d'immenses distances la contagion et les maladies. Sans le phénomène du vent, il ne tomberait pas de pluie sur les continents, comme nous le verrons bientôt.

La navigation est surtout intéressée à l'étude des vents. Depuis un certain nombre d'années, on s'attache à observer leur direction dans toutes les parties du monde, et l'on a reconnu qu'ils sont assujettis à une marche générale, comme les courants de la mer ; les fluctuations irrégulières qu'on observe habituellement doivent être comparées aux remous et aux tourbillons qui se produisent dans les eaux. Maury, après avoir tracé la carte des courants marins, s'est proposé de faire la *carte de l'air*, et, en suivant les indications qu'il donne, on peut abrégér considérablement la durée de certains voyages ; par exemple, on réduit presque de moitié le temps nécessaire pour aller des États-Unis au cap Saint-Roch, et d'un tiers celui qu'il faut pour aller du même pays en Californie.

On divise les vents en *vents réguliers* et *vents irréguliers* ou *accidentels* ; et il y a à considérer leur *direction*, leur *vitesse de translation* et leurs *qualités physiques*.

1417. Direction du vent. — Les anciens ne considéraient que quatre directions, correspondant aux quatre points cardinaux. Aujourd'hui, on en distingue 32, dont le tracé se nomme la *rose des vents*. La figure 980 représente la forme qu'on lui donne ordinairement dans les boussoles. Chaque vent se désigne par le point de l'horizon d'où il souffle, points dont la position est indiquée d'après les règles suivantes :

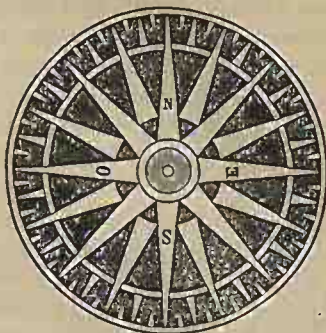


Fig. 980.

Les directions moyennes aux quatre points cardinaux se désignent en réunissant les noms des deux points cardinaux qui les comprennent. Les huit autres, intermédiaires aux précédentes, se désignent de la même manière, en ayant soin de nommer la première, la direction principale. Enfin, on considère encore 16 directions intermédiaires, qui se dénomment au moyen des huit principales : on place d'abord le nom de la direction qui s'éloigne le moins de celle que l'on veut indiquer, puis le nom de la plus éloignée, en le faisant précéder de la fraction $\frac{1}{4}$.

Voici le tableau des noms des 32 vents. Les mots *nord*, *sud*, *est*, *ouest*, y sont indiqués par leur initiale, et chaque ligne correspond à un quart de la rose :

NORD,	$n\frac{1}{4}ne$,	N. NE,	$ne\frac{1}{4}n$,	NE,	$ne\frac{1}{2}e$,	E. NE,	$e\frac{1}{2}ne$,	EST.
EST,	$e\frac{1}{4}se$,	E. SE,	$se\frac{1}{4}s$,	SE,	$se\frac{1}{2}s$,	S. SE,	$s\frac{1}{2}se$,	SUD.
SUD,	$s\frac{1}{2}so$,	S. SO,	$so\frac{1}{4}s$,	SO,	$so\frac{1}{2}o$,	O. SO,	$o\frac{1}{2}so$,	OUEST.
OUEST,	$o\frac{1}{4}no$,	O. NO,	$no\frac{1}{4}o$,	NO,	$no\frac{1}{2}n$,	N. NO,	$n\frac{1}{4}no$,	NORD.

Chaque intervalle se nomme un *rhumb*. Quand le vent change de direction, on dit qu'il saute de un ou plusieurs rhumbs. Quand on veut déterminer avec plus de précision la direction du vent, on se sert des degrés de la circonférence : on indique d'abord, au moyen des lettres N ou S, si le vent vient de l'hémisphère nord ou de l'hémisphère sud ; puis on fait connaître le nombre de degrés dont sa direction s'écarte du méridien du côté de l'est ou de l'ouest ; par exemple, un vent désigné par les initiales N. 15° O, vient d'un point situé entre le *nord* et l'*ouest*, et il s'écarte de 15° du méridien.

1418. Manière d'observer la direction du vent. — *Anémoscopes*. — Il règne à de très-grandes hauteurs des courants d'air qui, souvent, sont contraires aux vents de terre. On en détermine la direction par celle du mouvement des nuages, que l'on observe dans un miroir horizontal sur lequel est gravée la rose des vents, et que l'on place de manière que la ligne *nord-sud* soit dans le méridien. Pour les vents qui soufflent près de la surface de la terre, on emploie différents appareils nommés *anémoscopes*.

Le plus simple est la girouette ordinaire, mais elle n'est pas généralement assez mobile pour obéir aux faibles agitations de l'air. Dans ce cas, on observe la direction que prend la fumée sortant d'une cheminée isolée et surmontée d'un long tuyau. — Taupenot rend la girouette très-mobile en fixant la lame à un tube fermé par le haut, dans lequel entre la tige fixe de l'appareil. Cette tige est terminée par une boule d'ivoire, verre, porcelaine vernie, sur laquelle repose, par sa partie concave, un hémisphère de plus grand diamètre qui ferme le tube. Cette disposition se voit (fig. 986).

Les oscillations qu'éprouve la girouette par les forts vents en rendent l'observation difficile. Le P. Secchi les atténue beaucoup en formant la lame de deux parties placées l'une à côté de l'autre et formant entre elles un angle de 30°, dont le sommet est du côté de l'axe de rotation.

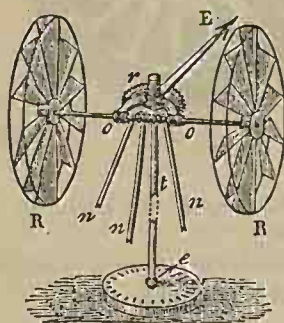


Fig. 981.

La position d'une girouette au sommet d'un édifice en rendant l'observation incommode, on la dispose souvent de manière que sa tige tourne avec la lame; cette tige est maintenue par un anneau fixé au toit, qu'elle traverse, et s'appuie, par son extrémité inférieure qui forme pivot, sur un support placé dans la salle des observations. Une aiguille, fixée au bas de la tige parallèlement à la lame, en indique les différentes directions, sur un cercle horizontal.

Cette disposition rend la girouette paresseuse. Cet inconvénient est évité dans l'anémoscope à ailettes de M. Piazz-Smyth, perfec-

tionné par M. Salleron. Un disque *r*, garni de dents (fig. 981), est fixé horizontalement sur trois supports *n*, *n*, *n*. Il est traversé à son centre par un arbre vertical *t* tournant sur lui-même, et muni de deux bras horizontaux *o*, *o*, qui supportent l'arbre tournant de deux roues à ailettes obliques *R*, *R*. Sur cet arbre est affermie une vis sans fin, dont le filot s'engage dans les dents du disque fixe *r*. Quand le vent fait tourner les roues, la vis sans fin prenant son appui sur les dents du disque, entraîne tangentiellement l'arbre *oo*, jusqu'à ce que les roues *R*, *R* soient parallèles à la direction du vent. Alors elles s'arrêtent, et les aiguilles *E* et *e* perpendiculaires à l'arbre *oo* indiquent cette direction. L'appareil est très-sensible, les frottements de l'axe *t* étant facilement vaincus par la puissance mécanique de la vis.

Dans les voyages, quand on n'a pas d'anémoscope à sa portée, on peut reconnaître assez exactement la direction du vent en levant un doigt verticalement après l'avoir mouillé : on éprouve une sensation de froid du côté d'où vient le vent, l'évaporation étant activée de ce même côté.

Anémoscopes enregistreurs. — Nous citerons d'abord l'anémoscope de d'Ons-en-Bray, d'autant plus volontiers qu'il constitue le premier exemple d'un appareil enregistreur. La tige tourne avec la lame de la girouette, et est garnie

vers le bas, d'un cylindre dans lequel sont implantés, suivant une hélice, 25 crayons équidistants. Une bande de papier, qu'un mouvement d'horlogerie fait marcher horizontalement, est effleurée par un des crayons, qui trace alors un trait horizontal sur la bande mobile. La hauteur du trait fait connaître quel est le crayon qui touchait au papier, et sa longueur montre pendant combien de temps la girouette a conservé la même direction.

Le P. Beaudoux a imaginé l'anémoscope de la figure 982. Le limbe g , équilibré par la masse n , tourne avec l'arbre vertical $o'o$. Cet arbre porte un entonnoir v rempli de sable qu'il laisse tomber dans des cases A . Un second entonnoir v' , disposé comme le premier et destiné à l'équilibrer, jette du sable dans une seconde couronne de cases. La quantité de sable reçue par chaque case fait connaître combien de temps la girouette s'est tenue dans la position qui lui correspond. — Nous verrons plus loin (1423) d'autres appareils enregistrant en même temps la direction et la force du vent.

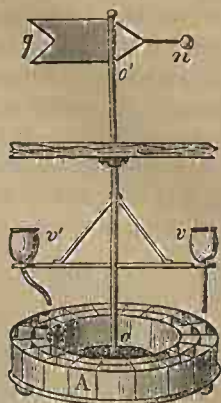


Fig. 982.

1419. Direction moyenne du vent. — Les notations adoptées pour désigner les différentes directions du vent se prêtent difficilement au calcul des moyennes. Voici cependant comment Lambert a considéré la direction moyenne des vents.

Supposons qu'un courant d'air venant du nord passe par le point C (fig. 983), avec une vitesse v pendant un temps t , la masse d'air qui passera sera proportionnelle à vt . Si un autre courant venant du sud souffle ensuite avec une vitesse v' et pendant un temps t' , il ramènera une masse d'air égale à $v't'$; de sorte que le résultat sera le même que si une masse d'air $vt - v't'$ était passée par le point C pendant le temps $t + t'$. Si donc on représente par N et S les masses d'air venant du nord et du sud, le résultat sera représenté par $N - S$. Si la différence est positive, le vent résultant sera dirigé du nord au sud; et du sud au nord, si elle est négative. Si nous considérons de même les vents d'est et d'ouest, le vent résultant sera $E - O$, dirigé de l'est à l'ouest quand cette différence sera positive. Les résultats $N - S$ et $E - O$ étant considérés comme des forces cb , ca (fig. 983), nous pourrions chercher leur résultante CR. L'angle V qu'elle fera avec la méridienne NS sera donné par la formule

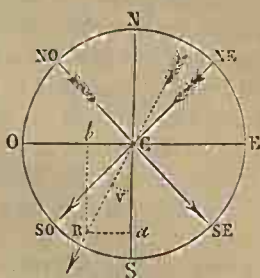


Fig. 983.

$$\text{tang } V = \frac{Ra}{Ca} = \frac{Cb}{Ca} = \frac{E - O}{N - S}.$$

Si nous considérons maintenant les huit vents principaux, nous pourrions décomposer les quatre vents N.E, N.O, S.E, S.O, chacun en deux autres, dirigés l'un suivant la méridienne, l'autre suivant la droite OE. Ainsi, le vent du *nord-est* se décompose en deux autres, l'un suivant CS représenté par NE cos 45°, l'autre suivant CO et égal aussi à NE cos 45°; ces deux composantes sont positives. Le vent de *nord-ouest* donne les composantes NO cos 45° suivant CS, et — NO cos 45° suivant CE. Le vent de *sud-est* donne les composantes — SE cos 45° suivant CN, et SE cos 45° suivant CO. Enfin, le vent du *sud-ouest* donne — SO cos 45° suivant CN, et — SO cos 45° suivant CE. En réunissant les composantes qui sont dirigées suivant le méridien, aux vents du nord et du sud, et celles qui soufflent suivant la ligne OE, aux vents d'est et d'ouest, on aura

$$\text{tang } V = \frac{E - O + (NE + SE - NO - SO) \cos 45^\circ}{N - S + (NE + NO - SE - SO) \cos 45^\circ}$$

Telle est la formule de Lambert. Les signes du numérateur et du dénominateur de la valeur de *tan* V font connaître le sens des composantes Cb et Ca, et par suite l'angle droit dans lequel est dirigée la résultante.

La *vitesse moyenne* du vent résultant est donnée par la formule

$$R = \frac{Cb}{\sin V} = \frac{E - O + (NE + SE - NO - SO) \cos 45^\circ}{\sin V}$$

Ordinairement, dans le calcul de *tan* V, on ne tient pas compte de la vitesse des différents vents, et l'on représente par les signes NS, ... NE, SE... les nombres de fois sur 1000 que chacun d'eux a soufflé. Cette manière de procéder suppose que les vitesses moyennes sont à peu près les mêmes dans toutes les directions, ce qui est loin d'être vrai. Mais les difficultés que présentaient les mesures des vitesses, avant l'invention des nouveaux anémomètres, avaient conduit à procéder ainsi.

M. Schouw cherche à se rendre compte de la moyenne direction des vents par une autre méthode : il compare par différence les nombres de fois sur 1000 qu'ont soufflé les vents du nord (NO, N, NE), et les vents du sud (SO, S, SE); il compare de même les vents d'est (NE, E, SE) aux vents d'ouest (NO, O, SO), et il reconnaît, de cette manière, si le vent a soufflé plus fréquemment du nord que du sud, et de l'est que de l'ouest.

1120. VITESSE DU VENT. — La vitesse du vent est très-variable. Voici les termes généralement adoptés pour la désigner :

DÉNOMINATIONS.	VITESSE en 1 ^e .	EN KILOM. par heure.	DÉNOMINATIONS.	VITESSE en 1 ^e .	EN KILOM. par heure.
Vent à peine sensible..	0 ^m ,5	1 ^k ,8	Vent très-fort.....	20 ^m ,0	72 ^k ,0
Vent sensible.....	1,0	3,6	Tempête.....	22,5	81,0
Vent modéré.....	2,0	7,2	Grande tempête....	27,5	99,0
Vent assez fort.....	5,5	19,8	Ouragan.....	36,0	129,0
Vent fort.....	10,0	36,0	Ouragan violent....	45,0	162,0

Les marins appellent *vent frais* celui qui parcourt 10^m en 1^s , *grand frais* le vent de 15^m , *très-grand frais* celui de 20^m . Ils nomment *tempête*, un vent de 25 à 30^m , et *ouragan* celui de 35 à 45^m . Un ouragan de 45^m , non-seulement déracine les plus gros arbres, mais encore est capable de renverser des édifices solidement construits.

Pour évaluer la vitesse du vent, on emploie différents moyens. Quand il s'agit des vents qui soufflent à une grande hauteur, on observe l'espace que l'ombre des nuages parcourt sur le sol dans un temps donné. La vitesse des vents de terre peut s'évaluer au moyen de corps légers que le vent emporte horizontalement : on observe le temps qu'ils mettent à franchir l'espace qui sépare deux jalons plantés à une distance connue. Mais il est plus commode de se servir d'instruments particuliers nommés *anémomètres*. On en a imaginé un grand nombre; nous allons décrire les principaux.

1-121. Anémomètres de pression. — L'anémomètre de Bouguer (*fig. 984*) consiste en une plaque que l'on oppose à l'action du vent; elle est munie d'une tige t qui traverse le tube fixe r , et qu'un ressort à boudin repousse continuellement. Une division tracée sur la partie t de la tige, fait connaître de combien le ressort a cédé à l'effort

du vent. Souvent la tige porte des dents obliques, entre lesquelles s'engage l'extrémité d'un léger ressort, qui empêche la plaque de revenir sur ses pas

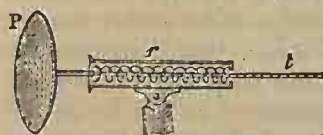


Fig. 984.



Fig. 985.

quand on cesse l'expérience. Quelquefois aussi, ces dents s'engagent dans celles d'un pignon portant une aiguille qui parcourt les divisions d'un cadran. — Pour graduer la tige t , on tourne l'instrument de manière que la plaque soit horizontale, et on la charge successivement de différents poids.

Pour passer de la *force* du vent à sa *vitesse*, il faut recourir à des expériences directes. C'est ce qu'a fait Borda. Il a d'abord reconnu que la grandeur de la plaque et sa forme, à égalité de surface, ont une influence marquée sur la force, par centimètre carré, qui correspond à une vitesse donnée; ce qu'on doit attribuer aux remous et aux inflexions de l'air près des bords. Si F est la force du vent sur un millimètre carré, V sa vitesse, et S la surface de la plaque en millimètres carrés, on aura $F = c \times SV^2$; c est un coefficient constant pour une même plaque, et qui augmente en même temps que son étendue. D'après les expériences de Borda, les valeurs de c sont 0,92; 1 et 1,04, pour des plaques de 41664, 26244, 59049 millimètres carrés. M. Rouse a trouvé $c = 1,20$ pour une plaque de 929000 millimètres carrés.

Dans l'anémomètre de Lind (*fig. 985*), la force du vent soulève une colonne

liquide dans un tube recourbé en siphon *nao*, contenant de l'eau ou du mercure. Ce tube peut tourner autour de la tige *cc*, sous l'influence du vent qui agit sur la lame *A*, et l'air s'engouffre dans l'ouverture *o* et fait monter le niveau *n* d'une quantité qui dépend de sa vitesse.

Une autre espèce d'anémomètre consiste en une simple plaque rectangulaire tournant autour de son côté horizontal supérieur, qui se place perpendiculairement à la direction du vent. La plaque, soulevée par le bas, s'arrête dans une position qui permet d'apprécier la force du vent. Taupenot a perfectionné cet anémomètre, comme on le voit dans la figure 986. La plaque indicatrice *ol* est à cheval sur la lame *cab* d'une girouette très-sensible, à laquelle la charnière *o* est perpendiculaire. Des dents adaptées au bord de la girouette, qui a la forme d'un quart de cercle, permettent d'observer de loin l'inclinaison que prend la plaque *ol*. De cette inclinaison on déduit la vitesse du vent, en s'appuyant sur des expériences directes que l'on fait en transportant l'appareil dans un air calme, avec des vitesses connues; ou bien en comparant les inclinaisons de la lame *ol* à la vitesse du vent mesurée au moyen de corps légers.



Fig. 986.

1422. Anémomètres de rotation. — Dans ces appareils, dont la première idée est due à Wolf, le vent agit sur un moulinet à ailettes obliques, et le fait tourner avec une rapidité qui dépend de sa vitesse. Dans l'anémomètre de Wolfmann, l'arbre du moulinet est placé sur le prolongement de la lame d'une girouette et du côté du vent, de manière que l'appareil s'oriente de lui-même. Une vis sans fin fait marcher un compteur, qui indique le nombre de tours accomplis pendant un temps donné. Au moment où l'on commence à compter les secondes, on laisse partir le moulinet

en déplaçant, au moyen d'un cordon, un levier qui retient l'une des ailettes. On fait une manœuvre inverse quand on veut arrêter l'appareil. Pour déduire du nombre de tours la vitesse du vent, on construit une table donnant les nombres de tours qui correspondent à différentes vitesses observées directement au moyen de corps légers, ou en transportant l'appareil, comme il a été dit ci-dessus.

L'anémomètre de Wolfmann a été perfectionné par M. Combes et par M. Morin. La figure 987 représente l'anémomètre à main de MM. Morin et Bianchi. Cet instrument suffira pour donner une idée de tous les autres. Sur un tambour cylindrique muni d'un manche que l'on tient à la main, se trouve une plaque *p'p* qui porte tout le mécanisme. Cette plaque peut tourner autour de l'axe du tambour, dont on voit une coupe en *P'P*. L'arbre *OO'* du moulinet à ailettes hélicoïdes porte une vis sans fin qui fait marcher la roue à 100 dents *r'* et l'aiguille d'un cadran *c'*, dont chaque division correspond à un tour du moulinet. La roue *r'* mène, au moyen d'une seconde vis sans fin, la roue *r*, dont l'aiguille indique sur le cadran *c* les tours de la roue *r'* ou les centaines de tours du moulinet. Enfin, les tours de la roue *r* sont comptés par la roue à

chevilles *h*, dont une cheville passe devant l'index α à chaque tour de la roue *r*, qui porte 100 dents. Chaque cheville correspond donc à 100 tours de la roue *r* ou à 10000 tours du moulinet. — On commence par orienter l'appareil, dont on voit l'ensemble dans le croquis A, en plaçant convenablement la plaque *p'p* et l'élevant au bout du bras, de manière que l'arbre *OO'* soit dans la direction du

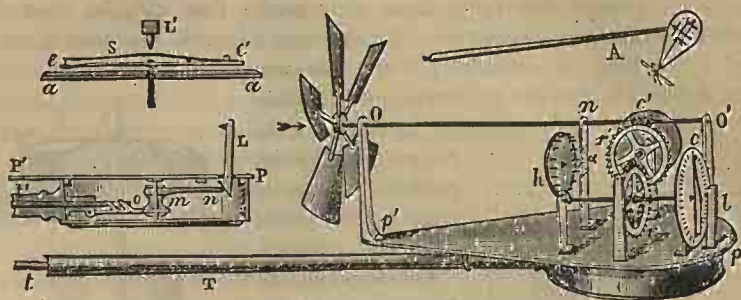


Fig. 986. — 1/3.

vent. Quand le moulinet a pris la vitesse maximum, on pousse un bouton placé à l'extrémité du manche; le levier *L*, *L'*, *l*, est poussé sur l'aiguille du cadran *e*, et un point noir est marqué sur le cadran *e*, comme dans les chronomètres à pointage (I, 785). Le même effet est produit sur l'aiguille du cadran *e'*. On voit en *saa* la disposition des aiguilles *ee'* et de leur ressort *s*. On marque un second point au moment où l'on arrête le chronomètre qui sert à mesurer le temps.

Anémomètre du Dr Robinson. — Cet appareil (fig. 988) est formé de quatre bras horizontaux terminés par des hémisphères creux disposés de manière que l'ouverture de chacun d'eux regarde la partie convexe de celui qui le suit, le système tourne sous l'action du vent, et un compteur donne le nombre de tours. D'après l'inventeur, ce nombre est toujours proportionnel à la vitesse du vent; et, quand les bras sont assez longs pour que le frottement sur l'axe soit insensible, la vitesse de translation des hémisphères est égale au tiers de la vitesse du vent. Si donc *R* est le rayon du cercle décrit par le centre des hémisphères, la vitesse du vent correspondant à *n* tours par minute sera $3 \times 2\pi R \cdot n$.

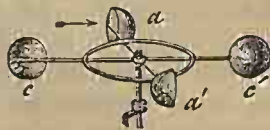


Fig. 988.

1423. Anémomètres enregistreurs. — L'anémomètre est peut-être l'instrument dont il importait le plus d'enregistrer les indications, à cause des variations continuelles du vent. M. Liais a décrit un anémomètre qui donne au bout de la journée les différentes directions des vents successifs, leurs durées et

leurs intensités¹. Cet instrument est analogue à celui de la figure 982; seulement il n'y a qu'un entonnoir, qui reçoit de l'eau venant d'un vase de Mariotte. Pour marquer l'intensité, l'eau de l'entonnoir tombe d'abord dans une auge très-allongée glissant dans une rainure horizontale parallèle à la girouette. Cette auge est liée par un système de leviers articulés, à un anémomètre de pression qui la rapproche de l'axe de la girouette, d'autant plus que le vent est plus fort. Un orifice pratiqué dans l'auge laisse alors tomber l'eau dans les cases de différentes couronnes concentriques. La couronne à laquelle appartient la case qui a reçu l'eau fait connaître l'intensité du vent quand il avait la direction qui correspond à la place de cette case sur la circonférence. La quantité d'eau recueillie apprend pendant combien de temps le vent a soufflé avec cette intensité.

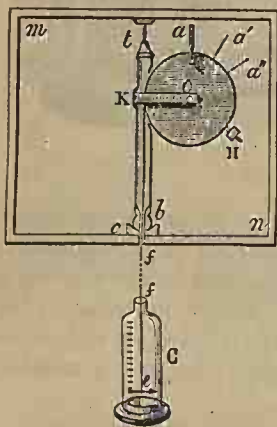


Fig. 989.

extrémité *b*, terminée par une boule d'ivoire, dans une cavité sphérique en porcelaine *c*, dont le fond est percé, ainsi que la boule d'ivoire. La lame de la girouette est circulaire, et peut tourner autour de son centre *o*, qui est traversé par un axe s'appuyant sur deux bras, *Ko*, fixés au tube *tb*. Une palette *a*, poussée par le vent, fait tourner le disque et s'arrête dans différentes positions *a'*, *a''*..., suivant la force du vent. En même temps, une chaîne s'enroule sur le contour du disque et fait monter un fil métallique *ff* qui soutient une aiguille horizontale *e* placée dans le cabinet d'observation. Cette aiguille tournant avec la girouette en fait connaître la direction, et en s'élevant plus ou moins indique la force du vent. Dans l'appareil que Taupenot avait établi au prytanée de La Flèche, le fil *ff* avait 36^m de longueur et n'éprouvait pas de torsion sensible.

Anémographe de

Taupenot.

— Cet appareil enregistre en même temps la direction et la force du vent; sa partie supérieure est représentée dans la figure 989. *Htb* est une girouette tournant dans le châssis fixe *mn*. L'axe de cette girouette est un tube *tb* qui repose par son

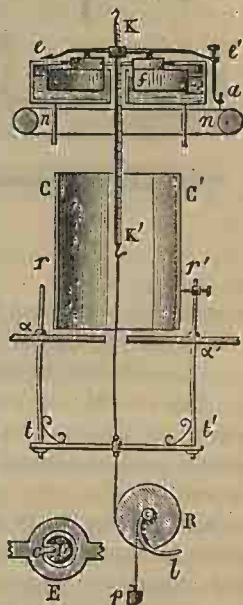


Fig. 990.

¹ Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris, t. XXXIV.

Quand on veut que l'appareil enregistre la direction et la force du vent, on attache à l'extrémité inférieure du fil ff' une baguette cylindrique KK' (fig. 990), qui traverse des ouvertures ménagées dans un flotteur f , et dans le fond d'une caisse pleine d'eau. Une aiguille ee' fixée au flotteur est aussi traversée par la baguette KK' . On voit à part, en E , le milieu de cette aiguille, et en o la section de la baguette. Celle-ci porte une rainure longitudinale dans laquelle s'enfonce un appendice e appartenant à l'aiguille, de manière qu'elle obéisse au mouvement de rotation de la baguette sur elle-même quand la girouette tourne, pendant que cette baguette monte ou descend, suivant la force du vent. La direction du vent est pointée sur une bande de papier nn au moyen d'un crayon $e'a$. Le mouvement d'horlogerie qui fait marcher la bande de papier fait périodiquement abaisser le flotteur, de manière à appuyer la pointe du crayon sur le papier. La force du vent est tracée sur le cylindre vertical CC' , qui tourne régulièrement sur lui-même. Un léger châssis $rtt'r'$, soutenu par un fil qui ne présente pas de résistance sensible à la torsion, monte et descend en même temps que la baguette KK' . Ce châssis est guidé en α, α' , et le crayon r' , légèrement pressé par un ressort, trace sur le cylindre CC' une courbe dont les ordonnées dépendent de la force du vent. Pour rendre les ordonnées proportionnelles à cette force, un fil attaché en K' est enroulé sur un disque R portant un levier courbe l enveloppé par un cordon que tire le contre-poids p . La cour-

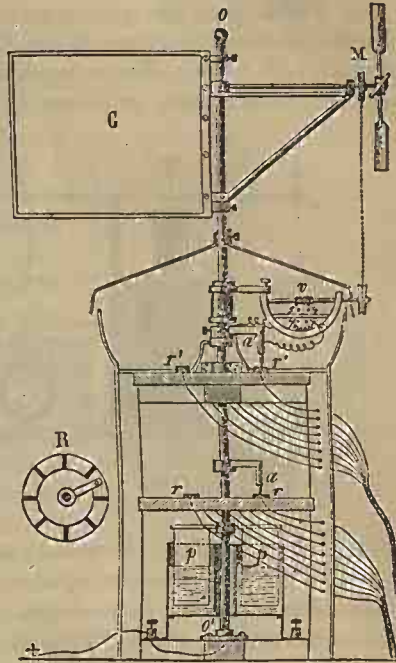


Fig. 991.

bure du levier l est telle que la résistance variable du contre-poids p rend les déplacements angulaires de la lame a (fig. 989) proportionnels à la force du vent. En donnant à la girouette supérieure un diamètre de 40cm , on dispose de 35cm pour les ordonnées, et chaque mètre de vitesse du vent correspond à 1cm . Taupenot a vu l'appareil fonctionner sans se déranger, par les plus violentes tempêtes, et en enregistrer toutes les phases avec une grande fidélité.

On conçoit facilement comment on pourrait enregistrer les positions des crayons r et a au moyen de la photographie.

1421. Anémographes électriques. — L'anémographe électro-magnétique

de M. du Moncel note à chaque instant la direction et la force du vent, et indique en même temps l'heure de chaque observation ¹.

La direction est donnée par une girouette G (fig. 991) dont la tige tournante *oo'* porte des plaques *p, p*, plongées dans l'eau, pour atténuer les oscillations irrégulières. Un frottoir *a*, adapté à la tige, glisse sur une roue *rr*, représentée de face en R, formée de 8 secteurs égaux, isolés les uns des autres et répondant aux 8 principales directions du vent. Les séparations entre les secteurs sont assez petites pour que le frottoir s'appuie toujours sur un d'eux. L'axe de la girouette communique en *o'* avec l'un des fils d'une pile, et chaque secteur est muni d'un fil particulier passant par un électro-aimant E (fig. 992), qui fait appuyer un crayon *c* sur un cylindre C tournant sur lui-même en 12 heures. Les 8 fils des 8 électro-aimants se réunissent ensuite au pôle négatif de la pile. Quand le frottoir touche un secteur de la roue *rr* (fig. 991), l'électro-aimant

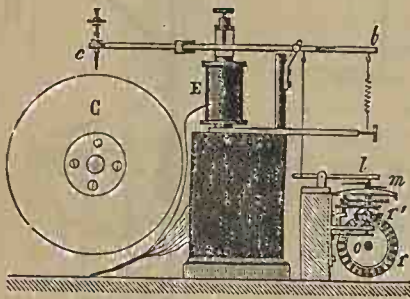


Fig. 992.

correspondant abaisse contre le cylindre, le crayon qui en dépend, et ce crayon trace une courbe qui indique, par sa longueur, le temps pendant lequel le vent est resté dans la direction correspondante, et, par sa position, les heures pendant lesquelles le vent a soufflé dans cette direction.

L'appareil donne aussi le temps total pendant lequel le vent a soufflé à différentes fois dans chaque direction. L'horloge qui fait tourner le cylindre C (fig. 992) fait aussi tourner un arbre horizontal *o* qui porte 8 roues d'angle, *r*, commandant chacune une *minuterie* à deux aiguilles, *m*, semblable à celle des montres, et placée derrière chaque électro-aimant. Le pivot de l'aiguille des minutes est habituellement soulevé par un ressort, de manière à rester indépendant du pignon *r'*; mais quand l'électro-aimant soulève le bras *b*, il agit sur un levier *l*, qui fait descendre le pivot de l'aiguille des minutes, et la minuterie se met en marche. Le nombre d'heures indiqué par le cadran, fait connaître le temps total pendant lequel le bras *b* a été soulevé, et par conséquent le temps pendant lequel le vent a soufflé dans la direction qui correspond à l'électro-aimant E.

Pour enregistrer la force du vent, M. du Moncel fixe derrière la girouette, un moulinet de Woltmann M (fig. 991), qui est ainsi toujours orienté, et transmet son mouvement, par une chaîne sans fin, à une vis sans fin *v* qui fait tourner une roue à 60 dents. La roue porte 4 chevilles servant à fermer 4 fois à chaque tour un circuit dont fait partie un électro-aimant, placé sur le prolongement de

¹ *Exposé des applications de l'électricité*, 2^e édition, t. II, p. 373.

l'axe du cylindre enregistreur C (fig. 992), et qui peut déplacer un crayon dans le sens des arêtes. Ce crayon forme 4 traits pour chaque tour de la roue (fig. 991), ou pour 15 tours du moulinet. Le nombre des traits marqués dans une portion donnée de la circonférence du cylindre, fait connaître le nombre de tours du moulinet pendant le temps correspondant, et, en même temps, les heures où le vent avait la vitesse enregistrée. — L'appareil peut aussi faire connaître la vitesse pendant chaque direction, au moyen d'un frottoir *a* et d'une seconde roue à 8 secteurs *r'r'* (fig. 991) munis de leur fil, et d'un enregistreur particulier, qui n'est pas représenté dans la figure. On voit que l'anémomètre et l'enregistreur peuvent être très-éloignés l'un de l'autre; le premier peut être installé sur un édifice élevé, au sommet d'une montagne. Les 8 fils de communication sont alors réunis en un faisceau dans lequel ils sont isolés les uns des autres.

M. J. Salleron a construit un anémographe perfectionné, dans lequel la *vitesse* du vent est indiquée par le moulinet de Robinson (1422), et la *direction*, par la double roue D, D' (fig. 993) de M. Piazi-Smith (1418). Pour enregistrer cette direction, l'un des coussinets qui soutiennent l'arbre tournant des roues D, D' porte un frottoir qui parcourt 4 secteurs isolés disposés d'une manière analogue à ceux de l'anémographe de M. du Moncel, R (fig. 991), et communiquant avec 4 des électro-aimants annexés à l'enregistreur (fig. 994), dont on voit le cylindre, recouvert de sa feuille de papier, et l'horloge motrice à poids située en avant et à gauche. Chacun des 4 électro-aimants abaisse un style quand le secteur qui lui correspond est touché par le frottoir. Ce frottoir est en forme de fourche, et peut toucher en même temps deux des 4 secteurs. Alors deux des 4 électro-aimants

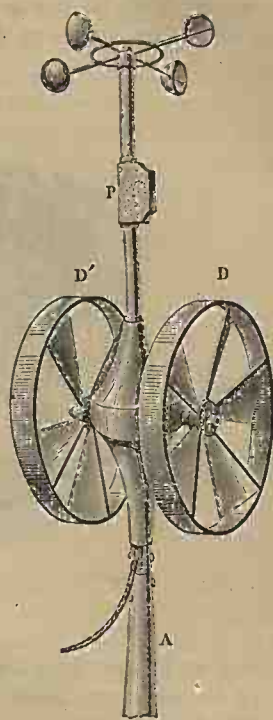


Fig. 993.

fonctionnent en même temps, enregistrant deux directions à la fois, par exemple, Nord et Est, d'où l'on conclut que la direction du vent était Nord-Est. On peut ainsi, avec 4 électro-aimants seulement enregistrer 8 directions différentes. Ajoutons que la pointe du style est en cuivre qui marque, sur la feuille de papier enduite d'une couche de blanc de zinc. De plus, le courant qui anime chaque électro-aimant passe par une lame qui touche le levier portant le style, et par une partie de ce levier. Dès que ce dernier est déplacé par l'électro-aimant, il cesse de toucher la lame, le circuit est rompu et l'électro-aimant n'étant plus

aimanté, le levier s'écarte du cylindre enregistreur par l'effet d'un ressort de rappel. De sorte que le style n'a pu marquer qu'un point. Mais le contact du levier avec la lame s'étant rétabli, le levier s'abaisse de nouveau et un second point est marqué. Au lieu d'une ligne continue, on a donc une série de points.

Pour enregistrer la vitesse, l'arbre du moulinet de Robinson fait marcher, au moyen d'une vis sans fin, un compteur P (fig. 993) portant une roue, armée de goupilles qui ferment le circuit d'une pile, quand elles viennent toucher un léger ressort. Toutes les fois qu'il y a contact, l'avant-dernier électro-aimant à droite (fig. 994), fait marquer un point sur le cylindre enregistreur, et la vitesse est donnée par le nombre de points marqués entre des arêtes équidistantes

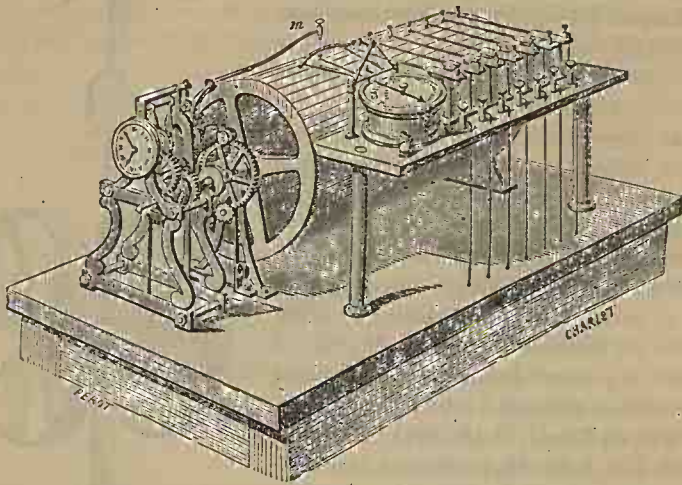


Fig. 994.

tracées sur le papier à des distances répondant aux heures et aux quarts d'heure.

Le dernier électro-aimant à droite sert à enregistrer la pluie, comme nous l'expliquons plus loin.

On voit à gauche de la série des électro-aimants (fig. 994) un baromètre anéroïde dont l'aiguille se prolonge jusque sur le cylindre enregistreur, et est armée d'un style sur lequel l'horloge fait frapper un marteau *m*, toutes les 10 minutes, de manière à enregistrer la pression atmosphérique.

Enregistreur électrochimique. — M. Salleron a simplifié la construction de son anémographe en supprimant les électro-aimants. Sur le cylindre, qui est en métal et communique avec le fil négatif de la pile, est appliquée une feuille de papier imbibée d'une dissolution de *cyanure de potassium*. Sur cette feuille, s'appuient constamment des styles en acier portés par des leviers communiquant chacun avec un des fils qui partent des 4 secteurs sur lesquels glisse le frottoir,

qui est en rapport avec le pôle positif de la pile. Quand le circuit qui correspond à un des leviers est fermé, le courant électrique passe par le style à travers le papier chimique, y décompose le cyanure, et il se produit aux dépens du style, un cyanure de fer qui forme une trace bleue sur le papier, pendant tout le temps du passage de l'électricité.

1.125. CAUSES GÉNÉRALES DU VENT. — L'explication des vents est toute moderne. On supposait dans l'antiquité qu'ils sortaient de l'intérieur de la terre, principalement dans les pays de montagnes, et que certaines cavernes étaient destinées à leur donner une issue. Il y a bien, en effet, des cavernes d'où il s'échappe des courants d'air, mais on sait qu'il n'y a là qu'un effet de *tirage* produit par la différence de niveau de plusieurs ouvertures. C'est à Hadley et Franklin que sont dues les premières notions exactes sur les causes du vent.

Le vent provient le plus souvent de la distribution inégale de la chaleur dans l'air. Considérons une région assez étendue ACB (fig. 995), dans laquelle la surface du sol se trouve dans des conditions différentes; par exemple, en C, elle est dénudée et absorbe fortement les rayons solaires; en A et B, elle est humide, couverte de végétation, ou ombragée par des nuages. L'air qui recouvre la partie C étant échauffé et plus dilaté que celui qui l'entoure, montera et sera remplacé par de l'air qui affluera des régions A et B. Il y aura donc des courants dirigés dans le sens des flèches. En même temps, la colonne d'air dilatée *abnm* s'élevant au-dessus de la limite *mn*

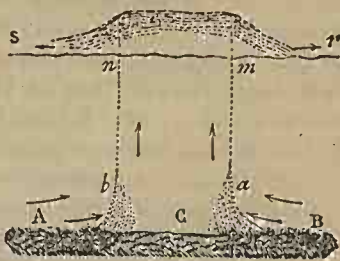


Fig. 995.

des colonnes voisines, se déversera sur elles de chaque côté, dans le sens des flèches *s* et *r*, de manière à engendrer des courants supérieurs qui marcheront en sens contraire des vents de terre *Ab*, *Ba*, et donneront lieu, à une certaine distance, à des courants descendants, pour remplacer l'air de la partie inférieure qui se dirige vers l'espace le plus échauffé.

A l'appui de cette explication, Franklin cite l'expérience suivante : On place une bougie au bas d'une porte ouverte séparant deux chambres ayant des températures différentes; et l'on voit la flamme s'incliner du côté de la chambre la plus chaude. Le contraire a lieu quand on place la bougie tout en haut. Enfin, entre les deux courants opposés ainsi constatés, on trouve une couche d'air en repos, où la flamme ne s'incline ni d'un côté ni de l'autre. — On peut encore échauffer fortement le milieu d'une feuille de tôle; et l'on reconnaît des courants qui se dirigent vers le point échauffé, au moyen de la fumée qui se dégage de la mèche d'une bougie qu'on vient de souffler.

Quant aux circonstances qui modifient la température aux différents points de la surface de la terre, on peut en citer un grand nombre : la présence des eaux,

l'état d'humidité du sol, sa nature, la végétation qui le recouvre, la hauteur au-dessus de la mer, la présence de nuages qui interceptent les rayons solaires dans certaines contrées.... On remarque qu'il suffit du passage d'un nuage au-dessus d'une plaine exposée au soleil pour qu'on observe aussitôt une agitation prononcée dans l'air.

Le vent peut être dû à une autre cause : quand une grande quantité de vapeur se résout en pluie, il se produit une grande diminution de pression, puisque l'eau occupe un volume environ 1700 fois plus petit que celui de la vapeur qui la fournit (1194). L'air des régions voisines se précipite donc pour combler ce vide, en formant un courant souvent violent.

1126. Modes de propagation du vent. — Il résulte des explications qui précèdent, que le vent se manifeste d'abord près de la région où il y a diminution de pression, l'air voisin se portant le premier vers l'espace raréfié, ce qui le raréfie à son tour, et appelle l'air environnant, et ainsi de suite, comme dans la propagation des ondes dilatantes du son (I, 573); de manière que le vent se propage dans un sens opposé à celui dans lequel il souffle. Les vents qui se propagent ainsi se nomment *vents d'aspiration*. C'est Franklin qui, le premier, a signalé la propagation du vent par aspiration; par exemple, il observa un vent de nord-est qui s'éleva à 7^h du soir à Philadelphie, et ce même vent ne commença à se faire sentir qu'à 11^h du soir à Boston, qui est au nord-est de Philadelphie. L'abaissement du baromètre qui accompagne les vents violents est dû en partie à l'état de raréfaction de l'atmosphère.

On nomme *vents d'insufflation* ceux qui se propagent dans le sens même où ils soufflent, leur existence n'est pas moins prouvée que celle des vents d'aspiration. Nous citerons l'ouragan du 29 novembre 1836 qui passa sur Londres à 10^h du matin, à Amsterdam à 10^h et demie, à Hambourg à 6^h et enfin à Stettin à 9^h et demie du soir, se propageant ainsi dans le sens même où il soufflait. Quant à l'origine des vents d'insufflation, nous voyons que les vents de retour dans les régions supérieures de l'atmosphère sont de cette espèce. L'air refroidi sur les flancs des montagnes coule dans les vallées et produit aussi un vent d'insufflation.

Il y a enfin des vents produits par la rencontre de deux courants marchant en sens contraire, et qui forment des tourbillons où l'air est entraîné avec violence dans un mouvement circulaire. Nous les étudierons à part (1435).

II. Des vents réguliers.

1127. Vents périodiques. — Les vents réguliers ne s'observent pendant toute l'année que dans la zone torride. Plus on s'approche des pôles, plus les vents sont irréguliers, à cause des changements plus fréquents et plus étendus de la température. Les vents réguliers se divisent en *périodiques* et *constants*. Les premiers sont principalement les *brises* et les *moussons*.

Brises de terre et de mer. — On désigne sous le nom de *brises*, des vents périodiques qui soufflent chaque jour sur les côtes. Vers 8 heures du matin, le vent commence à souffler de la mer jusqu'à 4 ou 5 heures du soir; c'est la *brise de mer* ou *du matin*; les navires en profitent pour entrer dans le port. De 5 heures du soir au coucher du soleil, il y a un temps de repos après lequel le vent souffle vers la mer; c'est la *brise de terre* ou *du soir*, qui dure jusqu'au lever du soleil; on s'en sert pour sortir du port. Les brises ne se font sentir qu'à une petite distance des côtes; on les observe principalement dans la zone torride. Dans les zones tempérées, elles ne sont sensibles que pendant l'été. Leur direction et leur intensité peuvent être modifiées par des vents accidentels concomitants.

Voici comment on explique les brises : vers 8 heures du matin, le sol commence à s'échauffer, tandis que les eaux de la mer conservent à peu près la même température (1378). Il s'établit donc au-dessus de la terre, une colonne d'air ascendante qui appelle l'air de la mer. Vers 3 ou 4 heures du soir, le sol se refroidit par rayonnement, l'air prend la même température sur terre que sur mer, et il reste en repos. Après le coucher du soleil, l'air qui recouvre la terre continue de se refroidir, et la colonne ascendante se formant sur les eaux, appelle l'air de la côte. On voit que les brises doivent être très-faibles par un temps couvert. Elles sont accompagnées d'un contre-courant dans les parties élevées de l'air, comme on l'a reconnu par le mouvement des nuages. La brise du soir dure plus longtemps que celle du matin, mais elle est plus faible.

Brises des montagnes. — M. Fournet a étudié, dans les montagnes, des brises analogues à celles de terre et de mer, et qui sont surtout remarquables dans les vallées étroites¹. Le soleil, à son lever, chauffe d'abord les sommités; de là, un appel d'air vers la montagne. Plus tard, le soleil pénètre au fond des vallées, qui s'échauffent plus facilement que les sommets élevés, et bientôt l'air le plus froid descend dans les parties basses. Ces vents de montagnes, qui ont reçu différents noms dans diverses localités, ont lieu à peu près aux mêmes heures que les brises de terre et de mer.

1428. Moussons. — On nomme ainsi (de l'arabe Mowsin, saison) des vents périodiques qui règnent principalement dans les mers resserrées ou formant de vastes golfes. Ces vents soufflent, pendant six mois dans un sens, et pendant les six autres en sens opposé. Ils s'expliquent de la même manière que les brises : A partir du mois d'avril, dans notre hémisphère, l'échauffement moyen de la terre est plus grand que celui de la mer; c'est l'époque de la *mousson de printemps* qui souffle vers la terre. La *mousson d'automne* commence en octobre; elle souffle vers la mer qui est alors plus échauffée que la terre. Dans l'hémisphère austral, où les saisons sont inverses, la mousson qui commence en avril souffle vers la côte, et celle qui commence en octobre souffle vers la mer. A l'époque où les moussons changent de direction, il y a, dans certaines mers,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXXIV, p. 337.

un temps de calme plus ou moins prolongé; d'autres fois, le changement se fait brusquement, et il est alors accompagné de coups de vent violents et de tempêtes.

C'est principalement dans la *mer des Indes* que l'on observe les moussons les mieux caractérisées. En hiver, la partie méridionale de l'Afrique est plus échauffée que les Indes; de même, la mer des Indes est plus échauffée que la mer d'Arabie, le golfe de Bengale et la mer de Chine; et l'on observe dans ces mers un courant du *nord-est*, M (fig. 996), qui constitue la *mousson d'automne* et souffle du mois d'octobre au mois de février. Vers l'équinoxe vernal, ce vent cesse et est remplacé par des calmes ou des ouragans. À partir de cette époque, le sol ainsi que la surface de la mer s'échauffent au nord de l'équateur, tandis qu'il y a refroidissement au sud, dans la partie méridionale de l'Afrique. On observe alors la *mousson de printemps* venant du *sud-ouest*, Me, qui pénètre fort

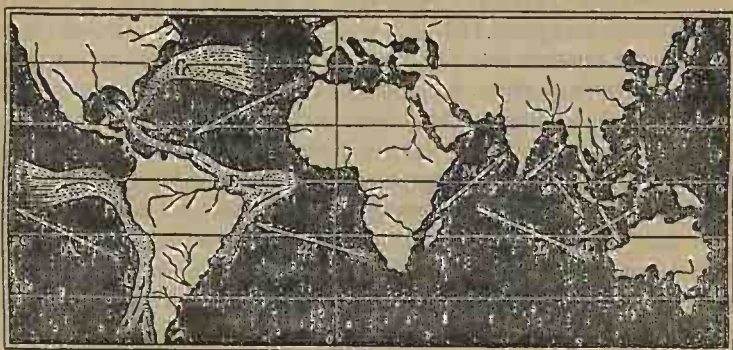


Fig. 996.

avant dans les terres, jusqu'à l'Himalaya et même jusqu'au Japon, ce que M. Dove explique par la diminution de pression qu'éprouve pendant l'été l'atmosphère de l'Asie, diminution qu'il a le premier signalée, en 1842. On observe d'autres moussons dans les bras de mer qui séparent les nombreuses îles de l'Océanie, où leurs directions sont modifiées par la configuration du sol et des côtes. Ces moussons sont marquées, sur la figure 996, par une flèche à deux pointes; l'extrémité marquée *e* indique le sens du vent pendant la saison d'été.

Vents étésiens. — Il y a des moussons dans la Méditerranée: pendant l'été, le vent vient du nord, et, pendant l'hiver, il vient du sud. Ces vents s'observent à Marseille et à Toulon, et se font sentir jusqu'en Grèce et en Italie; aussi étaient-ils connus des anciens, qui les désignaient sous le nom de *vents étésiens*. On les observe encore à Alger et en Égypte. Ces vents sont attribués aux variations de température du sol aride de l'Afrique, principalement du désert de Sahara, qui s'échauffe très-fortement pendant l'été et se refroidit

rapidement pendant l'hiver, tandis que la mer et les côtes méridionales de l'Europe n'éprouvent que des changements de température peu prononcés. Les vents du nord sont, du reste, beaucoup plus forts que ceux du sud, qui leur succèdent; aussi, la moyenne annuelle du temps employé par les navires à voiles pour aller d'Alger à Toulon dépasse-t-elle d'un quart la moyenne du temps employé pour revenir de Toulon à Alger.

1129. Vents alizés. — On nomme ainsi des vents qui soufflent constamment à peu près de l'est à l'ouest dans le voisinage de l'équateur. Ils furent observés pour la première fois par Christophe Colomb, et excitèrent l'épouvante de ses compagnons, qui craignaient de ne pouvoir revenir sur leurs pas. Descartes essayait de les expliquer par le mouvement de la terre, qui laisserait en arrière l'air qui la recouvre. Halley les attribuait à l'action du soleil, qui, échauffant l'air d'orient en occident, le poussait dans cette direction. Il est facile de voir en quoi pèchent ces deux systèmes. On doit à J. Hadley l'explication suivante, généralement adoptée¹.

Supposons d'abord que la surface de la terre soit partout identique; l'atmosphère, entre les tropiques, étant plus échauffée que dans les zones tempérées, l'air dilaté s'élèvera et sera remplacé par de l'air affluant des tropiques, d'où il résulterait, si la terre était en repos, des courants dirigés des pôles vers l'équateur. Mais la terre tourne sur elle-même en entraînant son atmosphère, et ses différents points sont animés de vitesses d'autant plus faibles qu'ils sont plus rapprochés des pôles; par exemple, la vitesse, qui est de 61666 kilomètres par heure à l'équateur, n'est que de 952 kilomètres au 55° degré de latitude. Lors donc que l'air des pôles s'avance vers l'équateur, il se trouve animé d'une vitesse, parallèle à ce cercle, plus petite que celle des points où il parvient; il reste donc en arrière, et il en résulte un courant d'air dirigé en sens inverse du mouvement de la terre, c'est-à-dire un vent du *nord-est* dans notre hémisphère, et du *sud-est* dans l'hémisphère austral. Ces courants, se rencontrant sur l'équateur, se combinent pour former un vent dont la direction générale est de l'est à l'ouest.

Contre-alizés. — Il résulte de cette explication qu'il doit y avoir dans les régions supérieures de l'atmosphère des courants de retour dirigés de l'équateur vers les pôles et de l'ouest à l'est, l'air qui vient de l'équateur arrivant sur les différents parallèles avec des vitesses plus grandes que celles qu'ils possèdent. Cet air doit donc former, dans l'hémisphère austral, un vent de *nord-ouest* au-dessus de l'alizé du *sud-est*; et, dans l'hémisphère nord, un vent du *sud-ouest* au-dessus de l'alizé du *nord-est*. Ces vents supérieurs, que le mouvement des nuages fait reconnaître, s'abaissent, dans l'hémisphère nord, vers le 30° degré de latitude, après s'être refroidis notablement et avoir beaucoup diminué de vitesse; les navigateurs en profitent pour aller d'Amérique en Europe. Ils transportent au loin les cendres lancées à une grande hauteur par

¹ Transactions philosophiques de la Société royale de Londres (1735).

certains volcans. Par exemple, on a vu tomber à la Barbade celles du volcan de l'île de Saint-Vincent, située à l'ouest; en 1853, des cendres du volcan de Cassiquina, dans l'État de Guatimala, sont tombées à la Jamaïque, située à l'est, en telle abondance, que cette ville fut plongée dans l'obscurité pendant plusieurs jours. Sur le pic de Ténériffe, on trouve presque toujours le vent d'ouest, pendant que le vent d'est règne au pied de la montagne. Au printemps et à l'automne, on voit tomber à Lyon, à Malte, à Gènes, au Tyrol, une poussière fine que l'on croyait venir des déserts de l'Afrique; mais Eremberg a reconnu, au microscope, que cette poussière est formée de parcelles organiques, d'infusoires desséchés, dont quelques-uns conservent leurs ovaires frais. Cette poussière provient des vallées de l'Orénoque et de l'Amazone, dont les eaux sont très-basses aux équinoxes de printemps et d'automne. Des tourbillons de vent enlèvent dans les régions supérieures de l'atmosphère, les organismes pulvérolents qui jonchent le fond des marais desséchés, et les livrent au vent supérieur du sud-ouest, qui les transporte jusque sur l'ancien continent, dans l'espace de 30 à 40 jours.

Influence de la conformation des continents. — Les vents alizés ne présentent pas la régularité qui résulterait de la supposition que nous avons faite, que la surface de la terre était uniforme. La distribution des mers, le relief des continents, l'orientation des chaînes de montagnes, en modifient notablement la direction; aussi, ne les observe-t-on bien que dans les mers libres. Voici quelques détails à ce sujet.

Dans l'Océan Atlantique, l'alizé du nord-est, *a* (fig. 996), s'étend du 30° ou 28° degré de latitude nord au 8° degré. Là commence une région calme qui cesse à 3° de latitude nord, où commence l'alizé du sud-est, *a'*, pour s'arrêter à 28° de latitude sud. C'est dans la région calme que se trouve la colonne ascendante d'air chaud qui aspire l'air des tropiques; aussi remarque-t-on que le baromètre s'y tient plus bas que dans les régions latérales. L'étendue de la bande calme dépend de la saison: au mois d'août, elle va de 3°,15 à 13° de latitude nord, et en février de 1°,15 à 6° seulement. On voit que l'alizé du sud-est dépasse la ligne. Suivant Prévost, ce résultat proviendrait de ce que l'hémisphère boréal est moins froid que l'hémisphère austral; mais il ne se reproduit pas dans le Grand-Océan, et il en résulterait que l'alizé du sud-est devrait passer au sud de l'équateur pendant l'hiver de notre hémisphère, puisqu'alors il est plus froid que l'hémisphère austral; ce qui n'a pas lieu. De Humboldt explique la position septentrionale de la bande calme par la configuration du bassin de l'Atlantique: pendant l'hiver, la mer est plus chaude que la terre vers le banc de Terre-Neuve, à cause du *gulf-stream*; ce qui tend à produire un vent du sud au nord, qui, combiné avec le vent d'est, repousse le vent du nord-est vers le nord de l'équateur. De plus, l'Atlantique forme là une large bande dont la direction générale est du sud-est au nord-ouest, ce qui favorise la libre propagation du vent du sud-est et lui donne la prépondérance sur celui du nord-est.

Dans le *Grand-Océan*, l'alizé, A (*fig.* 996), commence à quelque distance de la côte occidentale de l'Amérique, à cause de l'immense relief de la chaîne des Andes, derrière laquelle se trouve une région de calme, fréquemment troublée par des coups de vents et des ouragans. A partir de cette région, le vent d'est se fait sentir jusqu'à la Nouvelle-Hollande et les îles Philippines; il souffle du *nord-est* entre le 2^e et le 25^e degré de latitude boréale, et du *sud-est* entre le 10^e et le 21^e degré de latitude australe. On le retrouve dans l'océan Indien, L, où il porte le nom de *mousson du sud-est*, quoiqu'il règne pendant toute l'année.

Nous avons vu plus haut que le courant supérieur du sud-ouest s'abaisse vers le 30^e degré. Nous ajouterons, d'après Maury et Ch. Dickens, que ce courant rencontre là un autre courant opposé venant du nord-est, et qui concourt, en le heurtant, à le faire descendre vers la terre. Il en résulte une région de calme, connue sous le nom de *bande calme du Cancer*, et dans laquelle le baromètre indique une élévation de pression, comme l'a constaté de Humboldt. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'air qui vient du pôle et s'abaisse dans la bande calme passe à travers cette bande et s'écoule vers l'équateur; là, cet air rencontre un courant semblable, qui vient aussi d'une bande calme de l'hémisphère sud, et il s'élève par l'effet du choc et en même temps de la chaleur de la zone torride. La bande calme de l'équateur est en partie la conséquence de ce conflit entre les alizés du nord-est et du sud-est.

Saigey a fait aux théories des vents alizés, des moussons et des brises, plusieurs objections auxquelles il a été facile de répondre, et a proposé de nouvelles théories, qui soulèvent des difficultés autrement sérieuses que celles qu'il a opposées aux explications que nous avons développées.

III. Vents irréguliers. Tempêtes, cyclones.

1430. Nous avons déjà dit que les vents irréguliers sont d'autant plus fréquents que la latitude est plus élevée. Entre les tropiques, les vents réguliers dominent et gênent la formation des autres; de plus, la surface de la terre y est presque entièrement recouverte par la mer, ce qui est défavorable à la production des vents accidentels. Cependant, on remarque des ouragans fréquents dans les régions des calmes.

Système des vents en Europe. — En prenant la moyenne direction des vents pendant un grand nombre d'années, on peut connaître quels sont ceux qui dominent dans une contrée. Dans la figure 997 sont indiquées, d'après de Gasparin, les directions moyennes des vents dans l'Europe occidentale. On voit que les vents d'ouest dominent dans la partie septentrionale, ce que l'on doit attribuer à l'influence du contre-alizé; et que, dans la partie méridionale, c'est le vent du nord qui domine, ce qui s'explique par l'appel énergétique produit par l'échauffement des plaines sablonneuses de l'Afrique.

A Paris, de 1806 à 1826, les vents ont soufflé le nombre de fois suivant dans les différentes directions :

Nord.....	45	Est.....	23	Sud.....	63	Ouest.....	70
Nord-est...	40	Sud-est....	23	Sud-ouest..	67	Nord-ouest..	34

Ce qui donne pour la direction moyenne, d'après la formule de Lambert (1419), $V = 56^{\circ}, 17$. L'angle V est fait avec la méridienne, dans l'espace compris entre le sud et l'ouest, parce que le numérateur du rapport qui sert à calculer sa tangente est négatif.

Influence des saisons. — Le sol étant plus chaud que la surface de la mer pendant l'été, et moins chaud pendant l'hiver, les vents de mer doivent dominer pendant l'été et les vents de terre pendant l'hiver. C'est, en effet, ce qui a lieu : Franklin avait observé une alternance semblable en Amérique ; en Europe, les vents viennent de l'ouest, surtout pendant l'été.



Fig. 997.

Nous remarquons, enfin, que l'heure de la journée a une influence marquée sur la direction moyenne du vent. Sur les côtes et dans les montagnes, les brises interviennent évidemment dans le résultat. Mais la configuration du sol, l'état de sa surface, la direction des vallées, le voisinage des eaux..., exercent une influence trop variable pour qu'il soit possible de rien énoncer de général à cet égard. Il faut donc étudier à ce point de vue chaque

localité en particulier, pour en pouvoir définir complètement le climat.

On conçoit combien la connaissance de la marche des vents réguliers et celle des vents dominants, ont d'importance pour la navigation et la climatologie. Mais on a été longtemps avant de soupçonner qu'il pouvait y avoir quelque chose de constant dans ces mouvements atmosphériques. Aujourd'hui qu'on a reconnu que l'ensemble des vents est soumis à une marche générale régulière, et que leur *inconstance proverbiale* ne s'applique qu'aux cas les moins fréquents, on s'attache à étudier avec soin leurs directions sur mer et sur terre. Nous avons déjà signalé la carte de l'air de Maury ; M. Lartigue, de son côté, a publié en 1840, sous le titre d'*Exposition du système des vents*, un grand travail sur ce sujet, accompagné d'une carte hydrographique. Il part des deux courants polaires et des vents alizés comme base, et il les désigne sous le nom de *vents primitifs* ; il s'occupe ensuite des vents variables sous les diverses latitudes et en étudie les mouvements généraux et les différentes phases.

1431. Loi de rotation du vent. — Au delà des tropiques, les vents sont

souvent produits par le conflit de plusieurs courants, principalement du vent du *nord-est*, que nous avons signalé dans les régions polaires, et de celui du *sud-est*, qui vient de l'équateur. Il résulte de cette rencontre, des *vents circulaires* ou *tourbillons*, étudiés par M. Dove dès 1827¹, et qui semblent se succéder dans un ordre déterminé, avec le déplacement annuel de la limite de séparation des deux vents. Ces tourbillons, produits par la rencontre du courant polaire et du courant équatorial, se déplacent en général, et dans le sens du mouvement apparent du soleil, et tournent dans l'hémisphère boréal, dans le sens nord, est, sud, ouest; et en sens opposé dans l'autre hémisphère. C'est là ce qui constitue la *loi de rotation* de M. Dove. La girouette, qui se place toujours perpendiculairement au rayon du tourbillon, tourne donc aussi peu à peu, de 180° au plus, dans un temps qui dépend de la vitesse de translation, et qui peut varier de 24^h à plusieurs mois. Pour reconnaître cette loi, il faut un grand nombre d'observations, à cause des nombreuses causes de perturbations qui peuvent la déguiser; comme les vents périodiques, les ouragans, les tourbillons accidentels produits par le conflit de vents, occasionnés par la configuration du sol.

La loi de rotation de M. Dove peut être établie, soit au moyen de preuves indirectes déduites des observations du baromètre et du thermomètre, soit au moyen des anémomètres enregistreurs. On a fait un grand nombre d'observations pour la contrôler. A Liverpool, M. Hartnap a trouvé pour la moyenne de quatre années, de 1852 à 1855, 25,5 rotations complètes *directes*, c'est-à-dire conformes à la loi, et 9 *rétrogrades*. A Greenwich, l'excès moyen des rotations directes a été 13,5, de 1842 à 1854. L'année 1853 a présenté une anomalie, car il y a eu une ou deux rotations rétrogrades de plus que de rotations directes; mais cette même année a présenté aussi d'énormes irrégularités dans la marche des températures. M. Quételet a trouvé à Bruxelles, de 1842 à 1846, pour les excès annuels moyens, 0,8 en hiver, 4,8 au printemps, 7 en été et 1 en automne. A Kharkov, M. Lespschine a trouvé, pour l'excès moyen annuel, le nombre 15. Des observations faites à Bombay, de 1848 à 1851, ont encore confirmé la loi.

1422. Des caractères physiques des vents. — Indépendamment de la vitesse et de la direction, il y a à considérer dans le vent sa température, son état d'humidité, les poussières dont il peut être chargé, etc.

Température. — La température du vent dépend des régions qu'il a traversées. En général, les vents du sud et de mer sont chauds et humides; les vents du nord et de terre sont froids et secs. Quand le vent parcourt un pays humide, il active l'évaporation et se refroidit. La température du vent venant d'une direction donnée varie avec les saisons, qui modifient l'état de la surface du sol. Par exemple, en France, le vent du *sud-est* est sec et plus chaud que le vent du *sud* pendant l'été, parce qu'il traverse les plateaux arides de la Bourgogne, qui s'échauffent fortement; en hiver, il est, au contraire, plus froid que le vent du sud, ces mêmes plateaux étant alors couverts de neige.

¹ Recherches météorologiques, 1837; et Annales de chimie et de phys., 3^e série, t. I, p. 242.

Dans la partie occidentale de l'Europe, la température des divers vents va en croissant quand, en partant du *nord-est*, qui est dans la direction du pôle du froid, on fait le tour de la rose en passant d'abord par le nord. Or, ces vents affectent le baromètre de manière qu'il baisse quand, en partant du nord-est, on parcourt la rose dans le sens que nous venons d'indiquer. On peut donc dire que les vents chauds font baisser le baromètre, et que les vents froids le font monter. La *fig. 976*, qui représente la *rose barométrique* des vents, peut aussi représenter l'inverse de la *rose thermométrique*, en considérant les points de la courbe les plus éloignés du centre comme correspondant aux basses températures, et réciproquement.

La loi qui précède souffre des exceptions locales. Par exemple, le vent du sud, connu sous le nom de *mistral* dans la vallée du Rhône, est très-froid, à cause de son passage dans le voisinage des Alpes, couvertes de neige. En Provence, les vents d'est, qui ont traversé ces montagnes, sont froids, tandis que dans la Lombardie ce sont les vents d'ouest qui sont dans ce cas.

Voici les températures moyennes des divers vents à 3 heures du soir, à Paris, pendant les différentes saisons :

	N	N.E	E	S.E	S	S.O	O	N.O
<i>Hiver</i>	3°,6	4°,2	2°,5	5°,7	8°,3	10°,3	8°,8	6°,0
<i>Printemps</i>	13,7	14,9	17,8	26,6	20,3	18,2	16,8	14,6
<i>Été</i>	27,2	28,1	30,0	32,8	29,5	26,6	26,0	25,8
<i>Automne</i>	14,8	14,3	16,1	19,1	19,4	15,6	16,8	15,7
<i>Année entière</i>	15,2	14,7	23,1	19,1	19,3	18,6	17,0	15,5

1433. Vents chauds des déserts. — On observe dans les déserts de l'Afrique, de l'Arabie, de la Perse, des vents secs et brûlants qui soulèvent le sable et le transportent à de grandes distances. Ces vents, qui ont reçu différents noms, suivant les localités, font baisser le baromètre, dessèchent les plantes, et produisent sur les hommes et les animaux des effets qui s'expliquent par leur haute température et leur grande sécheresse. La respiration est halestante, le gosier enflammé, la soif ardente; les lèvres, les yeux, deviennent secs et douloureux; l'évaporation est fortement activée, et il en résulte sur la peau une irritation suivie souvent de gerçures. Les habitants de certains pays s'enduisent de graisse ou de boue, pour se préserver de ces derniers effets.

Le *simoun*, *samum* ou *scim* (de l'arabe *samum*, vénéneux et chaud), souffle du sud, dans le désert de Sahara. Il apparaît au moment de la plus grande chaleur du jour; le sol sablonneux est fortement échauffé, et l'air dilaté soulève la poussière, même quand il règne encore un calme complet, comme l'a observé M. Pottinger. On aperçoit du côté du sud une tache sombre qui grandit peu à peu; l'atmosphère semble embrasée, et prend une teinte rougeâtre, due au sable soulevé; le soleil, voilé par cette espèce de brouillard, ne produit plus d'ombres. Le vent déplace le sable comme les flots de la mer, en

formant des monticules ayant jusqu'à 7 mètres de hauteur, et dont il modifie à chaque instant la forme. Bien des caravanes, depuis Cambyse¹, ont été englouties dans ces sables mouvants. Les voyageurs surpris par le *simoun* s'enveloppent la tête pour échapper à l'action de la poussière. Cette poussière peut être transportée à travers la Méditerranée jusqu'en Espagne, en Sicile et même en Italie, où le vent qui l'apporte est connu sous le nom de *sirocco*. Cependant, M. Kaemtz fait naître le *sirocco* sur les rochers arides de la Sicile, et le *solano* d'Espagne dans les plaines de l'Andalousie.

L'*harmattan* souffle dans la Guinée, en décembre, janvier et février; il est dirigé vers la mer et généralement peu intense. Il transporte un sable fin et blanc, tellement épais quelquefois, qu'il cache le soleil; et le thermomètre peut monter jusqu'à 40° au soleil, et jusqu'à 29° à l'ombre. Ce vent est tellement sec, que le bois des portes, des meubles, se déforme au point de se briser.

Le *chamzin* est propre à l'Égypte; il souffle à l'époque de l'équinoxe de printemps, et dure 50 jours, comme l'indique son nom.

Il existe des vents chauds, ayant beaucoup d'analogie avec ceux des déserts, dans des plaines couvertes de végétation, comme dans l'Inde, le Chili, la Louisiane, les Llanos de l'Orénoque. On n'a pas encore expliqué d'une manière satisfaisante la formation de ces vents chauds, ni de ceux des plaines arides. Babinet a émis l'opinion qu'ils proviennent de masses d'air poussées des régions supérieures de l'atmosphère dans les couches inférieures. Cet air, très-sec, se dessèche encore en s'échauffant par la compression qu'il éprouve en s'abaissant. Babinet cite comme exemple d'un pareil abaissement une masse d'air qui, descendue des montagnes de Candie vers les plaines de Famagouste, dans l'île de Chypre, dessécha et fit périr tous les végétaux qui se trouvèrent sur son passage. Reste à trouver les causes qui peuvent, dans certains pays, lancer ainsi l'air des régions supérieures de l'atmosphère vers la surface de la terre. Quelques physiciens penchent à donner à cet étrange phénomène une origine électrique.

1434. Ouragans et tornados. — Les ouragans sont des coups de vent qui s'élèvent brusquement et embrassent un espace circonscrit, dans lequel le mouvement de l'air n'a pas une direction unique; ils sont accompagnés de pluie, et souvent de grêle et de tonnerre. Quand le météore occupe un espace peu étendu, on le nomme *tornado*. Ces phénomènes, signalés d'abord par Brandes, ont été étudiés spécialement par M. Espy, auquel on en doit une explication qui a été rectifiée en plusieurs points et complétée depuis par des navigateurs qui les ont observés dans diverses mers. C'est principalement entre les tropiques qu'ils prennent naissance, et dans les mers qui contiennent des groupes d'îles, et où règnent des moussons. Ils sont surtout fréquents aux époques du changement des alizés et des moussons.

¹ Aliquando Cambyses ad Ammonem misit exercitum : quem arena Austro mota, et more nivis incidens, textit, deinde obruit. (SEXEC., *Quest. nat.*, lib. II, cap. 30.)

Voici comment M. Espy les explique. Il constate d'abord, par la direction des arbres renversés au même instant, que, près du sol, le mouvement de l'air, dans le tornado, va de son contour vers une région centrale, circulaire ou ovale, au milieu de laquelle existe un courant ascendant d'air chaud extrêmement rapide, et où le baromètre se tient très-bas. La colonne ascendante tend à se refroidir en s'élevant; mais elle dégage de la chaleur par la condensation de l'humidité qu'elle contient. M. Espy prouve l'existence de cet effet calorifique en raréfiant rapidement l'air dans un vase qu'il nomme *néphéloscope*, et faisant voir que le refroidissement est bien plus prononcé quand l'air est sec que lorsqu'il est humide et laisse condenser sa vapeur. M. Espy explique la colonne ascendante, par l'échauffement de l'air au contact du sol des îles, et par la condensation des vapeurs de l'air très-humide, d'où résulte une sorte de tirage intense. Mais bientôt intervient une autre cause, dé mêlée principalement par M. Keller, dans laquelle le mouvement de la terre joue un rôle. Supposons que le phénomène s'accomplisse entre l'équateur et le tropique, dans l'hémisphère nord. Les masses d'air appelées des régions polaires sont animées d'une vitesse, de l'ouest à l'est, moindre que celle du centre vers lequel elles se dirigent; elles restent donc en arrière, et semblent marcher vers l'ouest. Celles qui viennent des régions équatoriales sont, au contraire, animées de vitesses plus grandes, et portent vers l'est. Ces deux mouvements contraires forment une sorte de couple mécanique qui détermine un mouvement giratoire, d'où résulte un effet centrifuge qui écarte l'air, produit une diminution de pression, et détermine près du sol, un appel d'air convergeant vers le centre du météore. Dans l'hémisphère sud, le mouvement giratoire se fait en sens opposé, comme on devait le prévoir; ce sens est alors celui du mouvement des aiguilles d'une montre. Quand le mouvement de rotation est bien établi, le tornado se développe et se déplace, en se transformant en *cyclone*.

1435. Des cyclones. — Nommés *typhons* dans la mer des Indes, *ouragans* dans les Antilles, ces redoutables phénomènes prennent naissance entre les tropiques à peu près sous la même latitude que le soleil. Un cyclone consiste en un tourbillon horizontal d'air, de 250 à 400 kilomètres de diamètre à son origine, tournant de l'est à l'ouest, par le pôle le plus rapproché, comme les tornados. Vers le centre, où le baromètre est très-bas, règne un calme souvent troublé par des raffales et des renversements brusques de vent. Le maximum de vitesse de rotation, vers le milieu du rayon du circuit, est de 200 à 250 kilomètres à l'heure. Dans l'Atlantique nord, le météore s'éloigne de l'équateur avec une vitesse de 15 à 45 kilomètres par heure, perdant de sa violence en augmentant de diamètre, et décrivant une courbe convexe vers l'ouest, et finit par atteindre les parages de l'Europe. La figure 998 représente la route de *Dar* suivie par un cyclone, en août 1848, dans l'océan Atlantique¹; *cec' e'* est la région des

¹ *Les Mouvements de l'atmosphère et les variations du temps*, par H. Marié Davy (1877), p. 232.

calmes, EE l'équateur, et P la limite supérieure de l'alizé du nord-est. La direction du vent en un point du tourbillon est celle de la résultante des vitesses de rotation et de translation, et dépend du rapport de ces vitesses, et aussi des effets de la force centrifuge. On voit que les vitesses s'ajoutent en *a*, tandis qu'elles se retranchent en *r*, où elles peuvent même se détruire. Aussi, le côté *Mr* est-il appelé *bord maniable*, et le côté *Da*, *bord dangereux*, par les navigateurs, qui doivent faire tous leurs efforts pour s'éloigner de ce dernier, où les deux vitesses superposées peuvent atteindre 250 kilomètres à l'heure. Quand le tourbillon, arrivé vers le 45° degré de latitude, est suffisamment affaibli, le côté *r* opposé à l'équateur peut disparaître, les deux mouvements s'y détruisant. M. Andrau donne une autre cause de cette disparition; il suppose que le plan du cyclone, horizontal à l'équateur, tendant à rester parallèle à lui-même, devient de plus en plus oblique à l'horizon, à mesure qu'il s'approche du pôle, de manière que la partie *r* se trouve bientôt trop élevée pour être observée.

Un cyclone a pour origine un *tornado* qui sort de la région des calmes de l'équateur, où il est ordinairement maintenu par la convergence des alizés. Mais, à l'époque où la nappe d'air ascendante de l'équateur, après s'être avancée vers le pôle nord, commence à rétrograder, il y a trouble dans les alizés, et

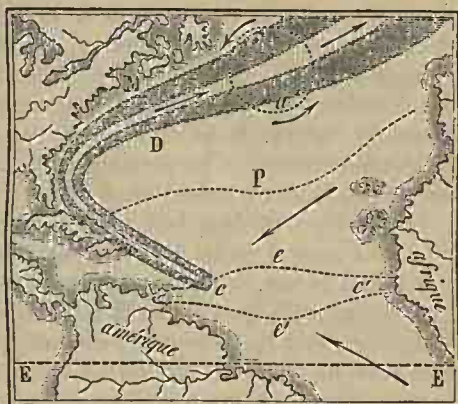


Fig. 998.

le *tornado* peut quitter la région des calmes. Il s'étend alors par l'effet de la force centrifuge, et s'élève assez haut pour être entraîné par le vent de retour de l'alizé. Au centre du tourbillon, le baromètre baisse, comme au centre d'un immense ventilateur, tandis qu'il monte sur le pourtour; et l'on a l'exemple d'un vent qui souffle d'une région où la pression est faible, vers une autre où elle est plus grande. Au centre, il y a aspiration, et l'air s'y précipite des régions supérieures dans toutes les directions, mais surtout aussi des régions inférieures, où la rotation est entravée par la résistance du sol. L'air refroidi par son expansion centrifuge donne lieu, près du pourtour, à une précipitation abondante de vapeur qui obscurcit le ciel et produit des pluies torrentielles accompagnées de tonnerres formidables, et qui se mêle à la pluie d'eau salée enlevée par le vent à la crête de vagues gigantesques. Au centre, le ciel peut être pur, mais la mer y est très-agitée, et son niveau peut s'élever notablement, à cause de la faible pression qui y règne.

La persistance du tourbillon pendant sa marche s'explique par la différence des vitesses dont sont animées parallèlement à l'équateur, par suite du mouvement de la terre, les masses d'air venant du nord et du sud, par rapport à celle du centre du cyclone; et, comme la quantité de gaz, qui afflue surtout par le haut, est plus grande que celle qu'il répand à l'extérieur, à cause de la condensation des vapeurs, la force vive cédée par la partie condensée compense la résistance du frottement. Aussi, M. Peslin, qui a étudié à fond cette question, remarque-t-il que la conservation et le développement du météore sont d'autant plus assurés que l'air affluent est plus humide.

Les effets des cyclones, dans les régions où ils sévissent, dépassent tout ce qu'on peut imaginer. C'est surtout dans les Antilles, les côtes orientales de l'Amérique du Nord, l'océan Indien, les mers de Chine, qu'ils développent toute leur fureur. On a vu des villages rasés, des villes renversées de fond en comble; des débris, emportés avec la vitesse de boulets de canon, percer des murailles épaisses, traverser des troncs d'arbres; de lourds meubles emportés par le vent d'une île dans une autre, à une distance de 80 kilomètres; la mer, poussée par la violence du vent, inonder d'immenses régions, renversant tout sur son passage et transportant des navires à une grande distance sur les terres où elle les abandonne ensuite. C'est par centaines de mille que l'on compte quelquefois les victimes de ces effroyables tempêtes.

Le plus épouvantable cyclone qui ait été observé de mémoire d'homme est celui qui a traversé les îles voisines du delta du Gange, le 31 octobre 1876. A onze heures du soir, rien ne faisait prévoir la tempête, et à minuit 115,000 habitants avaient péri! Trois vagues de 5 à 6 mètres de hauteur, soulevées par le vent, avaient balayé successivement une surface de 80,000 hectares, et noyé les deux tiers au moins des malheureux insulaires, surpris dans leur premier sommeil. Il n'y eut de sauvés que ceux qui purent se réfugier sur des arbres, les habitations n'ayant pu résister à un semblable choc. Là ne s'est pas arrêté le désastre : le choléra, développé par les exhalaisons des cadavres des hommes et des animaux, puis la famine, augmentèrent dans une énorme proportion le nombre des victimes, qui atteignit, d'après les documents les plus modérés, le nombre effrayant de 250,000 hommes!

Généralement, la tourmente passe en deux fois sur une région. Après le premier choc, le calme revient : on est au centre du tourbillon; puis, quelques heures après, vient un nouvel assaut, produit par le passage du second côté.

Les côtes occidentales de l'Europe reçoivent trop souvent la visite de ces terribles météores, heureusement affaiblis par leur extension, mais encore assez destructeurs pour qu'il soit du plus haut intérêt d'en prévoir l'arrivée. C'est ce que l'on sait faire aujourd'hui, comme nous allons le voir. Du reste, les conditions de formation des tornados et des cyclones pouvant se trouver réalisées sur notre continent, certaines tempêtes tournoyantes peuvent y prendre naissance; mais elles sont moins fréquentes et généralement moins violentes que celles qui viennent de l'Atlantique.

1436. Indications du baromètre. — Quand le mercure baisse rapidement, en même temps qu'il fait très-chaud, une tempête est imminente. Quand elle est déclarée, le mercure éprouve des oscillations assez étendues. Du reste, comme l'a remarqué Scoresby, la tempête ne commence que quand le baromètre cesse de baisser. Cet instrument permet donc de prévoir quelque temps à l'avance les tempêtes au lieu où l'on observe. Aussi, les navigateurs doivent-ils consulter fréquemment le baromètre. Krusensten attribue à cette habitude, d'avoir toujours prévu les coups de vent, et Scoresby affirme qu'il pouvait ainsi prédire les tempêtes 17 fois sur 18.

Les mouvements du mercure avant et pendant les tempêtes sont restés pendant longtemps inexplicés. C'est qu'il fallait en chercher la cause à des distances parfois immenses, les mouvements atmosphériques se propageant au loin, plus souvent en ligne courbe qu'en ligne droite, et avec des vitesses très-variables. Pour démêler quelques lois au milieu de ces mouvements compliqués, il fallait réunir un grand nombre d'observations faites simultanément dans toutes les parties du monde, observations qui, isolées, n'ont pas grande signification, mais qui, rapprochées et comparées, s'éclaircissent mutuellement. En procédant ainsi, on pouvait espérer de saisir la marche des grandes perturbations de l'atmosphère. C'est ce qui a été fait, en 1865, à l'Observatoire de Paris, avec un bonheur inespéré¹.

1437. Cartes synoptiques. — Nous avons dit plus haut (1356) comment Lavoisier avait eu l'idée d'un système d'observations simultanées en vue de la prévision du temps. En 1842, Piddington songea à employer le télégraphe de Chappe pour avertir les ports de l'approche des ouragans, et, en 1852, les fondateurs de la Société météorologique de France proposèrent d'utiliser, pour le même objet, le réseau des télégraphes électriques. Mais il n'y avait encore là que des projets, lorsqu'éclata dans la mer Noire, pendant la campagne de Crimée, l'ouragan désastreux du 14 novembre 1854, suivi, peu de temps après,



Fig. 999.

¹ *Les Mouvements de l'atmosphère et les variations du temps*, par H. Marié-Davy (1877).

de coups de vent dans l'Europe occidentale, en Autriche et dans l'Algérie. Le maréchal Vaillant, frappé de cette coïncidence, provoqua une enquête scientifique sur cette série de tempêtes. L'idée, dès lors, était mûre, et Leverrier conçut le projet d'une vaste organisation météorologique, qui fut accueilli avec faveur et mis bientôt à exécution, en février 1855. L'Observatoire de Paris correspond aujourd'hui avec de nombreuses stations réparties sur toute la surface de l'Europe. Les observations, faites à 8 heures du matin, sont transmises à Paris par le télégraphe électrique, généralement avant 11 heures, réduites et publiées dans le *Bulletin international*. Elles sont ensuite pointées sur une *carte synoptique* de la manière suivante : en chaque station, l'état du ciel est indiqué par un petit cercle, noir quand il pleut, blanc quand il fait beau, contenant un point au centre quand le ciel est nuageux, et présentant un contour épais quand il est couvert (*fig. 999*) ; à côté est inscrite la hauteur barométrique, dont on supprime le chiffre 7 pour simplifier. — La direction du vent est indiquée par un trait aboutissant au petit cercle, du côté d'où il vient, et sa force par des pennes dont le nombre varie de 0 à 6. Enfin l'état de la mer est marqué par des points, de 1 à 9, d'autant plus nombreux qu'elle est plus agitée.

On trace ensuite sur la carte des lignes *isobariques*, c'est-à-dire d'*égale hauteur barométrique*, la pression variant de l'une à l'autre de 5^{mm}, à partir de 760^{mm}. La carte, dressée et discutée chaque jour, fait connaître l'état de l'atmosphère en Europe et les changements qui s'y préparent. Un résumé des résultats est envoyé aux ports de mer français et aux chefs des services météorologiques à l'étranger, avec des appréciations sur le temps probable du lendemain. Cette admirable organisation, qui a déjà rendu d'immenses services, était prête dès 1860, et a été appliquée en août 1863.

Pendant ce temps, l'amiral Fitz-Roy, en Angleterre, s'occupait, de son côté, d'un système de prévision du temps, mais sur une échelle beaucoup moins vaste. Peu après le congrès de Bruxelles (1098), il avait affirmé la possibilité de prévoir le temps un ou deux jours à l'avance ; mais il ne fut guère écouté qu'en l'année 1859, pendant laquelle il porta la question devant l'Association britannique, à Aberdeen. Enfin, en février 1861, il organisa l'envoi des avis télégraphiques aux ports, avis qui furent si bien appréciés, qu'une grande Compagnie d'assurances maritimes vit le nombre de ses affaires diminuer dans une très-grande proportion.

1438. Origine des tempêtes d'Europe. — M. Marié-Davy avait à peine construit quelques-unes de ses cartes synoptiques, qu'il fut frappé de la marche des tempêtes de l'Océan vers nos côtes, et de la forme des courbes d'égalité de pression, qui sont alors fermées et s'enveloppent mutuellement (*fig. 999*). Il remarqua aussi que les premiers symptômes d'une tempête se manifestent, sur les côtes occidentales de l'Europe, par des inflexions de ces courbes, dont la concavité est tournée vers l'ouest ; puis le vent monte sur les côtes nord-ouest de France et d'Angleterre, en présentant une tendance marquée à tourner

autour d'un centre de dépression, dont la position est nettement indiquée par les courbes, et qui forme le centre de la tempête.

M. Marié-Davy a reconnu dès lors que ces tempêtes viennent des régions intertropicales, et ne sont, le plus souvent, que des *cyclones* propagés jusqu'aux parages de l'Europe. Leverrier a alors invoqué le concours des navigateurs, dont les nombreuses observations faites en mer ont confirmé l'opinion de M. Marié-Davy, et ont montré de plus que c'est principalement sur le *gulf-stream* (1401) que les tempêtes prennent naissance, sous forme de *tornados* et de *cyclones*.

Une fois en possession de cette remarquable découverte, on a organisé un service d'avertissements aux ports. Les cartes synoptiques (1437) construites chaque jour permettent de déduire de la forme des courbes isobariques la présence de centres de dépression qui annoncent l'existence des tourbillons s'avancant vers les côtes occidentales de l'Europe. Le télégraphe électrique donne ensuite le moyen d'avertir les ports plusieurs heures d'avance de l'arrivée de la tempête, de manière qu'on puisse prendre toutes les mesures nécessaires pour en recevoir le choc dans les conditions les moins mauvaises. Le télégraphe transatlantique permet aussi de recevoir des côtes de l'Amérique, et souvent plusieurs jours à l'avance, la nouvelle de la formation de cyclones et des indications précieuses sur leur intensité, la rapidité de leur marche et leur direction. L'organisation de ces avis aux ports a déjà prévenu d'innombrables sinistres maritimes et préservé des milliers d'existences. Des avertissements aux campagnes, organisés plus récemment, rendent aussi d'immenses services à l'agriculture, en permettant aux cultivateurs de prendre toutes les mesures nécessaires pour se préserver des effets du météore annoncé.

Nous reviendrons plus loin sur les moyens de prévoir les tempêtes, quand nous nous occuperons des pronostics.

§ 4. — MÉTÉORES AQUEUX OU HYDROMÉTÉORES.

I. Hygrométrie.

1439. Définitions. — On désigne sous le nom d'*hydrométéores* ou de *météores aqueux* les phénomènes atmosphériques produits par la vapeur d'eau que contient l'atmosphère, comme la rosée, la pluie, la neige... Nous allons d'abord étudier et apprendre à évaluer l'humidité de l'air. La partie de la science qui a cette étude pour objet est l'*hygrométrie*.

1440. Humidité de l'air. — Corps hygrométriques. — Il y a toujours de la vapeur d'eau dans l'air. Pour le prouver, il suffit de remplir un vase de glace ou d'un mélange réfrigérant : on voit bientôt des gouttelettes d'eau, ou une mince couche de glace provenant de la vapeur que contient l'air, se déposer sur les parois extérieures de ce vase.

L'humidité de l'air a une grande influence sur les êtres vivants, végétaux et animaux, qui souffriraient dans un air trop sec. Quand l'air est trop humide, au contraire, il conduit assez bien la chaleur; et, s'il fait froid, il l'enlève rapidement aux hommes et aux animaux, tandis que, s'il est très-chaud, il leur cède beaucoup de chaleur, dont l'effet n'est pas atténué par l'évaporation cutanée. Aussi les pays humides, froids et surtout chauds, comme la partie méridionale de l'Asie, l'île de Zanzibar, sont-ils dangereux à habiter.

Les corps organisés privés de vie éprouvent aussi les effets de l'humidité : le bois, l'ivoire, la corne, les poils des animaux, la soie, les fibres textiles des végétaux, s'allongent par l'humidité. Les cordes, composées de filaments tordus qui se gonflent par l'humidité, augmentent de diamètre et se raccourcissent, mais de manière que le volume soit augmenté. En même temps, l'humidité diminue la torsion, les fibres gonflées faisant effort sur les spires pour les écarter. La toile, composée de fils tors entrecroisés, se rétrécit par l'humidité, tandis que le papier s'étend, parce qu'il est formé de filaments mêlés dans tous les sens et n'ayant pas subi de torsion.

Il y a des corps inorganiques qui absorbent l'humidité; tels sont la potasse, la soude, la chaux et un certain nombre de sels. Quand un corps condense assez d'humidité pour paraître mouillé, on dit qu'il est *déliquescent*. Le sel marin est déliquescent quand l'air est notablement humide; il se dessèche, au contraire, quand l'air ne contient que peu de vapeur. Les acides sulfurique et phosphorique absorbent fortement l'humidité de l'air, et sont souvent employés pour le dessécher. Les gaz qui fument à l'air, comme l'acide chlorhydrique, ont une grande affinité pour l'eau, et précipitent à l'état liquide celle que contient l'atmosphère. L'acide fluoborique est tellement avide d'eau, qu'il suffit d'une bulle de ce gaz pour reconnaître les plus faibles traces d'humidité dans l'air, par le trouble qui se produit instantanément.

D'autres corps précipitent l'humidité à leur surface, par un effet de cohésion; le verre est surtout dans ce cas, et un ballon de verre change de poids quand l'état d'humidité de l'air varie. Beaucoup de substances réduites en poudre fine dessèchent l'air, à cause de la grande étendue de la surface qu'elles présentent. On appelle *hygrométriques* les substances qui absorbent l'humidité de l'air. Ainsi, les substances organiques, le verre, sont hygrométriques; les métaux ne le sont pas.

1411. Applications. — L'augmentation de volume des substances organiques par l'humidité se fait avec une grande énergie. Pour détacher des blocs de pierre, dans les carrières, on creuse un sillon assez profond, dans lequel on enfonce des coins de bois, que l'on humecte ensuite; le bois se gonfle avec tant de force, que le bloc se sépare. On emploie ce procédé dans l'exploitation des pierres meulières. Le raccourcissement des cordes par l'humidité sert aussi à soulever des masses énormes; il suffit de tendre, puis de mouiller une corde attachée d'une part à la masse, et d'autre part à un obstacle fixe. Cette méthode a été appliquée à Venise, vers l'an 1200, pour dresser les deux colonnes de

granit de la place Saint-Marc. Quatre cents ans après, on en a encore fait usage pour l'érection de l'obélisque de Sixte-Quint, à Rome ; ce n'est qu'après que l'appareil eut été reconnu insuffisant qu'on s'avisa de mouiller les cordes. C'est l'humidité qui, en gonflant le bois, ferme hermétiquement les joints des barriques pleines ; elle peut aussi, en déplaçant les molécules, détruire l'effet de la compression sur certaines substances organiques, de même que la chaleur détruit l'écroutissage des métaux. Par exemple, on imprime en creux par compression, dans une pièce de bois, les détails d'un bas-relief en métal très-dur, puis on enlève au rabot tout ce qui dépasse le fond de l'empreinte, et l'on expose la pièce à l'action d'un air chaud et humide ; on voit alors les parties refoulées se relever en bosse proportionnellement à la compression qu'elles avaient subie.

1-112. De l'état hygrométrique. — L'état d'humidité ou l'état hygrométrique ne consiste pas dans la quantité absolue de vapeur contenue dans un certain volume d'air, mais il dépend de la distance à laquelle cet air se trouve de l'état de saturation. Or nous avons vu qu'il faut d'autant plus de vapeur pour saturer un gaz que sa température est plus élevée. L'air peut donc être très-humide avec peu de vapeur, s'il est froid ; et très-sec avec une plus grande quantité, s'il est chaud. Quand un poêle chauffe rapidement l'air d'une chambre, la quantité de vapeur contenue restant la même, l'air s'éloigne du point de saturation et peut incommoder, si l'on n'a soin de mettre sur le poêle un vase plein d'eau, destiné à fournir de la vapeur.

On définit l'état hygrométrique de l'air, le rapport entre la quantité de vapeur qu'il contient et celle qu'il contiendrait s'il était saturé à la même température. Ordinairement, on se sert de la force élastique de la vapeur pour représenter les deux termes de ce rapport. Les forces élastiques étant sensiblement proportionnelles aux densités (1191). On a imaginé une foule de moyens d'apprécier l'état hygrométrique ; les instruments qui servent à cet usage portent le nom d'*hygromètres*. Beaucoup ne méritent que le nom d'*hygroscopes*, car ils ne donnent pas l'état hygrométrique, et montrent seulement dans quel sens l'humidité varie.

1-113. Hygroscopes divers. — Le premier qui ait essayé d'apprécier l'humidité de l'air paraît être le cardinal Cusa, au quinzième siècle. Il prenait le poids d'un flocon de laine, poids qui augmentait avec le degré d'humidité. Plus tard, Lana pesait du salpêtre calciné, et Kirker un épi de blé. Les académiciens de Florence recueillaient l'eau condensée par un vase conique rempli de glace. Fontana pesait un plateau de verre à 0°, sec, puis chargé de l'humidité qu'il avait attirée. On s'est servi ensuite de l'allongement des substances organiques. Boyle, Goad, observaient les longueurs successives d'une corde chargée d'un poids. Don Casbois remplaçait la corde par des boyaux de ver à soie collés les uns au bout des autres. On a aussi employé des bandes de bois perpendiculaires aux fibres, dont on amplifiait l'allongement par divers artifices. Mersenne jugeait de l'état d'humidité par le son que rendait une corde tendue : plus le son était aigu, plus l'air était humide.

Deluc a construit un hygroscope fait comme un thermomètre à mercure; seulement, le réservoir est en ivoire, et s'étend par l'humidité. Chiminello formait ce réservoir d'un tuyau de plume, et D. Wilson, d'une vessie de rat. Ces instruments sont évidemment influencés par les variations de température.

On a imaginé beaucoup d'*hygrosopes par torsion* : une corde à boyau, fixée par l'une de ses extrémités, porte à l'autre une aiguille, qui tourne par l'humidité dans le sens qui correspond à une diminution de torsion. On remplace quelquefois la corde à boyau par un de ces filets aigus que porte l'enveloppe du grain de l'avoine. On a donné aux hygrosopes par torsion une foule de formes différentes. Leupold suspend à la corde verticale un plateau de bois, dont une moitié se trouve dans l'intérieur d'une maisonnette. Aux extrémités d'un même diamètre sont deux petites statuettes, dont une sort quand l'air est humide, pendant que l'autre rentre; le mouvement inverse se produisant quand l'air est sec. La figure 1000 représente une disposition devenue populaire. Un personnage découpé dans une tablette de bois porte un capuchon *n* formé d'un morceau de papier réplié comme on le voit en *n'*, et fixé à l'extrémité d'une corde à boyau, dont l'autre bout tient en *c* à un tube porté par la tablette *a*. Ce tube est percé de trous pour que l'air puisse y circuler. Quand l'humidité augmente, la corde à boyau, en se détordant, ramène le capuchon sur la tête du personnage. — Les hygrosopes de torsion sont principalement employés à pronostiquer les changements de temps; quand l'air est très-humide, il est probable qu'il pleuvra, et, quand il est sec, on peut s'attendre au beau temps.

Il existe d'autres espèces d'hygrosopes; presque tous se ramènent à l'un de ceux que nous venons de citer. Du sel marin dans une balance constitue un hygroscope, son poids variant avec la quantité d'eau qu'il absorbe. — Le *chlorure de cobalt* est dans le même cas; mais, en même temps, comme l'a remarqué Herbelot en 1737, il change de couleur par l'humidité. Bleu quand il est sec, il passe peu à peu au rose, à mesure qu'il est plus humide. Vers 1792, on vendait des écrans, éventails, fleurs, faits de tissu fin imprégné d'une dissolution de ce sel, et ces objets prenaient différentes couleurs, suivant que l'air était plus ou moins humide. Récemment, on a remis à la mode ce procédé hygroskopique, appliqué à divers objets et notamment à des fleurs artificielles désignées sous le nom impropre de *fleurs baromètres*.

Nous allons nous occuper des méthodes qui donnent l'état *hygrométrique*; elles peuvent se rapporter à cinq principales : 1^o méthodes par absorption de la vapeur par des substances chimiques; 2^o méthodes par allongement de corps organisés; 3^o méthodes par l'évaluation de la température à laquelle se dépose la vapeur atmosphérique; 4^o par mesure de la tension de la vapeur; 5^o par le refroidissement qu'éprouve un thermomètre mouillé.

1111. Méthode chimique. — Cette méthode, due à Brunner, est rigoureuse et peut servir à contrôler les autres. Voici comment opère M. Regnault¹.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XV, p. 150 et 163.

L'air dont on veut déterminer l'état hygrométrique est attiré avec une vitesse uniforme dans un vase aspirateur V (fig. 1001), dans lequel il arrive par le robinet *r* et le tube *t*. Le vase aspirateur a été jaugeé avec soin par des pesées, à une température connue. Avant d'arriver en *r*, l'air extérieur traverse des tubes A et B remplis de ponce sulfurique, où il dépose toute sa vapeur. Un troisième tube C est destiné à arrêter l'humidité qui pourrait venir du vase aspirateur. Les tubes A, B doivent être placés tout près de l'orifice extérieur par lequel entre l'air. Un thermomètre très-sensible, que l'on consulte de loin, de 5 minutes en 5 minutes, est suspendu près de cet orifice.

Quand le vase aspirateur est plein d'air, on sépare les tubes A et B, et on les pèse; l'excès de leur poids actuel sur celui qu'ils avaient avant l'expérience fait connaître le poids de la vapeur que contient un volume d'air égal à la capacité de l'aspirateur. Les tubes A B ont de petites dimensions, afin qu'on puisse négliger le poids de l'humidité déposée à leur surface extérieure et leur perte de poids dans l'air. M. Regnault s'est assuré qu'ils arrêtent toute l'humidité de l'air qui les traverse; car, ayant fait passer dans des tubes en U remplis d'éponges mouillées de l'air sec qui traversait ensuite les tubes A et B, il reconnut que l'augmentation de poids du tube A seul représentait exactement la perte des tubes à éponges.



Fig. 1000.

Quand on connaît le poids *P* de la vapeur contenue dans un volume d'air, il faut en déduire la force élastique *f* de cette vapeur, pour la diviser ensuite par la tension maximum à la même température, et en déduire l'état hygrométrique. La force *f* se calcule en égalant au poids *P*, l'expression

$$V(1 + kt) \frac{H - f'}{H - f} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t'} \cdot p \approx \frac{f}{760} \cdot$$

trouvée ci-dessus (1192).

Aspirateur double. — Pour faire passer un grand volume d'air dans les tubes A, B, C, au moyen d'un appareil aspirateur de capacité restreinte, on emploie l'aspirateur double de M. Brunner, représenté (fig. 1001) tel qu'il a été perfectionné par M. Boisgiraud. Deux vases de verre de même capacité *V*, *V'*, communiquant par le canal *cc*, peuvent basculer autour de l'arbre fixe *oo*, en tournant avec les manchons *n*, *n'* ajustés à frottement doux sur cet arbre. Dans la position de la figure, l'eau tombe du vase *V* dans le vase *V'*, et l'air arrivant en *r* est aspiré dans le vase *V*, par le tube *t* et le canal *or* pratiqué dans l'arbre fixe. L'air du vase *V'* s'échappe en même temps par le canal *o'r'*. Quand le vase *V* est vide et le vase *V'* plein, on ferme un robinet que porte le tube *cc*,

et l'on renverse l'appareil de manière à mettre le vase V en bas; ouvrant ensuite le robinet du canal *cc*, l'aspiration se fait dans le vase supérieur, et l'air du vase inférieur s'échappe en *r'*.

1.115. HYGROMÈTRES D'ABSORPTION. — La méthode chimique fait connaître l'état hygrométrique avec une grande exactitude, mais elle ne donne que l'état moyen de l'air pendant la durée de l'expérience, et elle exige une manipulation longue et minutieuse. On a donc cherché à construire des hygromètres capables de donner l'état d'humidité par une simple lecture.

Hygromètre à cheveu. — Cet instrument, connu sous le nom d'*hygromètre de Saussure* (fig. 1002), se compose d'un cadre métallique dont on néglige les

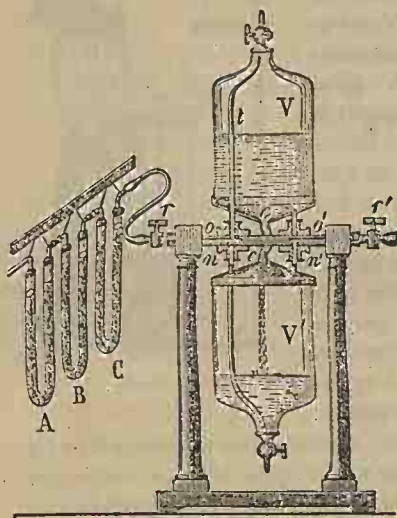


Fig. 1001.

dilatations, à la partie supérieure duquel est attaché un cheveu *ce'* qui s'enroule par son extrémité inférieure autour d'une poulie très-mobile. Un cordon, enroulé en sens contraire et chargé d'un léger poids *p*, tient le cheveu toujours tendu. A l'axe de la poulie est fixée, par son centre de gravité, une aiguille dont l'extrémité parcourt un arc divisé. *l* est une pince qui sert à soutenir le poids *p* et à arrêter la poulie quand on

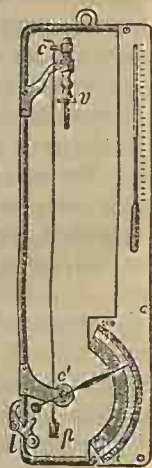


Fig. 1002.

transporte l'instrument, et *v* une vis destinée à donner au point d'attache *c* du cheveu la position convenable. Quand l'humidité augmente, le cheveu s'allonge et l'aiguille monte. Le contraire a lieu quand l'air se dessèche.

Le cheveu doit être fin, doux au toucher et pris sur une tête vivante et saine. Cependant, on a fait des hygromètres qui marchaient bien, avec des cheveux de momies égyptiennes. Le cheveu doit être dégraissé; Saussure le faisait bouillir dans un petit sac de toile plongé dans de l'eau contenant 10 grammes de carbonate de soude par litre, puis il le plongeait dans l'eau bouillante pure, et enfin le lavait à l'eau froide. M. Regnault préfère laisser séjourner les cheveux dans l'éther, pendant 24 heures.

Pour graduer l'hygromètre à cheveu, on détermine deux points fixes, qui sont celui de la saturation et celui de la sécheresse extrême. Pour le premier

point, on place l'instrument sous une cloche mouillée reposant sur l'eau, et l'on marque l'endroit où s'arrête l'aiguille. Pour le point de sécheresse absolue, on place l'hygromètre sous une cloche sèche dans laquelle il y a du chlorure de calcium ou de la chaux vive. M. Regnault préfère introduire l'instrument dans une éprouvette à pied contenant une couche d'acide sulfurique concentré, et dont il ferme l'ouverture au moyen d'une plaque de verre rodée et enduite de suif; la dessiccation est plus prompte et plus complète. On divise ensuite l'intervalle entre les points fixes en 100 parties égales, qui sont les *degrés de l'hygromètre*; on place le zéro au point de sécheresse absolue.

Babinet a donné à l'hygromètre à cheveu une forme différente : le cheveu est suspendu verticalement à une vis micrométrique *v* (fig. 1003), et tendu par un léger poids. Un nœud *o* est visé au moyen d'une lunette fixe à réticule *l*. En amenant constamment le nœud *o* au centre du réticule, on reconnaît, au moyen de la vis micrométrique, les variations de longueur que le cheveu a éprouvées, en partant de la longueur qu'il possède quand il est desséché.

M. G. Sire a aussi apporté à l'hygromètre à cheveu diverses modifications, qui le rendent plus solide et préservent le cheveu des principales causes d'altération¹.

Deluc avait imaginé un hygromètre analogue à celui de Saussure; seulement, le cheveu était remplacé par un mince ruban de fanon de baleine perpendiculaire aux fibres, et il marquait le point d'humidité extrême en plongeant l'instrument dans l'eau, ce qui est défectueux.

1416. Tables hygrométriques. — L'hygromètre à cheveu donne sensiblement les mêmes indications quand l'état hygrométrique est le même, quelle que soit la température. La dilatation du cheveu par la chaleur est négligeable, et contrebalancée par celle du cadre métallique, si bien que 33° de température ne font varier l'hygromètre que d'une fraction de ses degrés. Mais ces degrés ne sont pas comparables entre eux, c'est-à-dire que les différents états d'humidité de l'air ne sont pas proportionnels aux nombres de degrés indiqués par l'instrument. Par exemple, l'état hygrométrique étant 0,1; 0,5; 0,9 et 1, l'instrument marque 20°, 72°, 95°, 100°. On construit donc des tables donnant les états hygrométriques qui correspondent aux divers degrés de l'instrument. Les premiers essais ont été faits par de Saussure.

Méthode de Dulong. — L'hygromètre est renfermé dans un vase où l'on fait circuler un mélange d'air sec et d'hydrogène saturé d'humidité. Les deux gaz arrivent avec des vitesses constantes dans un même tube où ils se mélangent avant de se rendre dans le vase. Quand l'air contenu dans ce vase a été entièrement remplacé par le mélange, on observe le nombre de degrés qu'indique



Fig. 1003.

¹ *La Nature, revue des sciences*, juillet 1874.

l'hygromètre. Si l'on appelle h et a les volumes d'air et d'hydrogène contenus dans un volume $h + a$ du mélange, h représentera le volume qu'occupe la vapeur à saturation dans l'hydrogène, et $h + a$ celui qu'elle occupe dans le mélange. Si nous représentons par d la densité de la vapeur dans l'hydrogène, cette densité sera $d \frac{h}{a + h}$ dans le volume $a + h$, et l'état hygrométrique

sera $\frac{h}{a + h}$; car les masses de vapeur contenues dans un même volume sont entre elles comme les densités. En faisant varier la vitesse relative d'écoulement des gaz, on aura différents états hygrométriques, et l'on pourra calculer une table.

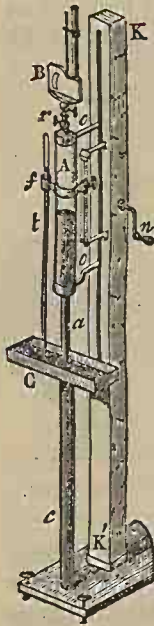


Fig. 1004.

Pour obtenir les quantités h et a , on recueille sur l'eau une partie V du mélange, et l'on en fait l'analyse chimique par la méthode de l'eudiomètre. On détermine ainsi le volume H d'hydrogène que contient le volume V . Le volume d'air A est alors égal à $V - H$; mais ce volume est saturé d'humidité dans l'eudiomètre, tandis qu'il est sec dans le mélange; il y a donc une correction à faire. Soit P la pression du gaz dans l'eudiomètre, et f la force élastique maximum de la vapeur à la température de l'expérience; $P - f$ sera la pression de l'air seul, et $(V - H) \frac{P - f}{P}$, son volume à l'état sec. On aura alors $h : a = H : (V - H) \frac{P - f}{P}$, d'où l'on tirera le rapport $h : (a + h)$, qui représente l'état hygrométrique.

Méthode de Gay-Lussac. — Le travail de Dulong était fort avancé, quand Gay-Lussac annonça les résultats qu'il avait obtenus par une méthode plus simple, mais moins expéditive. Cette méthode est fondée sur ce principe, que la tension maximum de la vapeur produite par une dissolution saline est d'autant plus petite que cette dissolution contient plus de sel; la tendance du liquide à s'évaporer étant contrebalancée par son affinité pour le sel, en même temps que par la pression de la vapeur formée. L'hygromètre est suspendu au couvercle d'un vase de verre au fond duquel se trouve une couche de la dissolution saline. Ce couvercle est luté avec soin. Quand l'aiguille est stationnaire, on note la division à laquelle elle s'arrête. En même temps, une petite partie de la dissolution est introduite dans le vide d'un baromètre à la même température que le vase, et l'on mesure la tension de sa vapeur. On divise ensuite cette tension par la tension maximum donnée par l'eau pure à la même température, et l'on a ainsi l'état hygrométrique correspondant au nombre de degrés indiqué par l'hygromètre. En opérant successivement avec des dissolutions diversement

concentrées, Gay-Lussac a obtenu 10 termes de la table cherchée, et Biot a trouvé les termes intermédiaires, par interpolation ¹.

Méthode de Melloni. — Dans cette méthode, on place l'hygromètre dans un espace B (*fig.* 1004), privé d'air et saturé de vapeur, dont on fait ensuite varier le volume, afin de diminuer la tension de la vapeur ². Aa est un long tube barométrique très-large dans sa moitié supérieure A, et fermé en r par une virole de fer munie d'un robinet. Au robinet r est ajustée une boîte de métal B hermétiquement fermée, et munie d'une fenêtre vitrée, dans laquelle est renfermé l'hygromètre. Le tube Aa plongé dans une cuvette profonde Cc, est fixé par les barres o, o à une crémaillère glissant dans un support KK' quand on agit sur la manivelle m; de manière qu'on peut enfoncer plus ou moins ce tube.

Après avoir déposé quelques gouttes d'eau sur le cadran divisé de l'hygromètre, on fait le vide et on laisse rentrer l'air plusieurs fois dans la boîte B jusqu'à ce que les gouttes d'eau aient disparu, et l'on a ainsi un espace saturé de vapeur et privé totalement d'air. On visse ensuite la boîte, au robinet r, après avoir rempli le tube Aa de mercure et l'avoir enfoncé de manière que ce liquide le remplisse entièrement; puis, on ouvre le robinet r. La différence entre le niveau du mercure dans le tube Aa, et dans un baromètre t placé à côté dans la même cuvette, donne la force élastique de la vapeur dans la boîte qui contient l'hygromètre. En élevant plus ou moins le tube Aa, on fait varier la tension de la vapeur, et en consultant en même temps l'hygromètre, on obtient assez rapidement les éléments d'une table.

1-117. Expériences de M. Regnault ³. — M. Regnault en comparant les indications d'un grand nombre d'hygromètres à cheveu, a reconnu que, si les instruments construits avec des cheveux identiques et dégraissés ensemble sont sensiblement d'accord, il n'en est pas de même, le plus souvent, pour ceux qui sont construits avec des cheveux différents, ou préparés différemment ou enfin tendus par des poids différents; ceux-là peuvent être en désaccord de 5°. Il faut donc construire une table pour chaque instrument, et pour un même instrument, quand on en change le cheveu. C'est pourquoi nous ne donnons pas ici de tables hygrométriques.

M. Regnault a simplifié la construction de ces tables par deux moyens différents, dont le premier est un perfectionnement de la méthode de Gay-Lussac. On prépare d'abord des mélanges d'acide sulfurique contenant 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 18 parties d'eau, pour une d'acide anhydre, mélanges pour lesquels M. Regnault a construit des tables donnant les tensions maximum des vapeurs, entre 0° et 50°, par le procédé du n° 971 (*fig.* 707), et au moyen de la formule d'interpolation $f = a_2 + a_1 b'$, dont il déterminait les trois constantes, pour chaque dissolution.

¹ *Traité de physique*, par J.-B. Biot, t. II, p. 199.

² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XLIII, p. 39.

³ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XV, p. 164.

Pour graduer l'hygromètre, on marque d'abord le point d'humidité extrême; le point de sécheresse extrême est rejeté comme inutile, et comme mettant le cheveu hors de son état normal; car l'aiguille d'un hygromètre renfermé auprès d'acide sulfurique concentré, marche encore au bout de 3 mois. L'instrument est ensuite placé dans un vase de verre (fig. 1005), dont l'ouverture supérieure se ferme exactement au moyen d'un plan de verre, et dans lequel on met successivement les diverses dissolutions d'acide sulfurique. Le vide est fait dans l'appareil par le tube à robinet adapté au couvercle, et l'hygromètre atteint rapidement le même état stationnaire que dans l'air.



Fig. 1005.

La seconde méthode permet d'opérer à différentes températures. On suspend un ou plusieurs hygromètres (fig. 1006) sous une cloche V, que l'on fixe ensuite, au moyen d'un mastic très-fusible, dans une rainure ménagée dans un socle de fonte. La cloche porte une tubulure A qui laisse passer la tige d'un thermomètre T, et à laquelle est adapté un tube à deux branches *f, d*, dont une, *d*, communique avec un manomètre barométrique (1048), et l'autre, *f*, avec une machine pneumatique. Un troisième tube à robinet *r* s'adapte à un petit ballon contenant de l'eau. La cloche est plongée dans un vase de verre rempli d'eau continuellement agitée, et le fond de ce vase est lui-même plongé dans l'eau d'une chaudière qu'on peut chauffer avec une lampe à alcool. Après avoir fait le vide sous la cloche pendant que le robinet *r* est ouvert, on ferme ce robinet, puis on fait plusieurs fois le vide en laissant à chaque fois rentrer lentement de l'air bien sec. Quand on a fait une dernière fois le vide le plus exactement possible, on mesure, sur le manomètre barométrique, la force élastique *e* de l'air sec resté sous la cloche. On ouvre ensuite un instant le robinet *r*, de la vapeur passe dans la cloche en plus ou moins grande quantité, et l'on observe l'indication de l'hygromètre et la pression donnée par le manomètre barométrique. Cette pression, diminuée de celle, *e*, de l'air sec restant, donne la force élastique de la vapeur introduite. En laissant le robinet *r* ouvert plus ou moins longtemps, on fait varier l'état d'humidité de la cloche, et l'on peut construire une table assez rapidement. — Cette méthode permet de

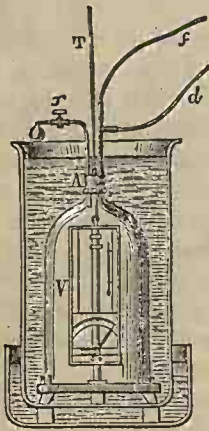


Fig. 1006.

vérifier facilement les hygromètres, pour voir si le cheveu n'a pas subi quelque altération.

Malgré tout, l'hygromètre à cheveu est très-sujet à se déranger, et M. Regnault conseille de renoncer à son usage.

1448. HYGROMÈTRES DE CONDENSATION. — Le Roy, en 1752, a imaginé de

déterminer l'état hygrométrique de l'air en cherchant jusqu'à quel point il faut abaisser sa température pour que la vapeur qu'il contient suffise pour le saturer. On prend un gobelet d'argent poli contenant de l'eau dans laquelle est plongé un thermomètre; on refroidit peu à peu cette eau en y jetant de petits morceaux de glace. Le gobelet refroidit par son contact la couche d'air enveloppante, et bientôt il se dépose une sorte de rosée qui trouble la surface de l'argent. Le thermomètre fait connaître la température du vase au moment où ce phénomène se produit. Cette température étant évidemment un peu trop basse, puisqu'il y a condensation de vapeur, on attend que le trouble disparaisse, et l'on observe encore le thermomètre. La moyenne, θ , des deux températures ainsi obtenues, est prise pour le *point de rosée*, c'est-à-dire pour la température à laquelle l'air doit être abaissé pour se trouver saturé au moyen de la vapeur qu'il contient. Si f est la tension maximum de la vapeur à la température θ , et F la tension maximum à la température ambiante, $f : F$ sera l'état hygrométrique.

Hygromètre de Daniell. — Dans cet instrument, destiné à appliquer cette méthode, le froid est produit par l'évaporation de l'éther. Un tube deux fois recourbé (fig. 1007) est terminé par deux boules : l'une, B, est à moitié remplie d'éther dont un petit thermomètre indique la température; l'autre, m , est enveloppée d'une fine batiste. Avant de fermer à la lampe une pointe effilée qui termine cette dernière boule, on a chassé tout l'air de l'appareil au moyen de la vapeur d'éther. Pour se servir de cet instrument, on projette des gouttes d'éther sur la boule m au moyen d'un petit flacon f , auquel on a adapté un bouchon foré. L'éther, divisé par la batiste, s'évapore rapidement et refroidit la boule m ; la vapeur qui remplit le tube se condense alors dans cette boule, et, l'éther de la boule B s'évaporant à son tour, cette boule se refroidit, et la rosée se dépose à une température donnée par le thermomètre intérieur. Pour rendre le point de rosée plus facile à saisir, la boule B est ordinairement en verre bleu.

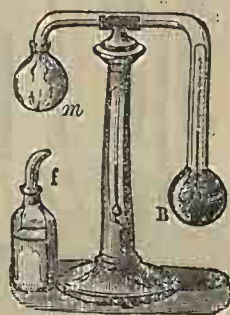


Fig. 1007.

L'hygromètre de Daniell présente divers inconvénients : 1° la température du point de rosée n'existe qu'à la surface de l'éther dans la boule B; le thermomètre donne donc une température trop élevée; 2° la présence de l'opérateur modifie l'humidité et la température de l'air; 3° l'éther du commerce contient toujours de l'eau, dont la vapeur modifie aussi l'état hygrométrique; 4° enfin, l'instrument ne fonctionne plus quand l'air est très-sec et la température élevée.

Hygromètres à capsule, à virole. — Pouillet a décrit sous ces dénominations des instruments dans lesquels l'évaporation de l'éther refroidit directement le thermomètre. Le premier consiste en un thermomètre renversé, dont le réservoir est entouré d'un vase ouvert peu profond en plaqué d'or très-mince rempli d'éther, et sur lequel on observe le point de rosée. L'autre est un

thermomètre horizontal, dont le réservoir allongé porte en son milieu une virole d'or, de chaque côté de laquelle il est recouvert de batiste destinée à recevoir l'éther. Ces instruments sont sujets à peu près aux mêmes inconvénients que l'hygromètre de Daniell.

Hygromètre de M. Belli. — Un noe de fer à section hexagonale, et dont trois faces sont bien polies, est rempli de mercure; son extrémité s'enfonce dans un vase de bois rempli de glace ou d'un mélange réfrigérant. Dans le tube de fer plonge un thermomètre, porté par les extrémités supérieures de deux règles, qui descendent extérieurement de chaque côté du tube, qu'elles pressent de manière à rester à la hauteur où on les place; leur extrémité inférieure est de niveau avec le réservoir du thermomètre. Le froid se propageant dans le tube de fer, la vapeur se condense jusqu'à une certaine hauteur. On amène le réservoir du thermomètre à la limite du dépôt, et il donne alors la température du point de rosée. On peut ainsi observer de loin et à loisir, sans avoir besoin de guetter le moment où la vapeur se précipite. Un kilogramme de glace suffit pour toute une journée; mais on peut douter que le thermomètre donne exactement la température de la section du tube dans laquelle se trouve son réservoir.

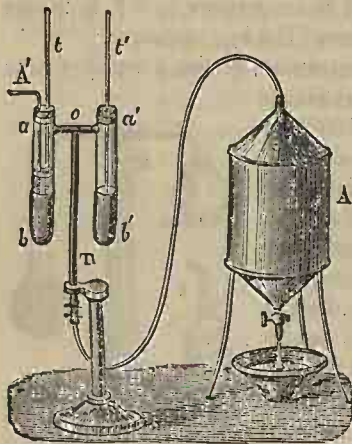


Fig. 1008.

Hygromètre de Savary. — Pour être sûr de la température exacte du point de rosée, Savary a eu l'idée de faire déposer la vapeur sur les spires d'un thermomètre métallique de Breguet (1006), enveloppé d'un cylindre de platine mince qu'il refroidissait par l'évaporation de l'éther.

1449. Hygromètres condenseurs perfectionnés. — M. Regnault a modifié l'hygromètre de condensation de manière à en faire un instrument de précision. *ab* (fig. 1008) est un gros tube de verre, ouvert par les deux bouts, et ajusté, à sa partie inférieure, à un dé d'argent mince et poli *b*, ayant 20^{mm} de diamètre et 40^{mm} de hauteur. L'ouverture supérieure du tube est fermée par un bouchon qui soutient un thermomètre *t*, et laisse passer un tube *A'* s'enfonçant jusqu'au fond du dé d'argent. En *c* est une tubulure qui communique avec l'aspirateur *A* par le tuyau de cuivre *cT*, auquel est adapté un tube en caoutchouc. En *a'b'* est un tube semblable à *ab*, mais ne contenant pas d'éther, et complètement fermé.

Pour mesurer l'état hygrométrique, on fait écouler l'eau de l'aspirateur; l'air pénètre par le tube *A'* à travers l'éther, et le refroidit en emportant de la vapeur. Bientôt la rosée se dépose en *b*, à un instant d'autant plus facile à saisir que

l'on a le dé ν' pour terme de comparaison. On arrête ensuite l'aspiration, et l'on observe la température à laquelle la rosée disparaît. On connaît ainsi des limites de température entre lesquelles se trouve compris le point de rosée. On répète alors l'expérience en faisant couler l'eau plus lentement, et l'on obtient des limites plus rapprochées. On peut ainsi, en 3 ou 4 minutes, déterminer le point de rosée à $\frac{1}{20}$ de degré près.

On voit que la vapeur d'éther ne se répand pas dans l'air, que l'observateur qui dirige l'aspirateur peut être très-éloigné du tube ab , qu'il observe avec une lunette, et que l'agitation produite par les bulles d'air rend la température de l'éther uniforme. Le pouvoir refroidissant du courant d'air est tel qu'on obtient toujours un dépôt. On peut, même par les plus grandes chaleurs de l'été, faire congeler la rosée sur le dé d'argent.

Dans les voyages, on peut supprimer le vase aspirateur, et faire passer l'air, en soufflant avec la bouche, par un long tube flexible plongeant dans l'éther. L'air sort par un tube assez long pour que les vapeurs d'éther ne puissent pas modifier l'état hygrométrique autour de l'appareil. Enfin, on peut, en soufflant plus fort, remplacer l'éther par l'alcool, ce qui est important dans les pays chauds, où le premier liquide est difficile à conserver.

M. Alluard a imaginé l'hygromètre (*fig. 1009*), d'un usage très-commode, et sur lequel le point de rosée se détermine avec une grande précision. L'éther est introduit par l'entonnoir e dans un vase rectangulaire A en argent ou laiton doré, muni d'une fenêtre vitrée. On fait passer de l'air à travers l'éther, par les tubes e, a , dont le dernier va jusqu'au fond, pendant que cet air est appelé dans un vase aspirateur, par les tubes a', c' . La face A est encadrée dans une plaque dorée et brillante comme elle, qui ne la touche pas et ne se refroidit pas; de manière que, par contraste, on saisit facilement le moment où la face A se ternit. Le thermomètre t donne alors le point de rosée avec une précision telle, que la température est à peine différente au moment où le trouble disparaît en A. En ν' est un thermomètre fronde, au moyen duquel on détermine la température de l'air.

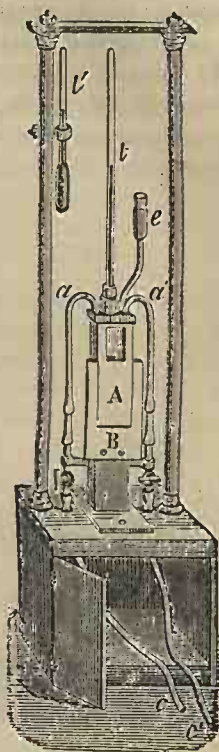


Fig. 1009.

1450. Hygromètres de tension. — Ces instruments permettent de déduire la tension de la vapeur dans l'air, de ce qu'il faut y ajouter pour qu'il y ait saturation. M. Majocchi a, le premier, appliqué cette méthode; il se servait d'un appareil analogue à celui que Gay-Lussac employait pour démontrer la loi

du mélange des gaz et des vapeurs (1141). M. Regnault a discuté et perfectionné cette méthode, qu'il a trouvée exacte, mais lente.

La figure 1010 représente l'hygromètre de tension de M. P. Renoux. Un vase cylindrique de verre à bords bien dressés peut être fermé hermétiquement par un disque de verre A soutenant un thermomètre et portant un tube Db qui communique avec un manomètre à eau Eca. En *b* est un robinet à trois voies.

Voici comment se fait l'expérience. Après avoir agité de l'air dans le vase, afin d'y établir l'état hygrométrique extérieur, on applique le disque A sur le bord enduit de suif, et l'on tourne le robinet *b* de manière à faire communiquer le vase avec l'extérieur. On enlève ensuite le manomètre, pour verser de l'eau dans le tube Db, et l'on replace le manomètre, dans lequel on établit l'égalité des niveaux en s'aidant du robinet *c*. On tourne alors le robinet *b* de manière que l'eau du tube Db s'introduise dans le vase, la communication avec l'extérieur étant supprimée; l'air s'y sature, et la pression y augmente d'une quantité *p*. Si *P* est la tension de la vapeur saturée à la température indiquée par le thermomètre, $P - p$ sera la tension de la vapeur que contenait l'air, et $(P - p) : P$, l'état hygrométrique. Cette méthode présente sur toutes les autres l'avantage de pouvoir être appliquée par les plus grands vents.

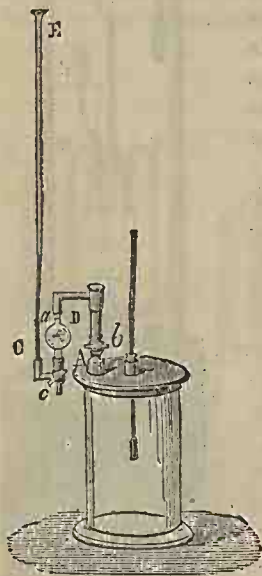


Fig. 1010.

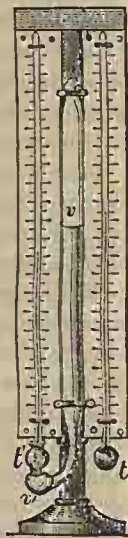


Fig. 1011.

1151. HYGROMÈTRES D'ÉVAPORATION. — Leslie a cherché à déterminer l'état d'humidité de l'air par une méthode dont la première idée paraît due à Hutton, et qui consiste à observer la rapidité de l'évaporation de l'eau, rapidité déduite elle-même de l'abaissement de température qu'elle produit. L'appareil employé par Leslie n'était autre chose que son thermomètre différentiel, dont une des boules était garnie d'une fine toile constamment mouillée¹. Gay-Lussac a perfectionné cette méthode, sur laquelle M. August a publié plusieurs mémoires.

Psychromètre d'August. — Cet appareil consiste en deux thermomètres, *t*, *t'* (fig. 1011), dont un, *t'*, a sa boule enveloppée de batiste continuellement

humectée au moyen d'une mèche de fil plongeant dans le réservoir v' . Un tube fermé à sa partie supérieure maintient un niveau constant dans ce réservoir. Le thermomètre mouillé finit par devenir stationnaire, parce qu'il perd de moins en moins de chaleur, par rayonnement et par évaporation, à mesure que sa température s'abaisse, pendant qu'il en reçoit de l'air qui l'enveloppe; et l'on déduit l'état hygrométrique de la comparaison des indications des deux thermomètres.

Formule du psychromètre. — On a admis d'abord que le refroidissement du thermomètre mouillé était proportionnel à la différence entre la tension f de la vapeur à saturation et la tension x qui existe dans l'air. En désignant par t et t' les températures des deux thermomètres, et par t'' celle que prendrait le thermomètre mouillé dans l'air sec à la température t , on aurait alors, pour trouver l'état hygrométrique $x : f$,

$$f : f - x :: t - t'' : t - t'; \quad \text{d'où} \quad \frac{x}{f} = \frac{t' - t''}{t - t''}.$$

Pour calculer cette valeur, il suffit de connaître, indépendamment des quantités f , t , t' , l'abaissement $t - t''$ d'un thermomètre mouillé dans l'air sec. Gay-Lussac a construit une table qui donne cet abaissement pour des températures ambiantes allant de 0° à 25° . Il opérât en faisant passer un courant d'air sec dans un tube, où ce courant rencontrait d'abord un thermomètre sec qui en donnait la température, puis un thermomètre recouvert d'une éponge mouillée, qui indiquait le maximum d'abaissement produit. Nous citerons comme exemple les nombres suivants : quand la température de l'air était 0° , 5° , 10° , 15° , 20° et 25° , l'abaissement trouvé était de $5^\circ,82$; $7^\circ,27$; $8^\circ,97$; $10^\circ,82$; $12^\circ,73$; et $14^\circ,70$.

M. August a proposé une autre formule qui dispense de connaître $t - t''$. Il suppose que l'agitation de l'air n'a pas d'influence, et que les couches d'air qui arrivent successivement au contact de la boule humide en prennent la température et se saturent d'humidité. Dans la formule à laquelle il parvient, entrent deux constantes, qui dépendent de la capacité calorifique de l'air et de la densité de la chaleur latente et de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau. Si l'on met à la place de ces quantités les valeurs obtenues par M. Regnault, la formule devient

$$x = F - \frac{0,429 (t - t')}{640 - t'} h.$$

F représentant la tension maximum, à la température t' de la boule mouillée, t la température ambiante, et h la hauteur du baromètre.

1452. De l'exactitude du psychromètre. — L'hygromètre condenseur, exigeant une petite manipulation, un instrument exact qui n'exigerait qu'une simple lecture serait préférable pour les observations suivies; c'est pourquoi M. Regnault a soumis à un examen attentif la marche du psychromètre ¹.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XV, p. 204, et t. XXXVII, p. 259.

D'abord, pour voir si l'agitation de l'air est sans influence sur les indications du thermomètre mouillé, il fait arriver de l'air sec, qui entre en *o* dans un tube de laiton recourbé plusieurs fois (fig. 1012), passe dans deux boîtes à parois très-minces, dans lesquelles sont un thermomètre sec *l*, et un thermomètre *l'* enveloppé de mousseline continuellement humectée par une mèche de coton plongeant dans un petit réservoir *c*. Le tout est entouré d'eau continuellement agitée à la température ambiante. L'air est aspiré, en *a*, avec une vitesse connue, dans un grand vase aspirateur.

M. Regnault a reconnu ainsi que l'abaissement du thermomètre mouillé augmente avec la vitesse d'un courant d'air sec. Par exemple, à la température de $14^{\circ},90$, pour des vitesses entre elles comme 1, 3, 6, les différences des deux thermomètres ont été de $7^{\circ},38$; $13^{\circ},03$; $10^{\circ},63$. Des vitesses plus considérables, obtenues en aspirant l'air au moyen de la machine pneumatique, ont donné, quand la température de l'air était de $18^{\circ},91$ et de $22^{\circ},95$, les nombres $5^{\circ},39$ et $7^{\circ},35$ pour les températures du thermomètre mouillé, tandis que la formule d'August donne les nombres $5^{\circ},91$ et 8° .

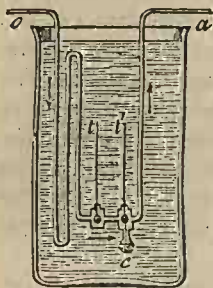


Fig. 1012.

Quand l'air aspiré est humide, l'augmentation de vitesse fait encore baisser le thermomètre mouillé, mais moins que l'air sec. Si l'on attache un thermomètre mouillé à une roue horizontale que l'on fait tourner, aussitôt on le voit baisser de plusieurs dixièmes de degré.

M. Regnault a ensuite contrôlé les indications du psychromètre par la méthode chimique (1444), et il est arrivé aux conclusions qui suivent : 1° La forme des thermomètres n'a pas d'influence sensible, ni la manière de mouiller, pourvu que la batiste soit entièrement imbibée sans trop grand excès d'eau. 2° A l'air libre,

et entre 7° et 18° , les états hygrométriques déduits de la formule sont constamment trop forts, mais de 2 à 3 centièmes seulement. Pour des températures plus basses, et quand l'air est très-humide, l'erreur est plus grande : ainsi, entre 0° et 7° , elle peut s'élever à 0,1. 3° Dans un espace fermé, à des températures de 8° à 25° , elle peut atteindre 0,1. Cela tient à ce que, l'air étant en repos, la valeur de *l'* se trouve trop élevée; et, en effet, quand on ouvre deux fenêtres opposées, de manière à produire un courant d'air, l'erreur s'atténue. 4° Quand la vitesse d'un courant d'air ne dépasse pas 8^m , elle n'a pas d'influence sur les indications de l'instrument; car deux appareils semblables, dont l'un était dans l'air en repos, et l'autre à l'origine d'un gros tuyau par lequel l'air se rendait dans un ventilateur à force centrifuge, ont toujours été sensiblement d'accord, tant que la vitesse n'a pas dépassé 8^m . Cette vitesse était mesurée au moyen d'un anémomètre de rotation (1422). 5° Il semble résulter d'expériences faites par M. Marié, à Saint-Étienne et sur le mont Pila, sous des pressions de 705^{mm} et de 655^{mm} , et par M. Isarn dans les Pyrénées,

que la formule donne aussi, sous les faibles pressions, des résultats sensiblement d'accord avec ceux de l'hygromètre condenseur.

On peut dire, en général, que la formule d'August conduit à des résultats un peu trop forts, mais suffisamment approchés dans la plupart des cas.

M. Regnault a simplifié cette formule en négligeant les termes trop faibles pour influencer les résultats; elle devient alors

$$x = F - \frac{a(t-t')}{b} h,$$

$$\text{ou } x = F - A(t-t') h.$$

Puis il a cherché, en opérant dans un grand nombre de conditions différentes, quelle valeur il faudrait donner à A pour que celle de x fût d'accord avec les résultats de la méthode chimique. Il a trouvé que A varie avec les circonstances dans lesquelles se trouve l'instrument. Par exemple, dans une chambre fermée, il faut faire A égal à 0,00128, et, dans une cour entourée de constructions élevées, à 0,00074; ce qui doit être attribué au rayonnement inégal des corps environnants. Au-dessous de 0°, une seule valeur de A ne peut plus représenter les fractions de saturation dans tous les états d'humidité; pour un même appareil restant dans la même situation, il faut au moins deux valeurs différentes.

Pour faire usage du psychromètre, on doit commencer par déterminer la constante A, qui convient à l'appareil et au lieu où il est installé. Le psychromètre est donc un instrument *empirique*, comme l'hygromètre à cheveu, et il ne peut être employé exact avec une foule de précautions. Suffisamment exact quand la température de l'air est assez élevée, il devient très-peu sûr pour les températures voisines de zéro, et surtout pour celles qui sont au-dessous. Dans tous les cas, il sera toujours préférable de se servir de l'hygromètre condenseur, qui ne laisse rien à désirer sous le rapport de la sûreté et de la précision.

1453. Observations suivies du psychromètre. — Dans les observations, on dispose l'appareil, dont les thermomètres doivent être placés au dehors, de manière à pouvoir faire les lectures dans l'intérieur. La figure 1013 représente le psychromètre de M. Salleron établi à l'Observatoire météorologique de Montsouris. Les réservoirs E, D, en cuivre nickelé, des deux thermomètres, sont remplis d'alcool, qui arrive jusque dans les tubes gradués A, C,

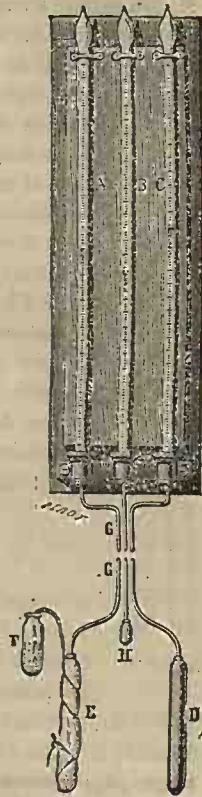


Fig. 1013.

auxquels ils sont reliés par de longs tubes capillaires de cuivre G, G. Pour corriger les résultats, de la dilatation du liquide dans les tubes de jonction, M. Salleron dispose un troisième thermomètre AB dépourvu de réservoir, et dont les dilatations donnent directement les corrections à faire. Les trois tubes de jonction étant soudés les uns aux autres dans toute leur longueur, on est certain de l'identité de leur température.

M. Marié-Davy a aussi installé au même Observatoire le psychromètre enregistreur suivant. Chacun des thermomètres, sec ou mouillé, est formé d'un tube aplati de M. Bourdon (I, 369), droit et tordu autour de son axe, et rempli d'alcool. Quand ce liquide se dilate ou se contracte, la torsion change. Une des extrémités est fixe, et l'autre porte, sur le prolongement de l'axe du tube, une longue tige qui traverse le mur et est munie en dedans d'une aiguille perpendiculaire, dont les mouvements, indiquant les changements de température, peuvent être facilement enregistrés sur un cylindre tournant. Ces appareils, appelés *téléthermomètres*, peuvent être facilement appropriés à la mesure des températures de l'air.

Calcul des résultats. — Comme il serait fort incommode de calculer la formule à chaque observation, on a construit des tables à double entrée permettant de déduire rapidement l'état hygrométrique, des températures des deux thermomètres. On trouve, dans l'annuaire de l'Observatoire de Montsouris pour 1878, des tables de M. Haeghens, calculées au moyen de la formule

$$X = F - \frac{0,480(t-t')}{610 - t'} h,$$

en prenant pour h la hauteur moyenne de 760^{mm}. La première colonne horizontale donne, en degrés, de 0° à 30°, les températures du *thermomètre mouillé*, et la première colonne verticale, les valeurs de $t - t'$ en cinquièmes de degré, de 0° à 14°.

Quand le thermomètre mouillé est au-dessous de zéro, il faut remplacer, dans la formule, le nombre 610 par 689, et une table spéciale répond à ce cas.

Règle psychrométrique. — Au moyen de la règle ou échelle psychrométrique de M. Prazmowski (*fig. 1014*), on obtient rapidement la tension de la vapeur de l'air et l'état hygrométrique, avec une approximation suffisante. Chacune des faces de cette règle porte une rainure dans laquelle glisse une règlette S. Pour trouver la tension, on se sert du côté qui porte les lettres M, S, T; l'échelle M indique la température du thermomètre mouillé en degrés et cinquièmes de degré; S, celle du thermomètre sec en degrés; et T indique les tensions de la vapeur en cinquièmes de millimètre. On fait glisser la règlette de manière que le degré observé sur le thermomètre sec soit en regard du degré du thermomètre mouillé; et la division de l'échelle T indiquée par une petite flèche gravée sur la règlette, exprime la tension cherchée.



Fig. 1014.

Pour trouver l'état hygrométrique, on retourne la règle du côté qui porte les lettres S', P, F. L'échelle S', gravée à gauche, indique les degrés du thermomètre sec; celle qui porte la règlette, P, les tensions de la vapeur, et l'échelle de droite, F, les états hygrométriques en centièmes. On fait glisser la règlette de manière à placer le degré du thermomètre sec en face de la tension que l'on a trouvée dans la première opération, et une flèche gravée sur la règlette indique sur l'échelle F, l'état hygrométrique.

1454. Résultats d'observations hygrométriques. — Les méthodes hygrométriques étant restées longtemps très-imparfaites, nous ne possédons que peu d'observations sur l'humidité atmosphérique. En général, la *quantité absolue* de vapeur croît avec la température. Elle augmente donc quand on se rapproche de l'équateur. Elle est aussi plus grande sur la mer que sur les côtes, et sur les côtes que dans l'intérieur des continents, où l'on trouve souvent d'immenses espaces desséchés, comme les déserts de l'Afrique et de l'Asie, les steppes de la Sibérie, les plaines de l'Orénoque, l'intérieur de la Nouvelle-Hollande, d'où soufflent des vents très-secs. — Dans nos climats, l'air est rarement saturé. Par les plus grandes pluies, l'hygromètre à cheveu ne dépasse guère 95°, et il ne marque 100° que par certains brouillards ou dans les temps de dégel. La moyenne est de 72°; l'air contient alors environ la moitié de la vapeur nécessaire à sa saturation; et la limite inférieure est de 40°, qui correspond à un état hygrométrique égal environ à $\frac{1}{4}$.

Variations diurnes. — M. Neuber, à Apenrade, en Danemark, a observé pendant un an, de 7^h du matin à 11^h du soir, l'hygromètre de Daniell toutes les deux heures. M. Kupffer, à Saint-Petersbourg, se servait du psychromètre. Mais la plus longue série que nous possédions a été recueillie à Halle par M. Kaemtz, à partir de 1831¹. Il résulte des observations des douze premières années, que la *quantité absolue* de vapeur est minimum un peu avant le lever du soleil, et va ensuite en croissant à mesure que la chaleur active l'évaporation. L'état hygrométrique, au contraire, est *maximum* au lever du soleil, à cause de la basse température, et va en diminuant ensuite, malgré la production de nouvelles vapeurs, à cause de l'échauffement de l'atmosphère. — En hiver, la quantité absolue de vapeur augmente jusqu'au moment où le thermomètre commence à baisser; il y a ensuite précipitation de vapeur et augmentation de l'état hygrométrique. — En été, la quantité absolue d'humidité atteint son *maximum* avant midi, puis elle diminue en même temps que l'état hygrométrique, ce que l'on peut attribuer aux courants ascendants, qui emportent les vapeurs dans les régions supérieures. Le minimum a lieu au moment de la plus grande chaleur; puis l'état hygrométrique augmente assez régulièrement jusqu'au lendemain matin. Sur les bords de la mer, les résultats semblent être les mêmes; seulement, le minimum du matin est moins prononcé. A Apenrade, le maximum et le minimum diffèrent plus qu'à Halle.

¹ Kaemtz, *Leçons de météorologie*, traduction française, p. 92.

Variations mensuelles. — A Halle, l'état hygrométrique est maximum en janvier et minimum en juillet; mais les quantités absolues de vapeur suivent une marche inverse. Cette marche paraît être la même dans tous les pays où l'on a observé, même dans l'Inde, d'après M. Prinsep. On conçoit que les vents régnants compliquent singulièrement ces résultats, les uns apportant l'humidité et d'autres la sécheresse; leurs effets dépendent aussi des saisons. La figure 1015 donne une idée de l'état hygrométrique qui correspond aux divers vents dans les différentes saisons, à Halle. Les ordonnées représentent les états hygrométriques à l'échelle de $\frac{1}{2}$ mm par unité, 100 représentant l'état de saturation, et en retranchant 60 unités ou 30mm à chaque ordonnée. Les courbes correspondent, *pp* au printemps, *ee* à l'été, *aa* à l'automne, et *hh* à l'hiver.



Fig. 1015.

Influence de l'altitude. — On peut dire, en général, que, *par le beau temps*, l'état hygrométrique diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. De Saussure et Deluc ont, les premiers, constaté ce résultat. Le premier n'a jamais vu l'hygromètre au-dessus de 40°, dans les Alpes. De Humboldt a aussi

remarqué la sécheresse prononcée de l'air sur les montagnes d'Amérique. Gay-Lussac, à 7000^m de hauteur, a trouvé l'état hygrométrique égal à $\frac{1}{3}$; ce qui suppose une quantité absolue de vapeur extrêmement petite, car la température était de — 10°. Quand le ciel est chargé de nuages, cette loi souffre des exceptions faciles à concevoir.

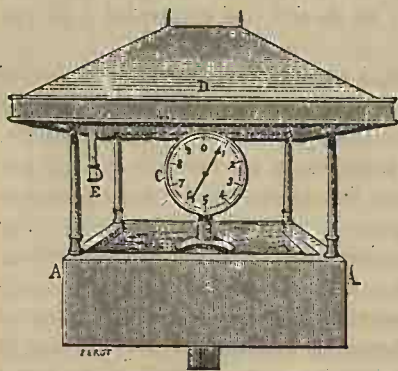


Fig. 1016.

1455. Évaporomètres. — Le vent ayant beaucoup d'influence sur l'état hygrométrique, en emportant la vapeur qui se forme, on cherche à se rendre compte de l'état de sécheresse ou d'humidité d'un climat par la rapidité avec laquelle se fait l'évaporation. On emploie pour cela des instruments nommés *évaporomètres* ou *atmidomètres*. Le plus simple consiste en une cuve à section carrée contenant de l'eau. Sur une division verticale en millimètres, glisse un curseur portant une pointe qu'on amène au niveau de l'eau, et l'on voit de combien ce niveau baisse par l'évaporation. — La figure 1016 représente l'évaporomètre établi à l'Observatoire de Montsouris¹. Il consiste en un

¹ *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris pour 1878*, p. 323.

bassin AA, de $\frac{1}{4}$ de mètre carré de superficie, contenant une couche d'eau de 10^{cm} environ d'épaisseur, et abritée par un toit D placé à 30^{cm} des bords du bassin. Un flotteur transmet les changements de niveau à une aiguille, qui indique sur un cadran C les centièmes de millimètre.

Sous le toit D est aussi suspendu un évaporomètre Piche, E, consistant en un tube vertical étroit contenant de l'eau, et dont l'extrémité inférieure est fermée par une rondelle de papier épais sans colle, qu'on renouvelle chaque jour. Les indications de cet instrument sont d'accord avec celles de l'appareil AA, pour l'ensemble des observations; mais il y a certaines différences de détail, qui s'expliquent par les variations de température, bien plus sensibles sur la petite masse d'eau de l'un que sur la masse plus grande de l'autre. — Pour évaluer l'évaporation de la terre, des végétaux, M. Marié-Davy emploie des espèces de balances-bascales dont la plate-forme reçoit des vases contenant la terre humide. L'extrémité opposée du fléau soutient une éprouvette pleine de mercure dans laquelle plonge un cylindre fixe, qui s'enfonce d'autant moins que l'évaporation est plus avancée.

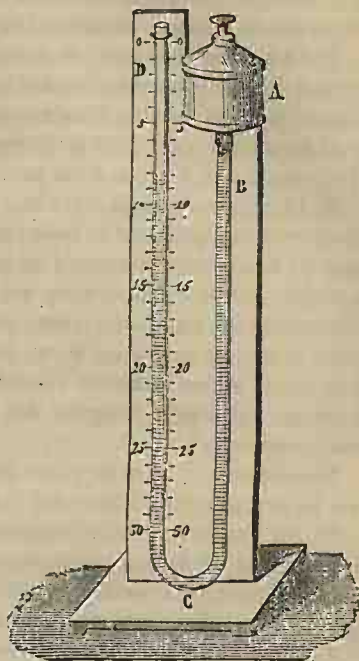


Fig. 1017.

Citons encore l'*admidoscope* de Babinet (fig. 1017). L'eau contenue dans le tube BCD et dans le cylindre A en porcelaine poreuse, s'évapore à la surface de ce dernier; et, comme il est fermé hermétiquement à ses deux bases, l'eau d'évaporation est remplacée par celle du tube CD, dans lequel le niveau baisse peu à peu.

II. De la rosée et du givre.

1456. Circonstances favorables à la production de la rosée. — On donne le nom de *rosée* à des gouttelettes d'eau que l'on trouve sur la plupart des corps exposés à l'air libre, à la suite des nuits calmes et sereines.

Les circonstances favorables à la formation de la rosée sont de trois sortes :

1° L'état de l'atmosphère : la rosée ne se dépose que pendant les nuits calmes et sereines. Quand le ciel est couvert et l'air agité, il n'y a pas de rosée;

cependant, un vent léger est favorable, surtout quand il a rasé de grandes étendues d'eau. Plus la différence de température entre le jour et la nuit est considérable, plus l'air est humide, comme après les jours de pluie, et plus il y a de rosée. Ces dernières conditions sont remplies principalement au printemps et surtout en automne, saisons où l'on observe le plus de rosée.

2° La situation du corps : la rosée se montre surtout sur les corps éloignés de tout obstacle pouvant leur cacher une partie du ciel. Sur les collines, dans les plaines, la rosée est plus abondante qu'au fond des vallées, à moins que l'air froid des coteaux n'y coule et ne s'y accumule. Sous les arbres, près des édifices, il n'y en a pas ou il n'y en a que peu.

3° La nature du corps : placés à la même exposition, divers corps ne se recouvrent pas également de rosée; pour qu'ils en reçoivent, il faut qu'ils soient mauvais conducteurs et doués d'un grand pouvoir émissif. On ne trouve donc que peu de rosée sur les métaux, qui conduisent bien la chaleur et la rayonnent faiblement. On n'en voit presque jamais sur l'or, l'argent, le cuivre, l'étain polis, et souvent un peu sur le fer, l'acier, le plomb, le zinc. Musschenbroek, puis Dufay, avaient remarqué l'inaptitude des métaux à recevoir de la rosée, mais sans l'expliquer, l'inégalité des pouvoirs rayonnants des divers corps leur étant inconnue.

Nous voyons, en nous rappelant les effets du rayonnement nocturne (1390), que les circonstances qui favorisent la formation de la rosée sont en même temps celles qui favorisent le refroidissement de la surface des corps. L'influence de la conductibilité est facile à concevoir; si elle est peu prononcée, la chaleur des parties intérieures ne vient pas restituer aux couches superficielles la chaleur qu'elles ont perdue par le rayonnement.

1457. Explication de la rosée. — Aristote, qui avait remarqué que la rosée ne se montre que sous un ciel pur, la regardait comme une espèce de pluie fine provoquée par le froid de la nuit. Cette explication, généralement acceptée d'abord, est incompatible avec ce fait, que la rosée ne s'observe pas également sur tous les corps. On a prétendu ensuite que la rosée s'élevait de la terre, parce que les cloches de verre dont on abrite certaines plantes se recouvrent de rosée en dedans. Gersten, en 1733, soutint cette opinion, et Musschenbroek supposa qu'il y avait trois sortes de rosée : l'une s'élevant de la surface des eaux, l'autre de la terre, et la troisième tombant d'en haut.

Théorie de Wells. — C'est au docteur Wells, vers 1810, que nous devons la véritable explication de la rosée. Pour prouver d'abord qu'elle ne tombe pas comme une pluie, il plaça deux flocons de laine pesant chacun 0^{sr}, 53 l'un à l'air libre, l'autre au fond d'un cylindre vertical de terre cuite, de 80^{cm} de hauteur et de 32^{cm} de diamètre; le premier se chargea de 0^{sr}, 85 d'humidité, et l'autre de 0^{sr}, 11 seulement, l'air étant très-calme. Après avoir constaté qu'un thermomètre placé sur l'herbe courte marquait 4°, 5°, ..., et jusqu'à 8° de moins qu'un thermomètre placé à 1 mètre au-dessus du sol, Wells a expliqué la rosée ainsi qu'il suit.

Les corps placés à la surface de la terre rayonnent vers l'espace, et leur surface se refroidit d'autant plus que leur pouvoir émissif est plus grand, et qu'ils voient une plus grande partie du ciel; la mince couche d'air qui les entoure, refroidie par leur contact, se trouve bientôt saturée par la vapeur qu'elle contient, et cette vapeur se dépose sous forme de rosée, comme dans les hygromètres de condensation; seulement, le refroidissement est dû ici au rayonnement vers l'espace. Un vent léger, en remplaçant l'air qui a déposé son excès de vapeur, est favorable à la rosée; tandis qu'un vent prononcé l'empêche, en réchauffant les corps par son contact, et ne laissant pas à l'air le temps de se refroidir. Plus l'air est humide, plus il arrive facilement à l'état de saturation, et plus il y a de rosée. En France, c'est par le vent du sud-ouest que la rosée est abondante; c'est par le vent du nord, en Égypte.

Les métaux doués d'un faible pouvoir émissif ne se refroidissent pas assez pour condenser la vapeur. Une expérience de B. Prévost met cela en évidence: lorsqu'il fait froid, l'humidité intérieure des habitations se dépose sur les vitres refroidies par le rayonnement extérieur; mais si l'on applique une feuille d'étain sur une vitre en dehors, la partie correspondante en dedans reste sèche ou presque sèche. Si, au contraire, on met la feuille d'étain en dedans, elle se couvre plus abondamment d'eau que les parties voisines, parce que son pouvoir absorbant étant très-faible, elle arrête la chaleur intérieure, qui compense en partie le refroidissement extérieur de la vitre.



Fig. 1018.

1458. Expériences de Melloni. — La théorie de Wells a produit une véritable révolution dans la météorologie, et a permis d'expliquer une foule de faits qui ont de l'analogie avec la rosée. Mais cette théorie avait besoin d'être complétée, pour rendre compte de certains détails jusqu'alors négligés; c'est ce qu'a fait Melloni¹. Il a d'abord fait une expérience qui résume toutes celles qui servent de base à la théorie de Wells, afin de renverser l'hypothèse de l'ascension de la rosée, que l'on tentait de faire revivre. Il prit un disque de fer-blanc *mn* (fig 1018), dont la partie centrale *rv'* était recouverte d'une couche épaisse de vernis. Un autre disque de fer-blanc *aa'*, moins large de 10^{mm} que le cercle verni, était maintenu à une distance de 5^{mm} de ce dernier, par un gros fil de fer. Cet appareil ayant été exposé horizontalement en plein air par un ciel pur, la partie vernie qui dépassait de 5^{mm} le disque *aa'*, se refroidit par rayonnement et se couvrit de rosée; puis, le froid se communiquant aux parties voisines, la rosée se propagea vers le centre jusqu'à une certaine distance, ainsi que du côté de la circonférence, où la propagation fut plus prompte, parce que les parties, une fois humectées, rayonnaient vers l'espace. Ce qu'il y a surtout à remarquer, c'est que la partie inférieure du disque *mn* se couvrit de rosée

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXI, p. 445; et XXII, pp. 129 et 467.

exactement aux mêmes endroits que la partie supérieure, et au même instant sur les points correspondants. Le disque supérieur *aa'* restant sec, on voit que la rosée ne tombe pas du ciel; elle ne vient pas non plus de la terre, puisque la partie centrale du disque *mn* reste sèche en dessous.

Cela posé, Melloni démontre que la formation de la rosée est précédée d'un refroidissement préalable de la couche d'air qui touche le sol. S'il s'agit d'une prairie, les extrémités des brins d'herbe, refroidies par le rayonnement, abaissent la température de l'air qui les touche. Cet air glisse le long des tiges, s'échauffe au contact des parties inférieures, remonte, et ainsi de suite; de manière qu'au bout d'un certain temps l'herbe est enveloppée d'air stagnant, plus froid que celui qui touche son extrémité supérieure; ce que l'expérience directe vérifie. L'herbe peut alors se refroidir davantage, de manière à être toujours plus froide que l'air qui la touche. Pour montrer cette influence de l'air stagnant et froid autour des corps divisés, Melloni a exposé au rayonnement nocturne, deux thermomètres garnis d'une mince lame d'argent (1390), enduite de noir de fumée sur l'un d'eux, et enveloppée d'un flocon de laine ou de coton, sur l'autre. Ce dernier descendit, au bout de quelques minutes, deux fois plus que le premier; l'air refroidi par le contact des filaments ne pouvant s'en dégager. Si le flocon était condensé, le refroidissement était moindre.

L'existence de la couche d'air froide et stagnante explique certains faits qui paraissent, au premier abord, favorables à l'opinion que la rosée s'exhale de la terre. Ainsi, la partie moyenne de l'herbe se couvre de rosée avant l'extrémité, parce que l'air froid descend vers le sol. Une planche couverte de toile cirée et placée tout près de la terre peut recevoir de la rosée en-dessous avant qu'il y en ait à la partie supérieure; c'est que l'air froid qui glisse en-dessous y reste en repos, tandis que celui qui touche la partie supérieure peut se déplacer. Il n'y a pas de rosée à la cime des arbres, parce que l'air refroidi tombe à travers le feuillage, pour être continuellement remplacé. Les navires en pleine mer ne reçoivent pas de rosée, le refroidissement de l'air ne pouvant avoir lieu à cause du contact des eaux, dont la température s'abaisse à peine pendant la nuit. Il en est de même des petites îles, comme celles de la Polynésie, l'air qui les recouvre se mélangeant avec celui de la mer; ce que favorisent aussi les vents alizés.

Dans certaines mers, particulièrement dans la mer des Indes, les navires sont avertis de l'approche des côtes par de la rosée déposée sur les cordages; c'est que la brise de terre amène du rivage l'air refroidi pendant la nuit et rapproché du point de saturation. Dans les pays arides, comme les déserts de l'Afrique et de l'Asie, des voyageurs ont pu être avertis du voisinage de lacs ou de fleuves, par l'apparition de la rosée.

1459. *Givre*. — Le *givre* ou *gelée blanche* se forme comme la rosée : quand la température des corps descend au-dessous de 0°, ce qui a lieu au printemps et en automne, l'humidité de l'air passe alors à l'état solide, *sans passer par l'état liquide*, et forme une couche à structure cristalline formée de petites houppes perpendiculaires à la surface des corps. On dit quelquefois que

le givre est de la rosée congelée; mais la vapeur ne s'est pas déposée d'abord à l'état liquide; car, s'il en était ainsi, on aurait de petits mamelons de glace amorphe et transparente, et non des houppes opaques, dans lesquelles on distingue de petits cristaux, agglomérés en prismes implantés les uns à côté des autres.

Les couches de glace arborisées qui se voient pendant l'hiver sur les vitres, dans les appartements, se forment de la même manière que le givre; elles agissent comme une espèce de rideau qui retient la chaleur intérieure.

M. C. Decharme produit une sorte de givre artificiel dans des conditions qui permettent d'assister à la formation des houppes cristallines¹. On plonge verticalement dans du *sulfure de carbone*, une bande de papier spongieux, dans laquelle le liquide monte par capillarité. Au bout de quelques minutes, on voit se former à une certaine hauteur un dépôt de givre produit par l'humidité de l'air, condensée par le froid dû à l'évaporation du *sulfure de carbone*. — On peut, au moyen d'une forte loupe, suivre la formation rapide des houppes de glace. On peut aussi en projeter l'image sur un écran dans un faisceau de vive lumière, et appeler ainsi tout un auditoire à saisir la nature sur le fait. M. Decharme a trouvé une grande analogie entre les formes des petits cristaux agglomérés dans le givre artificiel, et les formes de ceux de la gelée blanche. D'autres liquides volatils peuvent remplacer le *sulfure de carbone*; par exemple, le *chloroforme*, avec lequel les houppes cristallines ressemblent même mieux à celles du givre naturel que celles que donne le *sulfure de carbone*.

Givre spécial. — Quand un vent chaud et humide succède à un froid vif et prolongé, tous les corps se recouvrent d'une couche blanche cristalline formant, sur les arbres et sur les fils d'araignée qu'ils supportent, des guirlandes qui étincellent au soleil. Ces productions sont connues aussi sous le nom de *givre*, quoiqu'elles aient une toute autre origine; car la basse température des corps n'est pas due ici au rayonnement nocturne, et cette espèce de givre se forme aussi bien pendant le jour que pendant la nuit.

1460. Drosomètre. — La quantité de rosée que reçoit annuellement un pays est souvent importante à considérer. En effet, quoiqu'elle ne représente qu'une très-petite quantité d'eau, elle atténue les effets de la sécheresse sur les plantes, et, dans les climats froids, elle les empêche de geler en leur cédant la chaleur latente de la vapeur qui se condense. Si cette vapeur passe à l'état de givre, elle cède encore 80 calories, et forme une enveloppe préservatrice par sa mauvaise conductibilité.

On n'a recueilli que très-peu d'observations sur la rosée. Tantôt on compte le nombre de nuits où il s'en dépose, tantôt on mesure la couche d'eau qu'elle représente. Les instruments dont on se sert alors se nomment *drosomètres*. Flaugergues employait une plaque de métal peinte à l'huile, et de Gasparin, un plateau de verre; on recueille l'eau qui ruisselle de la surface, et l'on tient compte de celle qui y adhère, en partant d'expériences préalables.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. III, p. 236.

On conçoit que la position de l'instrument et le pouvoir rayonnant de la matière qui le forme ont une grande influence sur les résultats. Aussi, les nombres trouvés laissent-ils beaucoup d'incertitude, eu égard surtout à la petitesse des quantités mesurées. On a reconnu que la rosée qui se dépose annuellement dans le midi de la France et en Italie représente une couche d'eau d'un peu plus de 6^{mm}. Il s'en dépose le plus en octobre, novembre et mai; très-peu en janvier, février, mars et avril; et, en août, à peine plus qu'en mai.

III. Météores dus à la condensation de la vapeur dans l'atmosphère.

1461. Condensation des vapeurs dans l'atmosphère. — Lorsqu'une masse d'air est refroidie par une cause quelconque, de manière à se trouver saturée par la vapeur qu'elle contient, cette vapeur se précipite sous la forme de gouttelettes d'eau extrêmement petites, qui restent en suspension à cause de leur faible poids, comme ces poussières fines et sèches que l'air soutient malgré la grande densité de chaque parcelle. L'adhésion de l'eau pour l'air concourt aussi à ce résultat. Ces gouttelettes d'eau troublent la transparence de l'air; elles forment les *brouillards* ou les *nuages*, suivant qu'elles se montrent près de la surface de la terre ou dans les régions élevées de l'atmosphère. — On peut réaliser en petit la production d'un brouillard en laissant échapper de l'air humide comprimé, ou en faisant rapidement le vide sous un récipient : on voit un léger brouillard qui se dissipe bientôt, l'air, refroidi d'abord par la raréfaction, se réchauffant au contact des parois. Dans les chambres à air comprimé (1278), on observe souvent la précipitation de la vapeur quand on rétablit la pression atmosphérique. La vapeur de l'eau chaude produit aussi un brouillard en arrivant dans l'air froid, comme on l'observe dans les cabinets de bains.

De la vapeur vésiculaire. — Pour expliquer la suspension dans l'air des particules qui composent les brouillards et les nuages, on a admis pendant longtemps, et quelques-uns admettent encore, que ces particules sont creuses, remplies d'air saturé, et assez légères pour flotter dans l'air; on leur donne le nom de *vapeur vésiculaire*. Repoussée d'abord par Desagullicr, l'hypothèse de la vapeur vésiculaire a été mise en faveur par de Saussure, puis combattue de nouveau par Monge. Kratzenstein a fait de nombreuses observations sur la grosseur des prétendues vésicules et sur leurs propriétés optiques. Voici les principaux arguments que l'on invoquait pour en prouver l'existence : 1^o Les particules des brouillards rebondissent sur l'eau ou sur les corps secs; mais on sait qu'il en est de même de gouttes d'eau de plusieurs millimètres de diamètre; quand on frappe dans l'eau avec un bâton par un temps sec, on voit des gouttes rouler à la surface, sans se mêler au liquide. 2^o L'arc-en-ciel ne se produit pas dans les nuages comme dans les gouttes de pluie : c'est que les gouttelettes des nuages sont tellement petites que les pinceaux de rayons colorés qu'elles renvoient, comme nous le verrons dans l'optique, sont trop fins pour impres-

sionner l'œil. Ce qui prouve, en outre, que les particules qui composent les nuages et les brouillards ne sont pas creuses, c'est qu'elles rassemblent les rayons du soleil comme les lentilles, ce que l'on reconnaît à la loupe après les avoir arrêtés sur quelque corps léger. De plus, les nuages n'intercepteraient pas aussi complètement les rayons lumineux s'ils étaient composés de vésicules creuses; et enfin ces vésicules se resserreraient et se transformeraient bientôt en gouttelettes pleines, par la cohésion de l'eau pour elle-même, l'air intérieur passant au dehors après s'être dissous dans la pellicule liquide excessivement mince formant l'enveloppe (I, 460). L'existence de la vapeur vésiculaire n'est prouvée par aucun fait; elle n'est pas nécessaire pour expliquer les phénomènes; il est donc à désirer qu'on renonce unanimement à une hypothèse gratuite qui ne peut qu'entraver la marche de la science¹.

Récemment, M. J. Plateau a fourni un nouvel argument contre la vapeur vésiculaire. Il suspend dans une étroite éprouvette renversée, une colonne d'eau retenue par la pression atmosphérique, et il fait arriver contre la surface inférieure de cette colonne, le brouillard sortant par un gros tube, d'un vase contenant de l'eau en ébullition. Or les globules liquides n'introduisent aucune bulle d'air dans la colonne, tandis que de petites ampoules d'eau, de 1^m^m de diamètre et remplies d'air, mises en contact avec la colonne d'eau, s'y mêlent en laissant dégager une bulle d'air qui monte dans l'éprouvette².

1462. Des nuages et de leur forme. — Les nuages présentent des formes très-variées. On est parvenu cependant à les ramener à quelques types principaux. Howard et Lampadius ont distingué les formes suivantes, dont les plus importantes sont représentées dans la figure 1019. 1° Les *cumulus*, nuages à contours arrondis, comme amoncelés, et présentant une surface inférieure à peu près plane et horizontale. On les observe principalement quand il fait chaud; aussi sont-ils désignés souvent sous le nom de *nuages d'été*. 2° Les *stratus*, disposés en couches horizontales; ils apparaissent principalement au coucher du soleil, et disparaissent à son lever. 3° Les *cirrus*, qui présentent l'apparence de flocons légers irrégulièrement distribués; ils se montrent quand, après le beau temps, le baromètre commence à baisser, et le vent du sud à souffler. Les *cirrus* sont les nuages les plus élevés; leur hauteur peut dépasser 7,000^m; ils sont formés, comme on l'a souvent constaté dans les ascensions aérostatiques, de petits prismes de glace en suspension dans l'air. C'est, en effet, dans ces sortes de nuages qu'apparaissent les halos et les parhélies, météores produits par le jeu de la lumière dans de semblables prismes. 4° Les *nimbus*, nuages sombres très-étendus en tous sens et donnant de la pluie. Souvent ils sont limités d'une manière tranchée et terminés par des contours brillants (fig. 1019); souvent aussi ils couvrent toute l'étendue du ciel.

Entre les quatre types que nous venons de citer se placent d'autres variétés

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences, t. XLIX, p. 90.

² Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. XV, p. 284.

de nuages, que l'on désigne en associant les noms de ceux auxquels ils ressemblent le plus. Ainsi, l'on distingue les *cirro-stratus*, les *cumulo-stratus* et les *cirro-cumulus*. Quand ces derniers couvrent une assez grande étendue, on dit que le ciel est *pommelé*.

Pour bien distinguer la forme des nuages, il faut amortir leur trop grand éclat, en les regardant à travers un verre bleu, ou dans un miroir de verre noir. On distingue alors beaucoup de particularités qui échappent à la vue simple. Du reste, observés de près, les nuages ressemblent tout à fait à des brouillards, et les voyageurs qui voient dans les montagnes des nuages à contours bien arrêtés, sont tout étonnés en arrivant à leur niveau et en pénétrant dans leur intérieur, de ne plus leur trouver de limite tranchée.

La hauteur des nuages est très-variable. Un brouillard peut être regardé

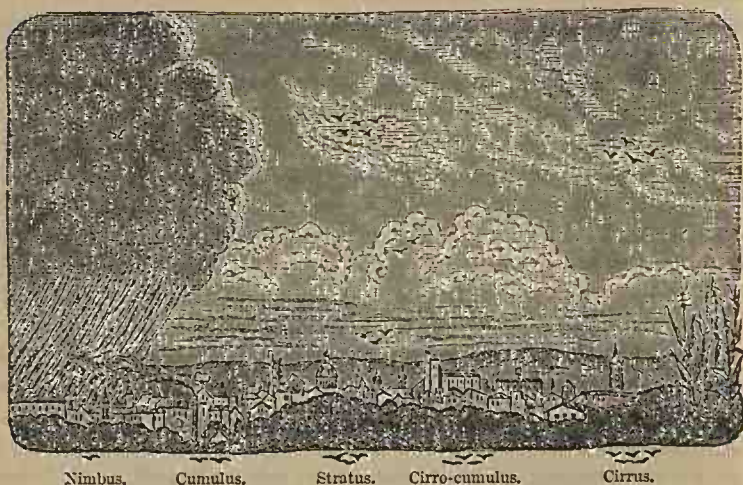


Fig. 1019.

comme un nuage qui touche la terre. On voit des nuages assez bas pour cacher le haut des édifices. Gay-Lussac, à 7,000^m de hauteur, voyait au-dessus de sa tête des cirrus qui lui semblaient à une hauteur de 5,000^m, ce qui fait en tout 12,000^m. A cette hauteur, la pression n'est que de 60^{mm}, et la température de -34° . La région où il se forme le plus de nuages est celle dans laquelle la température décroît le plus rapidement; nous avons vu (1383) qu'elle est placée à environ 3,000^m d'altitude.

1463. Formation des nuages. — Les vapeurs produites à la surface de la terre par la chaleur que fournit le soleil, tendent, par leur force expansive, à se répandre en tous sens, notamment de bas en haut, et à former une atmosphère de vapeur de densité décroissant avec la hauteur, et indépendante de celle que

forme l'air (I, 467). La présence de ce dernier gaz ne fait que ralentir la diffusion de la vapeur. Si la température était la même à toute hauteur, et si l'air était en repos, il finirait par s'établir un état d'équilibre, dans lequel chaque couche de vapeur aurait une force élastique égale au poids des couches supérieures. La pression h , dans chaque couche, pourrait se calculer au moyen de la formule $ne = \frac{1}{c} \log \frac{H}{h}$, dans laquelle ne est l'épaisseur de la couche, H la

pression à la surface du sol, et c une constante qui dépend du poids spécifique de la vapeur (I, 471). Mais, comme la température s'abaisse à mesure qu'on s'élève, il pourra se faire que la pression h , correspondant à une certaine hauteur, soit supérieure à la tension maximum de la vapeur à la température qui y règne. C'est précisément ce qui a lieu avec la loi du décroissement de la température donnée par l'observation (1382). La vapeur se condensera donc en gouttelettes dans les régions supérieures de l'atmosphère. De nouvelles vapeurs arriveront alors d'en bas, où la vapeur ne supporte plus un poids suffisant pour faire équilibre à sa force élastique, et il se formera un nuage. On voit qu'il n'y a pas lieu de chercher comment les gouttelettes montent, puisqu'elles ne se forment qu'après que l'eau qui les compose s'est élevée à l'état de vapeur invisible par la force expansive propre à tous les fluides élastiques. D'après les calculs de Saigey, si le décroissement de la température, quand on s'élève, était environ 4 fois plus lent, la vapeur ne se condenserait pas, et il ne se formerait pas de nuages.

Cette origine des nuages n'est pas la seule. Les vapeurs terrestres peuvent encore être transportées à une grande hauteur par les courants d'air ascendants que provoque l'échauffement du sol. Ces courants donnent naissance ordinairement à des *cumulus*; et souvent le ciel, pur le matin, en est rempli à midi. De Saussure explique les formes arrondies en-dessus des *cumulus*, par la pénétration dans les couches élevées, de la colonne d'air ascendante, dont ces nuages dessinent alors la limite supérieure. Entre les tropiques, les navigateurs reconnaissent la position des petites îles, par l'amas de nuages formés au-dessus. Dans nos climats, le cours des fleuves est quelquefois dessiné par une ligne de *cumulus* plus ou moins élevés.

Quand un vent rencontre une résistance, due aux reliefs du sol, à des forêts, au choc d'un autre vent, il s'élève par sa vitesse acquise, et forme ordinairement un *nimbus*.

Les causes qui refroidissent l'air humide déterminent aussi la formation de nuages. A la fin des journées chaudes, surtout après un temps de pluie, il se forme des nuages qui augmentent pendant la nuit, et se dissipent souvent le lendemain matin sous l'action de la chaleur solaire. On peut assister à cette formation des nuages quand on se trouve sur une montagne. Un vent froid qui arrive dans l'air humide, un vent chaud et humide qui pénètre dans l'air froid, donnent aussi lieu à une précipitation de vapeur.

Quand il fait chaud, on remarque souvent plusieurs étages de nuages

superposés, dont les plus élevés apparaissent les derniers; ce qu'il est facile d'expliquer : Dès qu'il s'est formé une couche de nuages, par les causes que nous venons d'énumérer, le soleil en échauffe la partie supérieure, et les gouttelettes se transforment en vapeur. Cette vapeur s'élève par expansion, parvient dans des couches plus élevées et plus froides, et se condense en formant un nouveau nuage. Ce dernier, échauffé à son tour par le soleil, produit de la vapeur, qui va se condenser encore plus haut.

On voit souvent des nuages se former dans les montagnes autour des sommets isolés. Ils sont produits par le refroidissement de l'air dans le voisinage des pics. Souvent ils sont emportés par le vent et se dissipent un peu plus loin dans un air plus chaud; mais ils sont sans cesse reproduits par l'air affluent, qui se refroidit à son tour, de manière que le nuage est permanent, mais constitué par des gouttelettes d'eau sans cesse renouvelées.

1464. De la suspension des nuages. — On s'expliquait difficilement autrefois comment les nuages se soutiennent dans l'air, et c'est pour cela qu'on avait imaginé la vapeur vésiculaire. Cette suspension est due à plusieurs causes : d'abord aux courants ascendants qui règnent pendant le jour, et l'on remarque que les cumulus qu'ils produisent s'élèvent vers midi et s'abaissent le soir. Ainsi, M. Kaemtz a vu, dans les montagnes, les nuages, au-dessous de lui dans la matinée, l'envelopper, puis s'élever au-dessus de sa tête, pour redescendre le soir. Le vent, qui entraîne les gouttelettes horizontalement, retarde aussi leur chute. Remarquons encore que souvent les particules des nuages tombent réellement; mais, une fois arrivées dans des couches d'air plus chaudes et non saturées, elles s'évaporent, de sorte que le nuage s'use, pour ainsi dire, par la partie inférieure, et finit souvent par disparaître complètement; de là la forme aplatie et horizontale des cumulus à leur partie inférieure, et les changements continuels de forme que présentent les nuages. Enfin, Fresnel a signalé une autre cause de suspension : la chaleur du soleil, en pénétrant leur masse, les dilate au point d'en former un ensemble, composé de gouttelettes séparées par de l'air chaud et saturé, qui possède une densité moindre que celle de l'air ambiant.

1465. DE LA PLUIE. — Les nuages que l'on voit flotter dans l'air ne donnent pas généralement de pluie. La pluie vient ordinairement de *nimbus*, qui la produisent dès le moment de leur formation. Il peut cependant arriver qu'un cumulus donne de la pluie, quand, l'air étant très-humide, les gouttelettes qui le composent grossissent par la condensation de nouvelles vapeurs, et finissent par tomber. Souvent les petites gouttes ainsi formées disparaissent, en s'évaporant, avant d'arriver à terre; de loin, on aperçoit alors des traînées dirigées de haut en bas et n'arrivant pas jusqu'au sol.

Théorie de Hutton. — La formation des *nimbus* peut provenir de plusieurs causes. Hutton, dès 1784, les expliquait au moyen du principe suivant : quand deux masses égales d'air, saturées et à des températures différentes se rencontrent, la température moyenne du mélange est trop faible pour qu'il puisse contenir

toute la vapeur des masses d'air réunies, la tension maximum de la vapeur décroissant beaucoup plus vite que la température (1177); ce qui fait que l'air le plus froid, en s'échauffant, prend moins de vapeur pour achever de se saturer, que l'air le plus chaud n'en abandonne en se refroidissant du même nombre de degrés. Il y aura donc précipitation de vapeur. Le même résultat pourra avoir lieu, si les deux masses d'air, sans être saturées, sont très-humides. Quand deux vents opposés se rencontreront dans les régions élevées de l'atmosphère, il pourra donc se former un *nimbus*, et il tombera de la pluie, les gouttelettes grossissant rapidement. Les gouttes, en tombant, se réunissent les unes aux autres, de manière à devenir de plus en plus grosses; si bien que l'on peut juger de la hauteur d'où vient la pluie, par leur grosseur. Des gouttes très-fines indiquent que la pluie vient d'une faible hauteur.

Théorie de Babinet. — Ce mode de formation des *nimbus* ne suffit pas pour expliquer la fréquence du phénomène de la pluie. Babinet en a indiqué un autre qui permet de rendre compte d'une foule de particularités relatives à ce météore¹. Quand le vent rencontre un obstacle, l'air en mouvement s'élève, par un effet analogue à celui du bélier hydraulique; il se refroidit en se raréfiant et en se mêlant aux couches supérieures plus froides, et dépose toute la vapeur qui dépasse la quantité nécessaire à la saturation. On voit pourquoi le vent de mer donne de la pluie: retardé par la résistance qu'oppose à sa marche le relief des côtes, les arbres, les collines...., il fait obstacle à la marche de l'air affluent, et ce dernier s'élève, se refroidit et donne d'autant plus de pluie qu'il est plus chaud et plus humide. C'est ainsi que, en France, les vents d'ouest fournissent les pluies qui arrosent les bassins des fleuves qui se jettent dans l'Océan.

Quand un vent humide rencontre le flanc d'une montagne, l'air en mouvement s'élève en se refroidissant, et dépose ces neiges éternelles, où la plupart des grands cours d'eau prennent leur source. C'est ainsi que, dans les Alpes, les vents d'ouest donnent naissance au Rhône et au Rhin, et le vent d'est, au Danube. Le refroidissement de l'air qui s'élève sur le flanc des montagnes, a été souvent constaté; entre autres, dans les Pyrénées, par M. Rozet, qui vit par un vent qui remontait une pente bien graduée, un thermomètre placé en haut être toujours beaucoup plus bas qu'un autre placé au pied de la pente.

On peut expliquer par les mêmes principes pourquoi la pluie succède fréquemment au vent. Supposons qu'un vent d'aspiration règne depuis quelque temps, et que la cause qui le produit cesse d'agir, l'air affluent se pressera sur la masse d'air qui s'est arrêtée, s'élèvera et déposera la vapeur qu'il contient. On voit que le proverbe : *petite pluie abat le vent*, doit être renversé; car c'est la cessation du vent qui provoque la pluie. — Le relèvement des masses d'air, à la rencontre d'un obstacle formé par d'autre air, est mis en évidence d'une manière frappante dans l'observation suivante : M. Trémaux, étant monté sur la plus grande pyramide d'Égypte, du côté où soufflait un vent violent, trouva un calme complet

¹ Babinet, *Études et lectures sur les sciences d'observation*, t. II, p. 209.

sur le sommet. L'air, en se relevant sur le flanc de la pyramide, formait un obstacle au vent supérieur; en effet, divers corps lancés contre le vent, s'élevèrent, puis furent ramenés en cercle par-dessus la tête de l'observateur, et emportés de l'autre côté de la pyramide.

Les tornados, dans lesquels monte une colonne d'air chaud et humide (1434), donnent aussi naissance à des pluies abondantes. Ils peuvent, ainsi que le principe de Hutton, rendre compte des pluies soudaines, et de la formation rapide des *nimbus* au milieu d'une atmosphère sereine.

1466. Pluies singulières. — On voit quelquefois la pluie tomber sans qu'il y ait d'apparence de nuage au ciel. De Humboldt on cite plusieurs cas observés entre les tropiques; depuis, on en a constaté des exemples dans toutes les parties du monde. Babinet a observé une pluie sans nuage, à Paris. Le phénomène ne dure ordinairement que quelques instants; on l'attribue à une condensation de vapeur assez rapide pour que les gouttelettes atteignent immédiatement un assez grand diamètre; mais on comprend difficilement quelles peuvent être les conditions d'une condensation aussi brusque.

Serein. — Le serein est une pluie fine sans nuage, qui tombe pendant quelques instants à la fin de certaines journées chaudes et humides. Il est dû au refroidissement de l'air après le coucher du soleil. Comme les gouttes sont ici très-petites, on n'éprouve pas de difficulté à en concevoir la formation.

Quelquefois la pluie est accompagnée de différentes substances qu'elle enlève à l'atmosphère et qui lui donnent des apparences diverses, dont les populations ont été souvent effrayées. Ces substances sont des cendres volcaniques, des poussières rouges apportées des déserts par les vents, du pollen de divers végétaux, souvent de pins... On a ainsi les pluies dites de boue, de sang, de soufre... Dans les temps d'orage, il se produit d'autres phénomènes singuliers, sur lesquels nous reviendrons en traitant des météores électriques.

1467. DE LA NEIGE. — Quand un *nimbus* se forme dans un espace très-froid, la vapeur se condense à l'état solide, sans passer par l'état liquide, comme dans la formation du givre, en donnant naissance à une multitude de productions cristallines, qui s'accrochent les unes aux autres, et tombent lentement à cause de leur légèreté; on a alors de la *neige*. Souvent cette neige fond avant d'arriver à terre, et l'on a vu quelquefois la pluie tomber dans la plaine, pendant que, du même nuage, il tombait de la neige sur la montagne.

On peut, dans certaines circonstances, observer directement la précipitation de la vapeur à l'état solide. En 1737, les académiciens français, occupés à la mesure d'un arc du méridien en Laponie, voyaient l'atmosphère chaude et humide de leur chambre se remplir de particules de glace flottantes, dès que, en ouvrant la porte, ils laissaient entrer l'air extérieur, très-froid. De semblables observations se font souvent en Sibérie et même, quelquefois, dans nos climats. On voit que la neige est à la pluie ce que le givre est à la rosée. Sénèque dit que « la neige est une congélation flottante de la nature des gelées blanches. »

Forme de la neige. — Les flocons de neige sont composés de petites étoiles

cristallines accrochées les unes aux autres, et les flocons sont d'autant plus gros que la neige vient d'une plus grande hauteur. Ces petites étoiles présentent une régularité et une variété de forme merveilleuses, qui avaient excité l'admiration de Kepler. Elles présentent 3, 6 ou 12 parties symétriquement disposées autour d'un axe ou d'un point, et faisant entre elles des angles égaux. Pour les observer, il suffit de recevoir la neige, par un temps froid et sec, sur du drap noir. Quelquefois, elles ont jusqu'à 5^{mm} de diamètre; d'autres fois, on ne les distingue qu'avec une forte loupe. On en a observé de plusieurs centaines de formes différentes. Scoresby, qui en a dessiné 96 dans les régions polaires, les ramène à 5 types principaux, dont la figure 1020 montre quelques spécimens :

1° Des lamelles minces transparentes, telles que *a*, *b*, *c*, *e*, *f*, *h*, *i*, *k*; dans toutes, les lignes parallèles aux côtés de l'hexagone sont d'un blanc mat. La forme *a* est la plus commune dans nos climats; elle se présente surtout quand

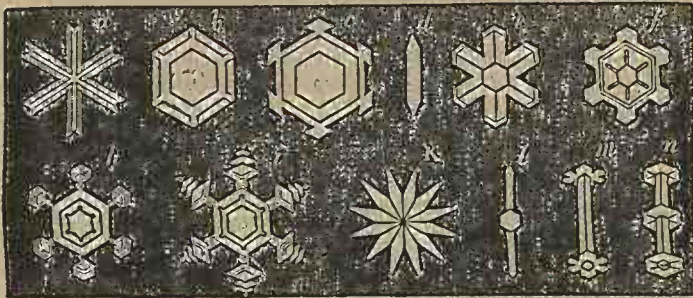


Fig. 1020.

la température diffère peu de 0°. Les figures *b* et *c* s'observent à des températures très-diverses; plus il fait froid, plus les lamelles sont minces et délicates; elles peuvent avoir 0,2 à 0,3 millimètres de diamètre; *d* en est une coupe transversale. Les formes *e* et *f* s'observent par les froids intenses.

2° Des lamelles hérissées d'aiguilles sur une seule face ou sur les deux, pouvant avoir jusqu'à 5^{mm} de diamètre; ou bien un noyau opaque ou transparent hérissé d'aiguilles dans tous les sens ou dans un seul plan. On voit en *l* la coupe d'un cristal de ce dernier genre.

3° Des prismes très-menus à 3 ou 6 pans, transparents ou opaques. Il y en a qui sont aussi fins qu'un cheveu, avec une longueur de 4 à 5^{mm}.

4° Des pyramides régulières à 6 faces. Scoresby n'en a vu qu'une seule fois.

5° Des prismes présentant, à l'une des extrémités ou aux deux, des lamelles hexagonales, comme *m* et *n*.

Pour que les étoiles de neige soient bien régulières, il faut que l'air soit calme, froid et sec. Dans le cas contraire, les aiguilles sont mal conformées, opaques ou brisées. Les étoiles de glace semblent se former successivement :

quand la neige prend naissance par un temps très-froid, elle forme une poussière blanche qui laisse distinguer au microscope de petits tétraèdres réguliers. Quand ces petits cristaux traversent des couches humides, la vapeur dépose sur leurs faces des molécules qui prennent les dispositions régulières dont nous venons de parler. — On peut assister à la formation des étoiles de neige en soufflant des balles de savon par un temps très-froid; on voit de petites aiguilles se former dans la pellicule d'eau et s'implanter les unes sur les autres, en prenant des dispositions régulières variées.

1468. Particularités que présente la neige. — Grésil. — Quand l'air est agité, des parcelles octaédriques se groupent de manière à former de petites masses spongieuses, opaques ou demi-transparentes, auxquelles on donne le nom de *grésil*. Quelquefois, les grains sont couverts d'une couche de glace transparente qui indique un commencement de fusion suivie d'une nouvelle congélation; d'autres fois, les grains ont une forme conique, et l'on distingue, dans l'intérieur, des rayons qui partent du sommet. Dans nos climats, le grésil tombe ordinairement au commencement du printemps.

Verglas. — Quand la neige répandue sur le sol fond en partie et se congèle ensuite, elle forme une espèce de glace dure de structure irrégulière, à laquelle on donne le nom de *verglas*. On désigne aussi sous ce nom la couche de glace qui se forme quand, au moment d'un dégel, la pluie tombe en petite quantité sur la terre nue et encore glacée.

Neige rouge. — La neige présente quelquefois une couleur d'un rouge vif. Ce phénomène a été observé par de Saussure sur les montagnes des Alpes; il a reconnu que la couleur était due à une poudre fine mêlée à la neige jusqu'à une profondeur de 6 à 8^{mm} seulement. On a vu aussi de la neige rouge dans les régions voisines de l'un et de l'autre pôle. M. Francis Bauer a reconnu que la poudre rouge n'est autre chose qu'un petit champignon microscopique du genre *uredo*, auquel il a donné le nom de *uredo nivalis*. Il a pu, au moyen de la poudre rouge rapportée du pôle nord par le capitaine Ross, voir ce champignon se reproduire et multiplier dans l'eau, mais en donnant des individus blancs ou verdâtres. Ce n'est qu'en opérant dans la neige, qui paraît être leur *milieu naturel*, qu'il leur a vu prendre la couleur rouge. Pline paraît avoir observé la neige rouge, car il dit que la neige rougit en vieillissant.

Il tombe quelquefois de la neige présentant une teinte rouge; mais ici cette couleur est due à une poussière minérale, de même origine que celle qui colore quelquefois la pluie (1466).

1469. Quantité annuelle de neige. — Cette quantité est d'autant plus grande qu'on se rapproche davantage du pôle. A l'équateur, on n'en voit jamais au niveau de la mer. Dans nos climats, la neige ne tombe que pendant trois mois, et elle forme $\frac{1}{20}$ de la quantité annuelle de pluie. A la latitude de Pétersbourg, elle en forme $\frac{1}{3}$. On admet généralement qu'une couche de neige représente une couche d'eau 12 fois moins épaisse; mais la densité de la neige, très-variable suivant la température et la grosseur des flocons, varie de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{8}$.

De plus, il est difficile d'en apprécier l'épaisseur, qui peut être différente en divers points même rapprochés, le vent tendant à la pousser dans les parties déclives du sol. Le mieux est de la recevoir sur un évaporomètre à bascule (1455), comme on le fait à l'Observatoire de Montsouris, et d'en évaluer le poids.

La neige ne tombe, dans nos climats, que par les froids modérés. On n'en voit guère quand la température est au-dessous de -12° ; c'est que par les grands froids règnent les vents du nord, qui s'échauffent et se dessèchent quand ils arrivent dans des régions moins froides.

La neige répandue sur le sol préserve les plantes du froid, par sa mauvaise conductibilité. M. Rozet a vu un thermomètre placé sous la neige ne varier que de 0° à -2° , pendant qu'un autre, suspendu dans l'air, variait de -1° à $6^{\circ},5$. Un thermomètre plongé dans une rigole creusée dans la neige marquait 1° de moins que celui qui était caché sous la neige. Une simple feuille de papier blanc placée sur la rigole remplaçait une couche de neige de 5^{cm} . Teissier a constaté, pendant l'hiver rigoureux de 1789, que la terre s'était gelée jusqu'à 60^{cm} de profondeur sous la neige, et jusqu'à 92^{cm} dans des places toutes voisines, d'où le vent l'avait enlevée.

1470. DES BROUILLARDS. — Les brouillards ne sont que des nuages appuyés sur le sol. Ils se forment par abaissement de la température de l'air, ou par l'arrivée d'un vent chaud dans les couches inférieures plus froides. Quand le brouillard est très-épais, il porte le nom de *brume*. Quand la condensation de la vapeur est assez abondante pour que les gouttelettes tombent à mesure qu'elles se forment, on dit qu'il *bruine*. L'observateur assiste alors à la formation même de la pluie; seulement, les gouttes sont très-fines, parce qu'elles viennent de se former. Il y a des brouillards assez épais pour produire une obscurité complète en plein midi; on en voit de semblables à Londres, à Paris, à Amsterdam...

Brouillards locaux. — Indépendamment des brouillards généraux qui couvrent en même temps de vastes régions, il existe des brouillards moins étendus qui se forment chaque jour, en certaines saisons, après le coucher du soleil, sur les lacs et les rivières ou dans les prairies basses et humides, ou bien encore sur mer, à proximité des côtes. Ces brouillards s'expliquent par le refroidissement de l'air au contact du sol, dont la température s'abaisse par rayonnement. Cet air descend sur la surface moins froide de l'eau ou des prés, et, se mêlant à l'air très-humide qui les recouvre, en précipite la vapeur.

Des expériences directes ont fait voir, en confirmation de cette explication, que l'eau est, en effet, plus chaude que l'air, lorsque de semblables brouillards se forment. Ces brouillards disparaissent ordinairement après le lever du soleil. Au printemps, quand ils remplissent le fond des vallées, on les voit s'élever, sous l'influence de la chaleur du soleil, gagner le haut des collines qui jusque-là les dominaient, puis monter et former des nuages, ou bien se dissiper par l'effet de la chaleur croissante.

Pendant l'été et l'automne, quand l'air est calme et quelque temps avant le lever du soleil, on voit aussi se former à la surface des eaux de véritables petits

nuages, qui sont entraînés par un courant ascendant que détermine la chaleur de l'eau, et se réunissent à une certaine hauteur, ou se dissipent si l'air est sec. — Il peut se former des brouillards au moment du dégel, quand un vent chaud se refroidit au contact du sol encore glacé. Pendant l'été, on voit aussi des brouillards se former sur les rivières après les fortes pluies d'orage, la pluie, très-froide parce qu'elle vient du haut de l'atmosphère, refroidissant la surface des eaux, dont le contact détermine la précipitation de la vapeur de l'air.

1-171. Brouillards secs. — On a observé plusieurs fois des brouillards qui n'affectent pas l'hygromètre, déterminent une évaporation assez rapide pour être préjudiciable aux plantes, et à travers lesquels le soleil paraît d'un rouge vif. En 1783, un brouillard semblable s'étendit sur toute l'Europe, et persista pendant plus d'un mois. En 1831, un autre brouillard sec a été observé en France, sur les côtes d'Afrique et jusqu'en Amérique, à différentes dates du mois d'août. On attribue ces sortes de brouillards à des poussières impalpables apportées par les vents d'Afrique, ou bien provenant de cendres volcaniques. En effet, le brouillard sec de 1783 fut précédé, un mois auparavant, par les éruptions des volcans d'Islande et par les tremblements de terre de la Calabre, où périrent plus de 40,000 habitants, sous les débris des montagnes et des édifices et dans les crevasses dont le sol fut sillonné; des volcans nouveaux surgirent dans la mer, près de l'Islande, et lancèrent une fumée épaisse qui persista jusqu'à la fin de juillet. A Gleicken, en Saxe, il sortit de terre une fumée fétide qui dessécha les plantes, et se répandit jusque sur l'Adriatique.

1-172. Brouillards glacés. — Dans les régions polaires, on voit se former au-dessus des eaux des brouillards épais composés d'aiguilles de glace extrêmement fines, mais cependant visibles, parce qu'elles réfléchissent vivement la lumière. Ces aiguilles s'accrochent à tous les corps. Elles se produisent en France par les grands froids, et sont désignées sous le nom de *flèches glaciales*, *spicula*. M. Fournet en cite plusieurs cas¹. En 1820, il observa à Strasbourg un brouillard glacé qui donnait à l'atmosphère un éclat singulier, et qui, en se déposant sur la tour de la cathédrale, l'enveloppa d'une sorte de duvet éclatant qui faisait ressortir merveilleusement les délicates sculptures qui la décorent. M. Fournet a reconnu que la précipitation à l'état solide a lieu de — 12° à — 15°. A une température moins basse, la précipitation se fait à l'état liquide; ce qui se conçoit d'après ce que nous savons du froid que supportent les fines gouttelettes d'eau sans se congeler (1101). — Il est probable que la neige se forme à une température tout aussi basse.

Cirrus. — Quand des brouillards glacés prennent naissance dans les régions supérieures de l'atmosphère, ils forment des *cirrus*. Les aéronautes se sont souvent trouvés dans de semblables *nuages* de particules glacées. Dans une ascension faite à Kew, en 1852, on a constaté que leur température était de — 10°,5 et de — 15°; ce qui rentre dans les limites assignées par M. Fournet.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLVI, p. 203.

IV. Distribution de l'eau atmosphérique à la surface du globe.

1-173. De l'arrosage du globe. — La surface du globe est aux trois quarts recouverte par les eaux. Les terres seraient constamment sèches et arides sans l'évaporation qui se fait à la surface des mers sous l'influence de la chaleur solaire, et qui donne naissance aux nuages, qui versent sur la terre l'eau nécessaire à son irrigation. Une première portion de cette eau s'évapore, une seconde pénètre dans le sol et donne naissance aux sources, une troisième coule sur les pentes, se rend dans les parties basses, et alimente les lacs ou les rivières. Les neiges, accumulées sur les montagnes, glissent en avalanches dans les vallées transversales et forment les glaciers, dont la fonte donne naissance aux sources de la plupart des grands cours d'eau.

C'est surtout à l'état de pluie que l'eau atmosphérique vient arroser le globe. La rosée ne fournit qu'une quantité d'eau insignifiante; mais son rôle n'en est pas moins important, car elle atténue les effets du rayonnement nocturne sur les végétaux, et leur fournit une humidité précieuse dans les contrées privées de pluie. Les brouillards agissent de la même manière; de plus, dans certains pays froids, ils adoucissent la température en empêchant le rayonnement vers l'espace. La neige ne fournit



Fig. 1021.

que peu d'eau, mais elle protège le sol contre le froid (1469).

1-174. Mesure de la quantité de pluie. — Les instruments dont on se sert pour évaluer l'épaisseur de la couche d'eau qui tombe en un lieu à l'état de pluie se nomment *pluviomètres*, *udomètres*, *ombromètres* ou *hyétomètres*. Le plus simple consiste en un vase cylindrique (fig. 1021) portant un tube latéral gradué *t*, dans lequel on aperçoit le niveau de l'eau. L'ouverture du vase est fermée par un entonnoir *a*, qui empêche l'évaporation. Le zéro de l'échelle correspond à une cloison percée *c*, au-dessous de laquelle on laisse toujours de l'eau. — Quelquefois, l'ouverture de l'entonnoir est beaucoup plus grande que la section du vase cylindrique. Alors on divise la hauteur de l'eau recueillie, par le rapport entre les deux surfaces, et l'erreur de lecture est ainsi atténuée. Dans certains pays, il tombe quelquefois, en peu de temps, de telles averses, que le pluviomètre ne suffit pas à recueillir toute l'eau et déborde. Pour éviter cet inconvénient, on adapte à l'instrument un siphon disposé comme celui du vase de Tantale (I, 431), et qui s'amorce et vide l'appareil dans un vase à part, quand le niveau est arrivé à la courbure supérieure du siphon.



Fig. 1022.

La fig. 1022 représente l'udomètre de Babinet : l'eau qui tombe dans le

réservoir surmonté d'un entonnoir est mesurée dans une éprouvette *e*, graduée d'après le rapport entre les sections de l'éprouvette et de l'entonnoir, dont on connaît aussi l'aire de l'ouverture.

Le pluviomètre totalisateur de M. H. Mangon consiste en un udomètre de Babinet, dont l'entonnoir est séparé du réservoir par un cylindre de verre vertical, gradué et ayant de 60 à 70^{cm} de longueur. La pluie de chaque jour est mesurée dans ce cylindre, puis introduite par un robinet dans le réservoir. A la fin du mois, on mesure, dans une éprouvette graduée, la quantité d'eau accumulée dans ce dernier, et le nombre obtenu doit être égal à la somme des quantités recueillies chaque jour.

Citons encore l'udomètre de M. Rousseau, dont la construction économique a été imaginée pour répandre le plus possible les observations pluviométriques. Il

se compose d'un entonnoir de zinc à bord de zinc travaillé au tour, et que l'on pose sur l'ouverture d'un seau à bec, qui reçoit l'eau de la pluie. On mesure ensuite cette eau, en la versant dans une éprouvette graduée.

M. Flaugergues a imaginé un udomètre qui indique séparément les quantités de pluie qui tombent pendant chacune des directions principales du vent. L'entonnoir de cet instrument est mobile autour d'un axe vertical, et muni d'une lame qui fait fonction de girouette. Un tube des-

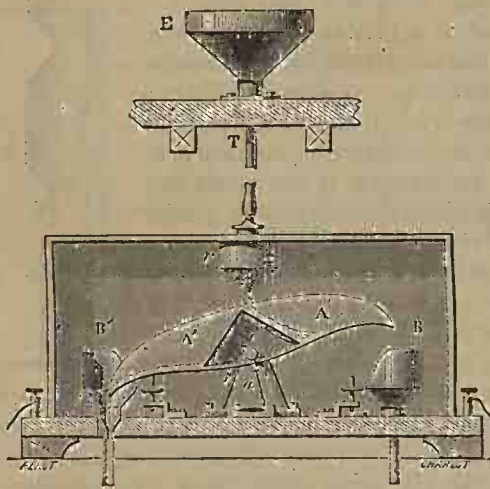


Fig. 1023.

cent verticalement, du fond de l'entonnoir, et se recourbe à angle droit dans le plan de la girouette. Ce tube dirige l'eau de la pluie dans l'un des huit compartiments égaux d'une couronne disposée comme celle de la figure 982. On mesure ensuite l'épaisseur de la couche d'eau déposée dans chaque compartiment.

1475. Udomètres enregistreurs. — La fig. 1023 représente un appareil construit par M. Salleron, et qui se relie à l'enregistreur (fig. 994). La pluie, reçue dans l'entonnoir E, tombe dans un double bassin AA' pouvant basculer autour d'un axe horizontal, au-dessus duquel est placé le centre de gravité du système. Quand le compartiment A' a reçu 40^{gr} d'eau, son poids l'emporte : il s'abaisse et verse son eau dans le tube B'. L'eau de la pluie tombe alors dans le compartiment A, qui s'abaisse à son tour et verse son eau dans le tube B,

quand il en a reçu 40^{sr}. Ce système de bascule a été appliqué pour la première fois à l'udométrie, par Horner.

Si l'eau tombait directement dans les compartiments, le choc du liquide en ferait rejaillir une partie, et pourrait faire basculer le système avant qu'il n'eût reçu les 40^{sr} d'eau. M. Salleron évite ces inconvénients en recevant d'abord l'eau de la pluie dans un petit réservoir *r*, d'où elle ne sort que goutte à goutte par un orifice capillaire. L'aire de l'entonnoir *E* étant de 400 centimètres carrés, et les 40^{sr} d'eau représentant sensiblement 40 centimètres cubes, on voit facilement que chaque oscillation verse en *B* ou *B'* le volume d'eau qui correspond à une couche de pluie de 1^{mm} d'épaisseur.

Pour enregistrer la quantité tombée au bout d'un certain temps, il suffit de marquer le nombre des oscillations du système *AA'*. Or, à chacune de ces oscillations, une aiguille *a* vient fermer le circuit d'une pile, en plongeant dans du mercure que contient une cavité située au-dessous de l'axe. Le courant électrique passe alors un instant dans un des électro-aimants de l'enregistreur (fig. 994), et un point est marqué sur le cylindre tournant.

Un autre udomètre enregistreur, décrit dans l'*Annuaire de l'Observatoire de Montsouris*, consiste en un vase cylindrique *P* dans lequel l'eau de la pluie arrive par un tube. Cette eau soulève un flotteur muni d'une tige verticale dentée maintenue entre deux galets. Cette tige mène une roue à dents dont l'arbre porte un excentrique en colimaçon *d*, qui soulève un levier *Ab* dont l'extrémité trace une courbe sur un cylindre vertical tournant *c*. Quand la pointe est arrivée au haut du cylindre, le levier retombe et recommence une nouvelle excursion.

A cet appareil est joint un système de glaces un peu concaves et inclinées en toit, destinées à recueillir l'eau qui doit être analysée, pour la recherche des matières étrangères dont elle s'est souillée en lavant l'atmosphère.

1476. Influence de l'élévation de l'udomètre. — Il arrive assez souvent que deux udomètres identiques, exposés en un même lieu à des hauteurs différentes, ne recueillent pas la même quantité d'eau, le plus élevé en contenant moins que l'autre. A l'observatoire de Paris, de 1817 à 1838, l'épaisseur moyenne de la couche d'eau reçue dans un udomètre placé dans la cour, a été

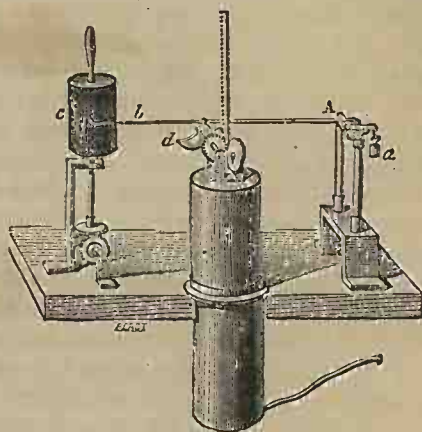


Fig. 1024.

de 57^m, tandis qu'un instrument identique placé sur la terrasse, à 28^m plus haut, n'en avait reçu que 50. Des résultats semblables ont été observés par M. Heberden, aux tours de l'abbaye de Westminster. MM. Philipp et Grey, en 1831, placèrent un udomètre sur la tour de la cathédrale d'York, élevée de 61^m, un autre à une hauteur de 10^m, et un troisième sur le sol, loin de tout bâtiment; ils trouvèrent pendant plusieurs années, pour les trois udomètres, des moyennes entre elles comme 14, 19 et 25.

Pour expliquer ce phénomène, on a pensé d'abord que les gouttes grossissaient pendant leur chute, en condensant à leur surface très-froide l'humidité de l'air qu'elles traversaient. Mais il faudrait alors, pour le cas de l'Observatoire de Paris, que l'accroissement fût de plus de 0,1; c'est 7 ou 8 fois plus qu'il n'est vraisemblable dans le parcours d'une hauteur de 28^m. De plus, il doit arriver souvent que les gouttes traversent des couches d'air de plus en plus sèches. On a ensuite invoqué l'influence du vent qui, plus fort au sommet des édifices que près de terre, doit entraîner la pluie plus obliquement dans l'udomètre le plus élevé; mais il est facile de voir que les lignes que suivent les gouttes d'eau se rapprochent d'autant plus qu'elles marchent plus obliquement. — On a encore dit que le vent, en se divisant autour de l'appareil, produisait des remous et éprouvait, tant sur les côtés qu'en dessus, des augmentations de vitesse, d'où résulterait l'éparpillement des gouttes d'eau en dehors de l'appareil. M. Maille a principalement développé cette explication, qui nous semble la meilleure, et l'a appuyée sur des observations nombreuses¹. Il a remarqué aussi que l'édifice même sur lequel se trouve l'un des udomètres, produit des remous et des changements de vitesse du vent. M. Maille propose donc de placer l'udomètre près du sol, et d'éloigner l'entonnoir, réuni à l'instrument par un long tube vertical.

1477. Répartition des pluies à la surface du globe. — L'étude des quantités de pluie qui tombent annuellement et pendant les différentes saisons, est un des points les plus importants de la climatologie. Les premières observations suivies ont été faites par Sedileau, en 1688, à la demande de Louvois. Cette étude est appelée à rendre de grands services à l'agriculture, surtout quand il s'agit d'introduire de nouvelles cultures. Par exemple, on a voulu essayer de cultiver le cotonnier dans les provinces d'Alger, d'Oran et de Constantine; on a obtenu une récolte admirable dans l'un de ces points, médiocre dans un autre, et presque nulle dans le troisième. Cette différence provient simplement des époques différentes des pluies dans les trois provinces. Si les colons eussent été avertis de cette circonstance, ils auraient évité des essais ruineux. — Après les désastreuses inondations de la Saône, en 1840, on a institué une commission chargée de mesurer la quantité de pluie qui tombe dans le bassin de cette rivière, et au moyen des résultats fournis par l'udomètre, on peut annoncer l'arrivée des crues, et même indiquer, à quelques décimètres près, la hauteur que doit atteindre l'eau. Les inondations qui ont ravagé, en 1855, les départements

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. XXXIII, p. 602.

traversés par nos grands cours d'eau, l'inondation désastreuse de la Garonne en juin 1875, ont fait comprendre plus que jamais l'utilité de semblables observations. — Nous empruntons à de Gasparin une partie de ce qui suit ¹.

Pluies entre les tropiques. — Entre les tropiques, les pluies sont soumises à une périodicité annuelle régulière, et la théorie de Babinet (1465) rend compte de la manière la plus heureuse de leur répartition.

Dans l'Océan Atlantique, partout où règnent les vents alizés, il n'y a pas de pluie; mais il pleut souvent dans la région des calmes. Les alizés rencontrent ensuite la côte nord-est de l'Amérique méridionale, s'élèvent, et donnent des pluies qui alimentent l'Amazone et l'Orénoque. Ils franchissent ensuite la Cordillère du Pérou, et descendent dans la plaine de Lima, où il ne pleut jamais, parce que l'air, déjà privé d'une partie de son humidité, s'échauffe et se dessèche en s'abaissant. Dans le Grand-Océan, les alizés prennent de nouvelles vapeurs, remontent les côtes orientales de la Chine et y déposent d'immenses cours d'eau. Ils traversent ensuite l'Océan Indien, se heurtent aux montagnes de l'Abyssinie, et donnent les pluies qui produisent les inondations du Nil; ils passent ensuite, à l'état de vent sec, sur les parties centrales de l'Afrique.

1478. Zones des pluies. — Les météorologistes distinguent plusieurs zones d'après la distribution des pluies suivant les saisons. La première est la zone à deux périodes de pluies annuelles, tendant à se confondre de manière à former des pluies continues; elle s'étend le long de l'équateur. Puis viennent deux zones à pluies *semi-annuelles*, s'étendant de l'équateur à l'un et à l'autre tropique; on y distingue la *saison des pluies*, qui dure 6 mois, mais se réduit à 3 mois en se rapprochant du tropique. Cette saison commence en un lieu, quand le soleil passe à son zénith. La *saison sèche* se montre quand le soleil se trouve du côté opposé de l'équateur. De Humboldt rend compte de ces faits de la manière suivante : le soleil échauffe la zone torride, surtout dans l'hémisphère où il se trouve; il y a donc appel d'air du pôle voisin et de l'équateur. La rencontre de ces deux courants, l'un froid, l'autre chaud et humide, produit une précipitation abondante de vapeur. Dans l'autre hémisphère, au contraire, l'air parcourant des régions de plus en plus échauffées, on a la saison sans pluie. Dans les Indes, la saison des pluies a lieu pendant la mousson du sud-est; l'air, soulevé par le versant méridional de l'Himalaya, se refroidit, et la vapeur qu'il contient se précipite et alimente le bassin du Gange. La mousson d'automne amène, au contraire, la saison sèche.

En dehors de la zone torride, la périodicité des pluies n'offre plus la même régularité. De Gasparin est parvenu cependant à saisir la marche générale du phénomène. — En s'éloignant de l'équateur à travers l'Atlantique, on trouve toujours le maximum de pluie en été jusque vers la latitude de 30°, où les vents du sud-ouest s'abaissent (1429), se mêlent à un air plus froid, rencontrent un sol moins échauffé, et précipitent beaucoup de vapeur. Plus on s'avance vers le

¹ Bibliothèque britannique (Sciences et arts), t. XXXVIII, p. 54, 263.

nord, plus les pluies sont fréquentes hors de l'été, et l'on finit par trouver une zone dans laquelle il pleut également en toutes saisons.

En approchant davantage du pôle, on trouve une zone à pluies *hyémales*, signalée par de Buch sous le nom de *zone subtropicale*. Là, les vents polaires dominent, s'échauffent et se dessèchent en allant vers le sud, ce qui produit un climat relativement sec, surtout pendant l'été, où le soleil reste constamment sur l'horizon. Pendant l'hiver, au contraire, les vents du sud donnent de la pluie en rencontrant des régions où le soleil ne paraît plus. Cet état de choses se montre déjà au nord des Iles britanniques, en Islande et au nord de la Sibérie.

La répartition des pluies est à peu près la même que dans l'Atlantique, au nord de l'ancien continent, à partir de la région où dominent les vents du sud-ouest (1430). Mais, plus près de la bande équinoxiale à pluies d'été, on trouve une bande sèche formée par les déserts de l'Afrique, puis vient une bande à pluies d'hiver, les vents du sud ne précipitant leur vapeur, peu abondante, que par leur rencontre avec les vents du nord, fréquents surtout en hiver. On doit à M. Fournet un Mémoire remarquable sur les zones sans pluie et les déserts¹.

1479. Quantité annuelle de pluie en différents lieux. — Pour obtenir des moyennes annuelles certaines, il faut réunir les observations d'un grand nombre d'années; car il suffirait d'une averse exceptionnelle pour doubler la moyenne d'une année.

On peut dire que, en général, la quantité *annuelle* de pluie va en diminuant quand la latitude s'élève, comme on le voit dans le tableau qui suit. Mais cette loi souffre de nombreuses exceptions provenant des influences locales : direction habituelle du vent, voisinage et orientation des chaînes de montagnes, proximité et configuration des côtes, altitude.

LATITUDE	LIEUX	QUANTITÉ de pluie en millimètres	LATITUDE	LIEUX	QUANTITÉ de pluie en millimètres
5°, 5'	Christianborg (Guinée)	549,0	37° à 43°	Italie, S. de l'Apennin.	930,0
7,35	Kandy.....	1864,9	43 à 47	Vallée du Rhône.....	781,9
12,25	Sringapatam.....	601,6	45 à 47	Italie, N. de l'Apennin.	1336,9
18,56	Bombay.....	2350,0	43 à 47	France septentrionale.	656,8
22,33	Calcutta.....	1928,6	45 à 54	Allemagne.....	678,0
23,90	La Havane.....	2320,7	50 à 56	Angleterre.....	784,0
29,57	Nouvelle-Orléans....	1270,0	55 à 62	Scandinavie.....	478,0
32,27	Madère.....	757,0	60	Bergen.....	2250,0
36,47	Tunis.....	1992,0	55 à 60	Russie.....	403,9
44,38	New-Bedford (Ét.-Un.)	1257,8			

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XI, p. 416 et 197.

Influence des vents en Europe. — Le vent humide du sud-ouest, qui domine dans la plus grande partie de l'Europe, amène surtout la pluie, parce qu'il s'avance vers des régions plus froides, et s'élève sur le relief du continent. Le vent du nord-est, par des motifs opposés, ne donne presque jamais de pluie. Voici, d'après de Buch, le nombre de pluies sur cent, qui tombent à Berlin par les divers vents.

N	N.E	E	S.E	S	S.O	O	N.O
4,1	4	4,9	4,9	10,2	32,8	24,8	14,2

Par les vents du S.O, la pluie est fine et tombe pendant longtemps. Si le vent du N.O donne de la pluie, c'est surtout en hiver, quand il souffle brusquement à travers un air plus chaud; la pluie est alors formée de grosses gouttes, et dure peu de temps.

Influence des montagnes. — On remarque, en Europe, que les régions situées au sud ou au sud-ouest des chaînes de montagnes sont pluvieuses; ce qui s'explique par l'obstacle que ces chaînes opposent aux vents humides du sud et du sud-ouest. Par exemple, Bergen, placé au pied des Alpes scandinaves, est le point de l'Europe où il pleut le plus; il y tombe annuellement 2^m,25 d'eau. En général, il pleut très-souvent en Norwége par les vents du sud-ouest, pendant que le ciel est serein en Suède. Dans ce dernier pays, la pluie est amenée le plus souvent par les vents d'est; il en est de même en Finlande, ce qui prouve que ce résultat ne provient pas seulement du voisinage de la mer Baltique. La plaine de Chambéry, située au sud-ouest du mont Blanc; Bourg, Marciat, Saint-Rambert, adossés au Jura; Saint-Étienne, Joyeuse, au sud des Cévennes; Gênes, Pise, au sud des Apennins, sont autant de centres pluvieux. Le fond de la mer Adriatique, où les vents du sud rencontrent un cirque de montagnes, forme une des régions les plus pluvieuses de l'Europe.

Influence du voisinage de la mer. — Les vents de mer amènent généralement la pluie. En se heurtant au relief de la côte, ils donnent d'abord beaucoup de pluie; plus loin, la quantité va en diminuant, pour croître de nouveau à la rencontre des régions montagneuses. Ainsi, en marchant du sud-ouest au nord-est, les quantités annuelles de pluie sont :

La Rochelle.	Tours.	Paris.	Auxerre.	Laon.	Metz.	Manheim.	Berlin.
655 ^{mm} ,3	565,5	568,5	627,2	669,1	719,6	571,8	522,7

On remarque des résultats semblables en Russie.

Les côtes de la Méditerranée sont dans une situation exceptionnelle : les vents du sud-ouest, avant d'y parvenir, ont déposé leur eau à la rencontre des montagnes d'Espagne, des Pyrénées et des Alpes; ils sont d'ailleurs détournés par les vents du sud, chauds et secs, venant d'Afrique. C'est pourquoi le vent de mer ne donne que peu de pluie sur les côtes de la Méditerranée, sauf dans

quelques localités privilégiées. Dans la vallée du Rhône, il pleut moins qu'en Allemagne. L'Italie, entourée par la mer, présente de grandes anomalies : à Padoue, la pluie est amenée, le plus souvent, par les vents du nord et du nord-est, et, à Rome, par les vents du nord et du sud.

Influence de l'altitude. — On admet généralement que la quantité de pluie augmente avec l'altitude. Ce résultat, qui souffre de nombreuses exceptions, se vérifie principalement dans les bassins des grands fleuves; mais comme, en les remontant, on s'éloigne de la mer et l'on se rapproche des montagnes où ils prennent leur source, on entrevoit que les résultats pourraient bien tenir à des causes autres que la différence de niveau.

1480. Répartition annuelle des pluies en Europe. — De Gasparin a découvert le fait le plus considérable relativement à la quantité de pluie qui tombe dans les différentes saisons : il a reconnu que l'Europe se partage en deux zones : l'une au *nord-est*, dans laquelle le maximum de pluie tombe en été; l'autre au *sud-ouest*, où le maximum tombe en automne. La limite qui

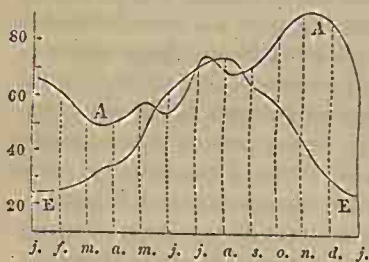


Fig. 1025.

sépare les deux bandes passe tantôt par des chaînes de hauteurs ou des plateaux élevés : alors elle est fixe; tantôt par des plaines sans relief prononcé : alors elle est variable et mal déterminée. Voici la direction que de Gasparin assigne à la ligne de démarcation : l'Angleterre, où les pluies sont à peu près égales en été et en automne, appartient à cette ligne, qui passe ensuite par la Manche, puis par Paris, qui semble appartenir tantôt à une bande, tantôt à l'autre, suivant les années; elle revient alors vers l'ouest, un peu avant d'atteindre Auxerre, et enveloppe la partie centrale de la France, qui fait partie de la bande à pluies d'été, en laissant en dehors l'Aunis, la Saintonge, la Guienne et le Languedoc, passe par Bourg et Genève, suit les Alpes en se dirigeant vers le sud, jusqu'à leur point de jonction avec les Apennins. De là, elle remonte au nord, laissant à l'ouest Turin et Milan; gagne les Alpes, qu'elle suit jusqu'à l'Adriatique, et longe ensuite la chaîne des Karpathes, en laissant Bude dans la zone automnale. Cette dernière bande s'étend au sud jusqu'à l'Atlas, les cataractes du Nil, le Darfour et l'Abyssinie. Voici le tableau des quantités moyennes de pluie qui tombent dans les deux zones aux différentes saisons, en faisant abstraction de l'Italie au nord des Apennins, à cause des anomalies que nous avons signalées plus haut (1479) :

	Année.	Hiver.	Printemps.	Été.	Automne.	Hiver et automne.	Printemps et été.
Bandes à pluies d'automne...	789mm,7	196,8	162,8	174,0	265,1	452,9	331,8
Bandes à pluies d'été.....	506mm,3	82,7	94,7	189,0	139,9	222,6	283,7

La figure 1025 indique les quantités relatives de pluie qui tombent dans les deux bandes pendant chaque mois. La courbe AA correspond aux pluies d'automne, et la courbe EE aux pluies d'été. On voit que, dans la bande automnale, le minimum tombe en juin, et qu'il y a trois maximum : en mai, en juillet et en novembre, où se trouve le maximum absolu. Dans la zone à pluies d'été, il n'y a qu'un maximum, en août, et le minimum tombe en janvier.

Nous joignons ici le tableau des quantités moyennes de pluie recueillies à Paris dans les différents mois :

Janvier.....	38 ^{mm}	Mai.....	60 ^{mm}	Septembre.....	51 ^{mm}
Février.....	41	Juin.....	61	Octobre.....	37
Mars.....	28	Juillet.....	59	Novembre.....	47
Avril.....	53	Août.....	51	Décembre.....	38

La somme de ces nombres donne 564^{mm} pour moyenne annuelle. A Paris, de 1817 à 1829, la pluie de l'année a varié de 470 à 690^{mm}.

1881. Jours de pluie. — Il ne suffit pas, pour l'agriculture, de savoir quelle quantité de pluie tombe en un même lieu : il faut encore connaître le nombre de fois qu'il pleut pour fournir cette quantité, et surtout les nombres de jours de pluie par saison et par mois. En général, le nombre des jours de pluie augmente en même temps que la quantité. Ce nombre augmente donc quand la latitude diminue. Voici quelques exemples :

Zone torride.	Angleterre.	Nord de la France et Allemagne.	Scandinavie.	Russie.
159 jours	155	144,9	133,2	100,9

Moyenne par jour. — En divisant la quantité de pluie tombée pendant l'année, la saison ou le mois, par le nombre des jours de pluie pendant la même période, on a la moyenne de pluie par jour pendant cette période. On voit, dans le tableau suivant, les nombres de jours de pluie pendant les différentes saisons dans diverses régions de l'Europe, avec les moyennes par jour :

RÉGIONS	JOURS DE PLUIE				QUANTITÉ MOYENNE PAR JOUR				
	hiver	prin- temps	été	au- tomne	année	hiver	prin- temps	été	au- tomne
					mm	mm	mm	mm	mm
Angleterre à l'ouest.....	43,1	37,6	33,9	44,9	5,9	5,6	4,5	6,5	6,3
Id. à l'est.....	40,0	39,5	34,4	34,8	4,5	4,2	3,6	5,0	5,2
Côtes de l'ouest.....	34,4	34,4	32,9	38,0	5,4	5,4	4,1	5,1	6,4
France méridion., Italie du sud..	25,4	25,2	15,2	25,4	8,9	7,7	7,7	8,8	13,5
Italie du nord.....	25,4	27,1	25,1	26,6	9,8	5,5	9,3	10,9	11,3
France du nord, Allemagne.....	36,1	37,0	36,8	35,0	4,7	3,4	4,0	6,2	5,5
Scandinavie.....	35,2	30,3	32,6	35,1	3,6	2,3	2,5	5,2	4,2
Russie.....	23,1	23,4	27,9	26,5	3,6	1,8	2,6	6,6	3,6

Les moyennes par jour de la France méridionale et de l'Italie expliquent les inondations qui ravagent souvent ces contrées pendant l'automne.

Les régions où les moyennes de pluies par jour sont les plus élevées sont aussi celles où l'on observe des chutes d'eau exceptionnelles. Parmi les *pluies majeures*, nous citerons les suivantes : à Bombay, en 1819, il est tombé en un seul jour 162^{mm} d'eau : à Cayenne, M. Roussin en a vu tomber 280^{mm} en 10 heures, ou 28^{mm} par heure. En 1827, il tomba à Joyeuse 791^{mm},7 en 24 heures, ce qui causa les inondations de l'Ardèche. Le résultat le plus étonnant de tous a été observé à Gènes le 25 octobre 1822 : il tomba en une seule pluie 812^{mm} d'eau, près de 1 mètre.

§ 5. — CORRÉLATION DES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES.

1482. En nous reportant à l'ensemble des faits étudiés dans ce chapitre, il est facile de voir que les divers phénomènes météorologiques réagissent les uns sur les autres et se compliquent mutuellement. La cause générale dont ils dépendent tous est l'action solaire combinée avec le mouvement de rotation de la terre. En effet, les vents sont la conséquence de la manière dont la chaleur se distribue à la surface du globe, et la pluie est produite par les vents. A leur tour, les vents et la pluie réagissent sur la température de l'air : les premiers, en l'élevant ou l'abaissant, suivant leur direction, et les pluies en rafraîchissant l'air quand il fait chaud. Toutes les modifications qu'éprouve l'atmosphère sont accompagnées de variations de pression ; les mouvements du baromètre sont donc le signe le plus général des changements qu'elle éprouve ; aussi a-t-on remarqué de bonne heure des relations entre la hauteur de la colonne de mercure et l'état du temps. Nous avons vu (I, 367) comment on explique, pour l'Europe occidentale, la probabilité du beau temps quand le baromètre monte, et celle de la pluie quand il baisse.

Les travaux persévérants de M. Marié-Davy ont jeté un grand jour sur l'ensemble des mouvements atmosphériques et sur la dépendance entre les divers phénomènes météorologiques. La construction des cartes synoptiques (1437) a permis de saisir d'un seul coup d'œil l'état de l'atmosphère dans l'immense espace occupé par les stations météorologiques, dont les observations, faites simultanément, sont envoyées à l'Observatoire de Paris, où elle sont comparées et coordonnées.

1483. Prévission du temps¹. — Il résulte des études suivies de M. Marié-Davy que les modifications de l'atmosphère, en Europe, ont leur origine dans le déplacement du grand courant équatorial et dans le passage sur le continent des tourbillons qui prennent naissance entre les tropiques. De là la possibilité, grâce au télégraphe électrique, d'annoncer à l'avance l'arrivée sur nos rivages des

¹ *Les Mouvements de l'atmosphère et les variations du temps*, par H. Marié-Davy (1877).

principales perturbations. En effet, en comparant les cartes synoptiques de plusieurs jours consécutifs, et en étudiant les changements continus des courbes d'égal pression, on peut saisir la marche des dépressions barométriques, et en déduire des conséquences, de manière à prévoir plusieurs jours à l'avance l'état du temps dans les régions vers lesquelles marchent ces dépressions. C'est ainsi qu'on peut, comme nous l'avons vu (1438), annoncer l'arrivée des tempêtes tournantes engendrées dans l'Atlantique, et avertir les principaux points des côtes de leur approche et de l'époque approximative de leur arrivée. Ce système d'avertissements aux ports a été suivi de l'organisation des avertissements aux communes rurales, reproduits régulièrement par les principaux journaux. Quand, plus tard, à la suite du progrès d'une organisation qui s'étend de plus en plus, les cartes synoptiques comprendront l'Amérique, l'Asie et l'Océan Pacifique, on peut espérer qu'il ne se produira pas, en Europe, un seul changement atmosphérique important sans qu'on n'ait pu en être prévenu 8 à 10 jours à l'avance¹.

1481. Des pronostics. — On a cherché de tout temps à prévoir les changements de temps au moyen de signes observés dans le lieu même. Quelques-uns sont tirés des allures de certains animaux, de l'attitude des feuilles, des fleurs de diverses plantes, qui ne jouent le plus souvent que le rôle d'hygroscopes. D'autres pronostics sont empruntés à l'aspect du ciel, à la direction du vent, et surtout aux indications des principaux instruments de météorologie.

Baromètre. — Les instruments qui, comme le baromètre, font connaître l'état d'une vaste région fournissent les meilleures bases d'un bon pronostic. Les indications du thermomètre et de l'hygromètre, qui donnent l'état de l'air au point où ils sont exposés, sont évidemment moins concluantes.

En Europe, quand le baromètre monte peu à peu, c'est que les vents du nord chassent ceux du sud, et le temps se met au beau. Cependant, la rencontre de ces vents peut, au premier moment, donner un peu de pluie (1465); alors il pleut pendant que le baromètre monte. Bouvard avait déjà remarqué que, dans ce cas, deux courants d'air se rencontrent. De Buch a constaté, à Berlin, que, lorsqu'il pleut longtemps, le baromètre se tient à 5^{mm} environ au-dessous de la moyenne qui correspond au vent régnant; conséquence de la diminution de pression résultant de la condensation continue de la vapeur.

Le passage d'un tourbillon en un lieu est indiqué par une hausse barométrique quand arrive le premier bord, suivie, quand passe la partie centrale, d'une baisse d'autant plus prononcée que le centre passe plus près, puis vient une seconde hausse quand le second bord se présente à son tour. Il est à remarquer que le baromètre baisse plus qu'il ne monte, le refoulement de l'air par la force centrifuge sur la périphérie très-étendue, étant moins prononcé que la raréfaction vers le centre. C'est pourquoi le baromètre descend au-dessous de la moyenne,

¹ *Les Mouvements de l'atmosphère et les variations du temps*, par H. Marié-Davy (1877)

plus qu'il ne s'élève au-dessus : on le voit, dans nos climats, s'abaisser à 730, 720 et même 712^{mm}; tandis qu'il atteint rarement 780. Quand il dépasse 766, ou descend au-dessous de 755, c'est signe de perturbations prochaines.

Pendant les averse, on voit souvent le baromètre monter de quelques millimètres, pour redescendre quand l'averse a cessé. C'est ce qu'on remarque souvent pendant les orages, et, d'après M. Kaemtz, on peut affirmer que le plus fort est passé quand le mercure commence à redescendre. Ce résultat a été attribué au refroidissement de l'air par la pluie. Mais nous pensons qu'il faut plutôt y voir un effet mécanique produit par la chute d'innombrables gouttes de pluie, qui refoulent les couches inférieures de l'atmosphère. Un phénomène analogue se produit quand des parcelles en suspension dans l'eau se déposent au fond d'un vase; car un aréomètre plongé dans l'eau trouble, s'enfonce de plus en plus à mesure que le liquide se clarifie, après avoir été soulevé par le retour de l'eau, entraînée d'abord au fond du vase par les parcelles qui se déposent.

Remarquons enfin que les mouvements du baromètre doivent être rapprochés des indications du thermomètre et de l'hygromètre, qui peuvent donner des pronostics contraires. Ainsi, quand la température, à une même heure, va en s'élevant et que l'air est très-humide, on peut s'attendre à la pluie, quoique le baromètre monte.

Thermomètre. — Quand le thermomètre monte, dans la saison froide, le temps se met à la pluie. D'après Castellani et de Gasparin, c'est surtout le minimum du thermomètre qu'il faut considérer. Quand il s'élève graduellement, la pluie est généralement peu éloignée. En Europe, quand le minimum baisse par les vents chauds et humides, ou quand il s'élève par les vents froids et secs on a un signe de pluie prochaine, parce qu'il y a rencontre de deux masses d'air de température différente.

État du ciel. — Quand l'atmosphère est très-pure et que les étoiles scintillent, c'est qu'il y a beaucoup d'humidité et d'agitation dans les hautes régions de l'atmosphère et la pluie est probable. Il en est de même quand le soleil est d'un rouge foncé à son coucher, ses rayons traversant alors des vapeurs en précipitation. Un ciel rouge avant le lever du soleil, un soleil pâle, une lune trouble présagent également la pluie. Quand le soleil se couche dans un ciel pur et de couleur orangée, on peut au contraire compter sur le beau temps pour le lendemain.

Dans nos climats, les *cumulus* annoncent le beau temps, leurs contours arrêtés attestant un air sec dans lequel ils se dissolvent rapidement. Les *cirrus*, qui accompagnent souvent l'arrivée des vents du sud et du sud-ouest dans les hautes régions, annoncent la pluie.

C'est souvent dans les hautes régions de l'atmosphère que se préparent les changements de temps, l'étude de ce qui s'y passe est donc importante pour pronostiquer. C'est pourquoi l'observation des *cirrus* doit être recommandée, car ce sont les nuages les plus élevés. Ils paraissent être à peu près en repos, à

cause de leur très-grande élévation ; mais, en réalité, ils se déplacent souvent très-rapidement.

La scintillation des étoiles est aussi un signe de ce qui se passe dans les hautes régions de l'atmosphère. Kepler avait déjà annoncé qu'elle est très-prononcée quand l'air est humide et agité. MM. Landier et Portet, en France, et Poëy, à la Havane, ont établi des pronostics sur les ondulations de l'image des étoiles vues dans une lunette dont l'oculaire n'est pas *au point*, et M. Montigny, après une étude de vingt années, a posé des règles au moyen desquelles on peut prévoir les changements de temps d'après la scintillation observée pendant une ou plusieurs nuits consécutives. En général, plus la scintillation est prononcée, plus il y a chance de pluie pour les jours suivants. Les saisons ont, du reste, une influence marquée sur la netteté du pronostic.

Mouvements de l'aiguille aimantée. — Les grandes perturbations de l'atmosphère peuvent être annoncées par les mouvements irréguliers de l'aiguille aimantée de boussoles spéciales, comme l'ont reconnu le P. Secchi et surtout M. Marié-Davy, à la suite de nombreuses observations. Cette corrélation entre deux phénomènes en apparence aussi étrangers l'un à l'autre s'explique par le trouble qu'apportent les grandes perturbations de l'air dans la régularité des courants d'électricité atmosphérique, qui influencent la direction et des mouvements de l'aiguille aimantée, comme nous le verrons plus tard.

1855. De la prédiction du temps. — Les pronostics, et surtout les prévisions plus étendues déduites des observations faites simultanément dans divers pays et transmises par le télégraphe, ont pour base la constatation d'un état actuel permettant de prévoir l'arrivée prochaine de phénomènes qui en sont les conséquences. Il ne faut pas les confondre avec ces *prédications* à long terme, qui ne sont basées sur aucunes données sérieuses, et ne se vérifient parfois que parce qu'elles se tiennent dans un vague tel, que le plus surprenant est de les voir si souvent contredites ; d'autant plus que, bien des fois, les deux événements contraires satisfont également aux termes de l'oracle. Ces prédictions ont cependant leurs partisans, parmi lesquels on voit avec étonnement des personnes que leur instruction devrait prémunir contre de semblables chimères. Quelques-uns même se vantent d'avoir souvent vérifié l'exactitude des prédictions, mais ils ne l'ont fait que très-superficiellement, se fiant à leur mémoire et n'inscrivant aucun résultat. L'esprit prévenu, soit par l'assurance des prédisseurs du temps au mois ou à l'année, qui affirment souvent, sans souci de la vérité, que leurs oracles antérieurs se sont accomplis de tout point, soit par le désir de voir confirmer une science qui rendrait de si grands services, si elle était vraie, ils sont frappés des coïncidences quand il s'en produit, laissant passer inaperçues les contradictions les plus flagrantes, comme un joueur à pile ou face qui ne remarquerait que les coups annoncés et prétendrait ensuite avoir constamment deviné.

La plupart des prédictions à long terme sont basées sur les phases de la lune, et il existe plusieurs formules, très-peu d'accord entre elles, qui ont chacune la prétention d'être la seule infaillible. Mais la lune ne pourrait agir

que par la chaleur de ses rayons, qui est si faible, qu'on a bien de la peine à la rendre appréciable ; ou par son attraction, produisant dans l'atmosphère des marées analogues à celle de l'Océan, et Laplace a prouvé que ces marées ne peuvent modifier la pression atmosphérique que de $\frac{1}{60}$ de millimètre, quantité tout à fait insensible au milieu des variations horaires et accidentelles du baromètre.

Du reste, il est un argument péremptoire qui s'applique également à toutes les causes que l'on voudrait imaginer en-dehors du globe et de son atmosphère : c'est que l'influence lunaire, se faisant sentir de la même manière sur d'immenses contrées, devrait y établir le même état atmosphérique, ou y produire des changements de temps au même moment ; ce qui n'a pas lieu, même dans de vastes plaines où aucune cause ne vient contrarier cette prétendue influence. Quand il s'agit des cyclones, qui parcourent leur immense trajectoire quelquefois en plus de vingt jours, les régions atteintes le sont les unes après les autres, et cependant elles sont toutes, au même moment, soumises aux mêmes phases de la lune.



FIN DU TOME DEUXIÈME.

TABLE DES MATIÈRES

DU DEUXIÈME VOLUME

LIVRE IV

DE LA CHALEUR

CHAP. I. — DE LA CHALEUR EN GÉNÉRAL

§ 1. — Nature de la chaleur. —	pag.
Effets généraux. Système de l'émission et des ondulations.	7
§ 2. — Mesure des températures.	41
I. De la température en général. . . .	41
II. Thermomètres de dilatation. — Thermomètre à mercure. Graduation. Therm. de précision; à poids; à alcool; différentiels.	43
III. Thermomultiplicateur.	32
IV. Pyromètres. — Pyr. thermoélectrique. Pyr. à air. Pyr. chimique. . . .	37

CHAP. II.

CHALEUR RAYONNANTE

§ 1. — Marche des rayons dans un même milieu.	43
I. Transmission à distance. — Lois. Rayons de chaleur.	43
II. Réflexion de la chaleur. — Lois de la réflexion. Miroirs paraboliques, sphériques. Miroirs ardents. Réflexion diffuse.	46

§ 2. — Passage à [travers les corps.	52
I. Pouvoir diathermane. — Solides, liquides, gaz.	52
II. Réfraction de la chaleur. — Prismes. Verres ardents.	61
§ 3. — Thermochrose.	63
I. Thermochrose des rayons. — Absorption des divers rayons. Lois. Spectre calorifique.	63
II. Thermochrose des corps. — Diffusion.	77
III. Radiations diverses. Principe de l'identité. — Impressions de chaleur et de lumière.	81
§ 4. — Passage de la chaleur par la surface des corps. — Loi de Newton.	87
I. Pouvoir émissif. — Influence de la température, de l'état physique. . . .	87
II. Pouvoir réflecteur. — Variation avec l'incidence. Pouvoir diffusif.	97
III. Pouvoir absorbant. — Comparaison au pouvoir émissif.	104
§ 5. — Équilibre de la chaleur rayonnante.	113

Intensité suivant la distance; l'obliquité. Équilibre dans une enceinte. 413

- § 6. — Lois du refroidissement.
— Refroidissement dans le vide;
dans les gaz. Influence de l'enceinte.
Lois du réchauffement. 421

CHAP. III. — CONDUCTIBILITÉ

- § 1. — Conductibilité des solides. 142
- I. Solides homogènes. — Lois des températures dans un mur; dans une barre; dans un fil. Applications. . 142
- II. Corps non homogènes. — Cristaux. 162
- § 2. — Conductibilité des liquides. 168
- § 3. — Conductibilité des gaz. . 172

CHAP. IV. — DILATATIONS

- § 1. — Dilatation des solides. . 177
- I. De la dilatation en général. 177
- II. Mesure de la dilatation linéaire entre 0° et 100°. — Formules des dilatations. 180
- III. Dilatation cubique. Dilatation au-dessus de 100°. 185
- IV. Dilatation des corps non homogènes. — Cristaux. 193
- V. Applications des dilatations. — Pendules compensateurs, etc. 196
- § 2. — Dilatation des liquides. 201
- I. Dilatation absolue du mercure. 201
- II. Liquides autres que le mercure. — Dilatation au-dessus du point d'ébullition. 208
- III. Dilatation de l'eau. — Maximum de densité. — Dissolutions salines. 216
- § 3. — Dilatation des gaz. 223
- I. Mesure de la dilatation des gaz. — Cas des hautes températures. Recherches de Regnault. 223
- II. Comparaison des thermomètres. — Pyromètres à air. 230
- III. Mesure de la densité des gaz. . . 244
- IV. Applications de la dilatation de l'air. 251

CHAP. V CAPACITÉS CALORIFIQUES

- § 1. — Capacités des solides et des liquides. 256
- I. Méthodes et résultats généraux. — Calorimètres. 256
- II. Loi des atomes. — Cas des corps simples. Cas des corps composés. . 277
- § 2. — Chaleur spécifique des gaz. — Des vapeurs. 291

CHAP. VI. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — VAPEURS

- § 1. — Fusion et solidification. 308
- I. Fusion des corps solides. 308
- II. Solidification des liquides. — Surfusion. Influence de la pression. Regel. Changements de volume. . 312
- III. Liquéfaction par dissolution sur-saturation. — Mélanges réfrigérants. 327
- IV. Mesure de la chaleur de fusion. — Relation avec les chaleurs spécifiques. 333
- § 2. — Passage à l'état gazeux, et liquéfaction des gaz. 348
- I. Phénomènes généraux. — Froid produit par l'évaporation. 348
- II. Formation des vapeurs à la surface. — Vapeurs dans le vide. Mélange avec les gaz. 353
- III. Ébullition. — Effets de la pression; des gaz dissous; de la surface du vase. Vases très-chauds. Substances dissoutes. 363
- IV. Liquéfaction des gaz. — Cas des gaz dits permanents. 385
- § 3. — Propriétés physiques des vapeurs. 393
- I. Mesure de la force élastique. — Vapeur d'eau. Vapeur des liquides autres que l'eau. 393
- II. Mesure de la chaleur de volatilisation. — Vapeur d'eau. Liquides autres que l'eau. 405

III. Mesure de la densité des vapeurs; de la vapeur d'eau; des vapeurs de divers liquides.	416
§ 4. — Machines à vapeur.	426
I. Machines fixes. — Calcul du travail. Applications industrielles.	426
II. Chaudières à vapeur. — Alimentation. Appareils de sûreté. Causes d'explosion.	432
III. Balcaux à vapeur. — Propulseur des navires, hélice.	463
IV. Locomotives. — Des chemins de fer. Locomotives routières.	472
V. Machines dont le jeu est semblable à celui des machines à vapeur. — Machines à air comprimé, dilaté. Moteurs à gaz.	482

CHAP. VII

SOURCES DE CHALEUR

§ 1. — Sources permanentes de chaleur.	489
I. Chaleur solaire. — Constitution du soleil. Quantité de chaleur qu'il fournit. Température de sa surface.	489
II. Chaleur propre du globe; son origine.	306
§ 2. — Sources physiologiques de chaleur. — Chaleur animale; sa mesure; son origine. — Chaleur des végétaux.	511
§ 3. — Chaleur produite par les actions mécaniques.	518
I. Solides et liquides. — Frottement. Déformation. Compression.	519
II. Compression et détente des gaz.	527
§ 4. — Sources chimiques. Thermochimie.	538
I. Chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques. — Combustion. Flamme. Propriétés des toiles métalliques. Chalumeau. Dissociation.	538
II. Mesure de la chaleur chimique. — Combustions vives. Décompositions. Voie humide.	552

CHAP. VIII

THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR OU THERMODYNAMIQUE

§ 1. — De l'équivalent mécanique de la chaleur.	576
I. Transformation de la chaleur en travail et réciproquement.	576
II. Mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur.	582
§ 2. — Théorie mécanique de la chaleur.	588
§ 3. — Application à la théorie des corps.	593
I. Solides et liquides.	593
II. Théorie des gaz. — Gaz parfaits; gaz réels.	395
§ 4. — Applications à la physiologie et à la cosmologie.	603
I. Origine du travail musculaire.	603
II. Entretien de l'énergie solaire.	608

CHAP. IX

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES

DÉPENDANT DE LA CHALEUR. CLIMATOLOGIE

§ 1. — Distribution de la chaleur à la surface du globe.	613
I. Instruments d'observation. — Thermomètres à maximum et à minimum; enregistreurs.	613
II. Température de l'air en un même lieu. — Moyenne d'un lieu. Marche diurne, mensuelle, annuelle.	622
III. Température à différentes latitudes. — Lignes isothermes, isothères, isochimènes. Températures extrêmes. Climats.	627
IV. Température à différentes hauteurs. — Lois du décroissement. Neiges perpétuelles.	635
V. Température de l'espace. — Rayonnement nocturne.	643
VI. Température de la terre et des eaux. — Température du sol; de la mer. Courants. Glaces polaires. Lacs et rivières.	649

§ 2. — Phénomènes barométriques.	660	ques. Ouragans. Annonce des tempêtes; cartes synoptiques.	689
I. Instruments d'observation. — Enregistreurs.	660	§ 4. — Météores aqueux, ou hydrométéores.	699
II. Résultats d'observations barométriques. — Moyennes diurne, mensuelle, annuelle. Variations accidentelles. Leur amplitude. Variations horaires.	664	I. Hygrométrie. — Hygroscopes. Hygromètres. Méthodes hygrométriques. Enregistreurs. Évaporomètres.	699
§ 3. — Mouvements de l'atmosphère et des vents.	670	II. De la rosée et du givre.	719
I. Du vent. — Anémoscopes. — Anémomètres; enregistreurs électriques.	670	III. Météores dus à la condensation de la vapeur dans l'atmosphère. — Nuages. Pluie. Neige. Brouillards.	724
II. Vents réguliers. — Brises. Moussons. Vents alizés.	684	IV. Distribution de l'eau atmosphérique. — Udomètres. Enregistreurs. Distribution des pluies.	733
III. Vents irréguliers. — Cyclones. — Vents d'Europe. Caractères physi-		§ 5. — Corrélation des phénomènes météorologiques. — Préviation du temps. Pronostics.	744



FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

