

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

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

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

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

Ino. 84.046. -

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

Donation de prof. P. Stroescu

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE

32294



QUATRIÈME ÉDITION

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

TOME QUATRIÈME

PARIS

LIBRAIRIE CH. DELAGRAVE

RUE SOUFFLOT, 15

TOULOUSE

LIBRAIRIE ÉDOUARD PRIVAT

RUE DES TOURNEURS, 45

1879

Droits de reproduction et de traduction réservés.

CONTROL 1953

1961

1956

L

RC 203/06

BIBLIOTECA CENTRALĂ UNIVERSITĂŢI
BUCUREŞTI
COTA 22 190

Voir l'Erratum à la fin du volume.

B.C.U. Bucuresti



C32294

LIVRE VI

OPTIQUE

2387. De la lumière. — Si le tact nous fait connaître l'existence des corps qui sont tout près de nous, c'est par l'organe de la vue que nous est révélée celle des objets auxquels nous ne pouvons atteindre, et cela au moyen d'une communication établie entre eux et cet organe. L'agent, quelle qu'en soit la nature, qui sert à cette communication est la lumière; on peut donc la définir : l'agent qui nous fait connaître l'existence des corps par l'organe de la vue; autrement dit, la cause de la vision.

Quand nous avons posé l'hypothèse de l'éther (II, 812), nous avons dit que les physiciens sont généralement d'accord pour regarder la chaleur et la lumière comme résultant de mouvements vibratoires excités dans ce milieu par les corps chauds, dont les molécules sont animées de semblables mouvements. Ces vibrations de l'éther, propagées hors des corps, forment des rayons ou radiations. Quand ces radiations sont constituées par des vibrations suffisamment rapides, et qu'elles viennent frapper l'organe de la vue, elles produisent la sensation de lumière; de sorte que la lumière semble n'être qu'un accident au milieu des effets variés que produisent les radiations émanant des corps très-chauds. Mais l'effet lumineux offre l'avantage, en agissant sur un organe délicat et très-sensible, de permettre de suivre avec précision la marche des rayons, et d'en apprécier avec facilité les qualités physiques, de manière à pouvoir ensuite, par comparaison, confirmer les lois et les propriétés des radiations calorifiques obscures, telles que nous les ont fait connaître les instruments thermométriques. C'est ce que nous avons vu, par exemple, en étudiant la *thermochrose* (II, 874).

C'est à la lumière que nous devons le plus grand nombre de nos connaissances sur le monde extérieur; sans elle, nous n'aurions aucune notion sur les objets inaccessibles de notre globe et sur les corps en nombre immense qui peuplent l'espace. Nous ne pourrions avoir qu'une idée très-restreinte de l'univers; c'est à peine si nous aurions quelque idée de l'étendue, par les enseignements bornés que nous fournissent le tact et la locomotion. Nous en serions réduits aux petites

choses de notre terre, et l'intelligence humaine, privée du stimulant du grand spectacle de la nature, n'aurait pu recevoir qu'un faible développement. L'exemple des aveugles n'est pas une objection, car ils profitent, par communication, des connaissances acquises par ceux qui voient. — Ajoutons enfin que la lumière, aujourd'hui, servant d'intermédiaire entre nous et les corps situés à des distances immenses de notre globe, nous apporte des renseignements inespérés sur la constitution des astres les plus éloignés, et sur la nature d'une partie des éléments qui les composent.

Optique. — La partie de la physique qui s'occupe en particulier des propriétés de la lumière se nomme l'*optique*; d'après les considérations qui précèdent, on pourrait la définir : l'étude des radiations au moyen de l'organe de la vue. Cette science, très-étendue, et qui reçoit aujourd'hui des applications si remarquables, n'a commencé à sortir de l'enfance que dans les temps modernes. Les anciens ne connaissaient de la lumière que quelques lois expérimentales relatives à sa propagation et à sa réflexion, mais ils avaient poussé assez loin l'étude des conséquences géométriques de ces lois. On doit à Ptolémée un ouvrage sur l'optique, dont le premier livre est perdu et dont il n'existe que quelques exemplaires d'une traduction latine des quatre derniers. Alhazen, savant arabe qui écrivait dans le onzième siècle, cite souvent un traité d'optique d'un certain Euclide, qui paraît être autre que le fameux géomètre, et Théon parle de livres d'Archimède sur la réfraction, qui ne nous sont pas parvenus. Mais ce n'est qu'à partir de la fin du seizième siècle que la science de la lumière s'est trouvée assez avancée pour qu'on ait pu en faire des applications à la construction des instruments d'optique, particulièrement de ceux qui viennent en aide à notre vue.

On peut diviser l'optique en deux parties principales. Dans la première, qui forme l'*optique géométrique*, on considère les phénomènes relatifs à la marche des rayons, en partant de quelques lois expérimentales, et sans se préoccuper de la nature de l'agent lumineux. Cette partie comprend les connaissances des anciens; elle a été regardée longtemps comme une branche des mathématiques, et, en effet, une fois les premières lois établies, on peut en déduire une foule de conséquences par les règles de la géométrie ou de l'algèbre : ce qui explique comment Sanderson pouvait, quoique aveugle de naissance, donner des leçons publiques sur l'optique connue de son temps. Dans la seconde partie, formant l'*optique physique*, on étudie une foule de phénomènes, dont les lois ont été découvertes par les modernes, et qui sont relatifs à la nature des rayons lumineux, aux actions qu'ils exercent les uns sur les autres, ou à la constitution même de ces rayons. Là, pour nous reconnaître au milieu d'un très-grand nombre de faits, nous invoquerons le secours d'une théorie : celle des *ondulations*, au moyen de laquelle tous ces faits se lient naturellement entre eux, tellement que la théorie a pu plusieurs fois les prédire. En même temps, nous compléterons ce que nous avons dit (II, 889) des analogies de la lumière avec la *chaleur rayonnante*, en montrant que celle-ci produit constamment les mêmes phénomènes que la lumière.

CHAPITRE PREMIER

NATURE, ORIGINE ET PROPAGATION DE LA LUMIÈRE
PHOTOMÉTRIE

Que l'on suppose que ce soit la lumière ou l'air qui soit interposé entre l'œil et l'objet visible, en tout cas, c'est par le mouvement de ce milieu que l'on voit.

(ARISTOTE, *Traité de l'âme*, liv. II, ch. 2.)

§ 1: — DE LA NATURE DE LA LUMIÈRE ET DE SON ORIGINE

I. Systèmes sur la lumière.

2388. De la nature de la lumière. — La lumière est dite *impondérable*; mais, comme la chaleur, elle ne peut exister sans la matière pondérable, dans laquelle elle prend naissance et d'où elle s'élançe à travers certains milieux, et même à travers le vide, qui la laisse passer, mais ne peut l'engendrer. Cet agent est d'une subtilité extrême; car, si l'on regarde par une ouverture étroite divers objets lumineux, chacun d'eux se voit nettement; les rayons de lumière qu'ils lancent, et qui se croisent dans l'ouverture, ne se gênent donc pas mutuellement.

On a fait bien des hypothèses pour expliquer la lumière. Empédocle l'attribuait à un écoulement continu de matière hors des corps lumineux. Démocrite, et, d'après lui, Epicure et Lucrèce, regardaient la lumière comme formée de corpuscules d'espèce particulière lancés par ces corps. Aristote, qui nous a transmis le système d'Empédocle, semble admettre que l'impression de lumière est due à la présence des corps transparents qui nous séparent des corps lumineux; ces corps transparents auraient la propriété de faire voir les objets placés derrière eux. Ainsi présenté, le système d'Aristote est bien peu intelligible; mais ce philosophe s'exprime plus clairement quand il dit que l'on voit par le *mouvement d'un milieu* interposé entre l'œil et l'objet visible. — Les platoniciens considèrent la lumière comme une émanation partant de l'œil et allant palper, pour ainsi dire, les objets; alors pourquoi ne les voit-on pas dans l'obscurité? On a peine à comprendre comment on a pu s'arrêter à de pareilles idées après les hypothèses si simples d'Empédocle et de Démocrite.

Gassendi, au dix-septième siècle, admet et développe le système de Démocrite :

les corps lumineux nous enverraient des particules capables d'agir sur notre œil, comme certains corps lancent des particules odoriférantes. — Descartes suppose l'espace rempli de particules contiguës; le soleil, les corps lumineux poussent celles qui les touchent, et l'impulsion se transmet aussitôt dans tous les sens. Il soutenait que la lumière devait se transmettre instantanément, et cela lui semblait tellement évident, qu'il déclarait être prêt à convenir qu'il ne savait rien en philosophie, si l'on pouvait lui prouver que la lumière met un temps sensible à nous venir du soleil. Le système de Descartes a joui quelque temps d'une certaine faveur. Plusieurs physiciens, entre autres Nollet, l'adoptèrent en y apportant diverses modifications. Il est cependant en contradiction avec les faits; car la réflexion ne pourrait exister sans l'élasticité des corpuscules, et il n'y aurait pas d'ombre derrière les corps éclairés. De plus, l'expérience prouve que la lumière ne se transmet pas instantanément.

2389. Système des ondulations. — Mallebranche, en comparant les phénomènes lumineux à ceux du son, a posé les bases du *système des ondulations*, généralement admis de nos jours. Seulement, les tourbillons étant alors de mode, il suppose que les molécules des corps lumineux sont dans un mouvement rapide, qui se communique à de petits tourbillons de matière subtile remplissant tout l'espace; l'intensité de la lumière dépend de l'amplitude de ces mouvements, et les différences d'impression qui constituent les couleurs, de leur rapidité. Grimaldi a émis des idées analogues.

Cependant, Huyghens est considéré comme l'auteur du système des ondulations. Avant lui, quelques physiciens en avaient bien adopté le principe, et s'en étaient servi pour expliquer quelques phénomènes, mais très-vaguement, si bien qu'on n'y avait prêté que peu d'attention. Huyghens suppose que l'espace est occupé par l'*éther* (II, 812), milieu très-subtil et très-élastique, qui remplit aussi les pores de la matière. Les molécules des corps lumineux sont animées de mouvements vibratoires très-rapides, qui se communiquent à l'éther et s'y propagent, comme le son dans l'air, et viennent ébranler les fibres nerveuses du fond de l'œil. Ce système, combattu par Newton, qui niait même la réalité de certains phénomènes qui le confirment, a d'abord été peu goûté. Mais, depuis les travaux d'Young, et surtout ceux de Fresnel, suivis des recherches mathématiques de Cauchy, Green, etc., il a réuni tous les suffrages, à cause de la facilité avec laquelle il rend compte des faits les plus compliqués, dans leurs plus fins détails, sans qu'il soit nécessaire de faire d'hypothèse particulière pour chaque ordre de phénomène, et à cause de la bonne fortune qu'il a eue plusieurs fois de prédire des phénomènes inattendus que l'expérience a ensuite complètement vérifiés.

2390. Système de l'émission. — Newton a posé les principes et développé les conséquences du *système de l'émission*, dont il est regardé comme l'auteur, car les anciens n'avaient fait qu'indiquer le point de départ. Dans ce système, on suppose que les corps lumineux lancent dans toutes les directions et avec une excessive rapidité, des corpuscules de nature spéciale, d'une ténuité extrême, et très-écartés les uns des autres; ce qui fait qu'ils peuvent parcourir

en tous sens un même espace, sans se rencontrer et sans se gêner mutuellement. Les différentes couleurs sont produites par des corpuscules d'espèce différente. Ces corpuscules devraient avoir une masse insensible; car, malgré leur immense vitesse, ils ne peuvent imprimer la plus faible impulsion aux corps les plus légers et les plus mobiles. Dufay et de Mairan suspendaient un moulinet très-léger à ailettes, par l'extrémité de son axe, à un aimant tout juste assez fort pour le soutenir. Bennet suspendait une fine aiguille d'acier, par un fil d'araignée, dont la force de torsion est tellement faible qu'on peut faire faire des milliers de tours à l'aiguille sans qu'elle cesse de rester en équilibre dans la position où on l'abandonne. Malgré cette excessive mobilité, la lumière solaire concentrée au foyer d'une lentille, et projetée sur le système mobile, ne pouvait le déplacer, quand on avait soin d'écartier toutes les causes de perturbation.

Dans le système de l'émission, longtemps soutenu par l'autorité imposante de Newton, on est forcé de faire de nouvelles hypothèses pour chaque ordre de phénomènes, et beaucoup de faits ne peuvent aucunement s'expliquer; aussi, ce système est-il maintenant généralement abandonné. Euler, un des premiers, l'a attaqué avec une grande vivacité; il s'oublie même jusqu'à l'appeler « l'égarément d'un grand homme. » Au reste, il n'y a plus en présence, que ce système et celui des ondulations, et nous citerons des expériences, relatives aux changements de vitesse de la lumière quand elle passe d'un milieu dans un autre, qui tranchent la question en faveur du dernier.

Nous ajouterons enfin qu'Ersted a voulu expliquer la lumière, en l'attribuant à des décharges électriques se faisant par des décompositions et des recompositions successives dans un milieu qui remplirait l'espace. La lumière est alors considérée comme un effet d'électricité en mouvement dans de certaines conditions. Mais il est bien difficile de concevoir, dans le vide, un milieu susceptible de se prêter à ce mode de décharge; tandis que l'on comprend facilement comment l'électricité excitée dans les corps pondérables, peut ébranler l'éther et produire des ondulations lumineuses.

II. Sources de lumière.

2391. Corps lumineux. Corps éclairés. — Nous ne voyons les corps qu'au moyen de la lumière qu'ils envoient à notre œil. Quand cette lumière prend naissance dans le corps, il est dit *lumineux par lui-même* et constitue une *source* de lumière; chacun des points de sa surface est un centre d'où la lumière s'élançe dans toutes les directions en dehors du plan tangent en ce point. Les corps non lumineux par eux-mêmes ne peuvent être *vus*, que s'ils sont *éclairés*, c'est-à-dire s'ils reçoivent d'une source lumineuse, de la lumière qu'ils renvoient ensuite suivant certaines conditions que nous expliquerons (2428); ils se comportent alors comme des corps lumineux; mais ils ne peuvent, comme ces derniers, être vus dans l'obscurité. La lune, les planètes, ne sont pas des sources

directes de lumière; elles ne font que nous renvoyer par réflexion celle qu'elles reçoivent du soleil, et nous n'en voyons que les parties éclairées. Si les rayons solaires qui tombent sur une portion de leur surface viennent à être interceptés, comme pendant les éclipses, cette portion cesse d'être visible.

On distingue deux espèces de sources de lumière, les unes *permanentes*, comme le *soleil*, les *étoiles*, d'où la lumière nous arrive après avoir traversé des espaces immenses; les autres *accidentelles*, que l'on peut diviser en *sources artificielles* et *sources naturelles*. Les premières sont produites par l'art, en mettant les corps dans des conditions convenables, par exemple en les portant à une température suffisamment élevée, de sorte que toutes les sources de chaleur intense sont en même temps des sources de lumière; ou bien en mettant en mouvement de grandes quantités d'électricité à travers des corps ou des milieux résistants. Nous avons parlé avec détails, dans le volume précédent (1943 et 2347), de la *lumière électrique*. Nous allons nous occuper de celle que dégagent les corps portés à une haute température.

2392. Incandescence. — L'expérience prouve que tous les corps, vers 300° à 400°, deviennent lumineux, c'est-à-dire sont visibles dans l'obscurité; tels sont les corps solides que l'on fait *rougir* au feu. Du reste, des surfaces différentes également échauffées, peuvent rayonner différemment. Ainsi, MM. de la Provostay et P. Desains, ayant fait rougir, au moyen d'un courant électrique, une lame de *platine* dont une moitié était recouverte de noir de fumée, reconquirent que cette moitié avait beaucoup plus d'éclat que la partie nue. Avec l'*or*, la différence était encore plus marquée, et l'éclat de l'*or* nu n'était que de 0,1 de celui de l'oxyde de cuivre, pris pour unité. M. P. Desains a fait, en 1865, de nouvelles expériences¹. Les oxydes, de cuivre (qui est noir), de chrome (vert), de manganèse (brun), de fer (rouge) lui ont donné le même éclat. Une couche d'oxyde de zinc rendue adhérente par un peu de borax s'est montrée moins brillante que l'*or*. Une plaque un peu épaisse de platine, divisée en compartiments enduits d'une mince couche de différentes substances et chauffée par derrière au moyen d'une flamme, peut montrer d'un seul coup d'œil les différences d'éclat. Il y a donc à considérer un *pouvoir émissif*, pour la lumière comme pour la chaleur. Les températures répondant aux divers éclats lumineux désignés par les mots *rouge naissant*, *rouge sombre*, *rouge blanc*, etc., que donne le *pyromètre à air* (II, 848), ne peuvent donc être qu'approximatives. Du reste, il faut remarquer que, de même que la chaleur peut exister sans lumière sensible, de même la lumière peut se manifester sans chaleur appréciable, comme le montrent les corps *phosphorescents*, dont nous parlons plus bas (2393).

C'est le plus souvent au moyen de la combustion, et principalement de la combustion des gaz, que l'on produit artificiellement la lumière; mais les gaz incandescents n'émettent que peu de lumière. Nous avons expliqué, en nous occupant de la flamme (II, 1295), comment l'éclat de celle du gaz d'éclairage

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXI, p. 24.

dépend des particules solides qu'elle tient en suspension. De même la combustion du phosphore, du zinc, du magnésium produit une vive lumière, à cause des poussières d'oxydes qui se forment. La condition pour qu'une flamme rayonne beaucoup de lumière est donc la même que pour qu'elle rayonne beaucoup de chaleur. Mais il faut remarquer que, tandis que la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un poids donné de gaz est toujours à peu près la même, la quantité de lumière est variable, et dépend, comme la température, de la manière dont se fait la combustion.

La couleur des flammes dépend de la nature des substances pulvérulentes auxquelles elles doivent leur éclat; c'est au moyen de sels ou d'oxydes mêlés à la poudre, que les artificiers produisent ces vives couleurs au moyen desquelles ils obtiennent leurs plus brillants effets.

Les gaz incandescents ne rayonnent par eux-mêmes qu'une faible lumière; mais nous avons vu qu'on peut en augmenter notablement l'éclat en produisant la combustion dans un milieu très-comprimé (II, 1301).

2393. PHOSPHORESCENCE. — On désigne sous ce nom la propriété que possèdent certains corps de répandre une faible lumière sans dégagement sensible de chaleur. La phosphorescence peut être *spontanée*, ou être excitée par différents moyens.

I. Phosphorescence spontanée. — La lumière est due dans ce cas à des actions chimiques lentes, que l'on suppose accompagnées de la production des deux électricités se recombinant au fur et à mesure. C'est ce qui a lieu dans l'air pour le *phosphore* proprement dit, qui absorbe de l'oxygène en formant des vapeurs acides; et pour certains bois humides en décomposition, qui forment de l'acide carbonique aux dépens de l'oxygène de l'air. Les poissons de mer deviennent phosphorescents après la mort, quand ils sont dans un certain état de décomposition qui précède la putréfaction. Ici, la présence de l'oxygène de l'air ne paraît pas nécessaire, car Matteucci a reconnu que la lueur ne diminue pas sensiblement dans l'azote, l'hydrogène et l'acide carbonique¹. Ayant agité ces poissons dans de l'eau, il vit ce liquide prendre une apparence laiteuse et devenir lumineux. L'eau ayant été laissée en repos dans l'obscurité, la lueur s'affaiblit peu à peu, et sembla se retirer vers la surface, où elle finit par disparaître. Agité de nouveau, le liquide redevint brillant, même dans le vide et dans les gaz privés d'oxygène. Quand on filtre cette eau, la matière lumineuse reste sur le filtre. Vers 38 à 40°, toute lumière disparaît pour toujours. — La viande peut être phosphorescente, et M. Nuech a reconnu, au moyen du microscope, que la lueur est due à une multitude de *bactéries* vivantes. Après cinq à six jours, ces animalcules étaient remplacés par d'autres espèces, et la corruption de la viande commençait.

La mer, surtout dans la zone intertropicale, répand souvent une lueur assez vive partout où l'eau est agitée, comme au sommet des vagues, sous le choc

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIV, p. 358.

des rames ou de la proue des navires, dans le sillage qu'ils laissent après eux. Cette lumière est attribuée à une matière organique mêlée à l'eau, et qui paraît être répandue par certains animaux. En effet, la phosphorescence de la mer peut être aussi produite par une multitude d'animalcules, méduses, béroés..., qui sont phosphorescents *pendant leur vie*. Quelques espèces ont la faculté de répandre une matière organique qui rend l'eau lumineuse. MM. Qoy et Gaynard, ayant pris, près de l'île Rawack, deux de ces zoophytes, extrêmement petits, les mirent dans un vase rempli d'eau, qui devint bientôt lumineuse dans toutes ses parties. C'est, sans doute, à ces petits animaux qu'est due la matière répandue dans la mer quand elle luit par l'agitation. On pourrait penser, d'après les expériences de Matteucci, que les poissons morts en décomposition contribuent à fournir cette matière. Mais il y a des différences importantes entre la matière lumineuse de ces poissons et celle de la mer : tandis que la première cesse de luire quand on abaisse la température à $+ 3^{\circ}$ ou $+ 4^{\circ}$, celle de la mer répand une lumière plus vive et plus persistante ; l'alcool, l'éther, les acides éteignent la première, tandis qu'ils augmentent beaucoup la phosphorescence de l'eau de mer.

Il y a aussi des animaux phosphorescents vivant dans l'air : des annélides, différentes sortes d'insectes, parmi lesquels les lampyres ou vers luisants, les fulgores, etc. Chez quelques-uns, la volonté paraît intervenir, et une chaleur modérée augmente la leur, qui peut persister pendant plusieurs jours après la mort, surtout s'il fait chaud. La présence de l'oxygène est nécessaire au dégagement de cette lumière, qui est produite par un fluide phosphorescent, tantôt renfermé dans certaines parties de l'animal, tantôt répandue dans toute sa substance. Matteucci a fait un grand nombre d'expériences sur le *Lampyrus italica*¹. Il a exprimé des derniers segments de l'abdomen, une matière jaune phosphorescente, et a vu ces segments séparés, ainsi que l'insecte vivant, cesser de luire à $- 8^{\circ}$. La lumière reparaisait quand il élevait la température, et disparaissait de nouveau à 50° . Cette lumière, qui se produit ordinairement par intermittences, est continue vers 47° . L'insecte vivant et les segments séparés cessent de luire dans l'acide carbonique et l'hydrogène. L'oxygène peut ramener la phosphorescence et l'augmenter notablement, en formant de l'acide carbonique. Beccaria, Mayer... pensaient que l'insolation préalable était nécessaire pour que les vers luisants répandissent de la lumière. Mais Matteucci a pu en conserver pendant 9 jours dans des boîtes fermées contenant de l'herbe, sans qu'ils aient cessé de luire, à quelque heure que ce fût. — La phosphorescence physiologique des animaux aquatiques ou vivant dans l'air est généralement attribuée à une action chimique produite, sur certaines humeurs qu'ils exhalent, par l'oxygène contenu dans l'air ou dans l'eau.

Certains végétaux ont aussi la propriété de répandre une leur assez vive pendant la nuit, après les journées chaudes : par exemple, les fleurs de couleur

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XI, p. 71.

jaune, comme celles de la capucine, de l'œillet et de la rose d'Inde, du soleil et du souci des jardins. — Il y a des champignons, entre autres l'agaric de l'olivier, dont le dessous du chapeau garni de feuillets est phosphorescent. La présence de l'oxygène est encore ici indispensable. L'insolation préalable semble aussi nécessaire; car ces fleurs et ces champignons, plongés dans l'obscurité pendant le jour, ne dégagent pas de lumière.

2394. II. Phosphorescence artificielle. — Les corps rendus phosphorescents par des moyens artificiels répandent des lueurs dont la couleur dépend de leur substance. Ces lueurs peuvent être blanches, jaunes, rouges, vertes, bleues. Dessaigne et P. Heinrich ont indiqué quatre moyens d'exciter artificiellement la phosphorescence : 1° l'élevation de la température; 2° les décharges électriques; 3° les actions mécaniques; 4° l'action de la lumière, particulièrement l'insolation.

1° Une foule de corps solides deviennent phosphorescents quand on les projette sur une surface chaude. Par exemple, beaucoup de pierres précieuses, certains diamants, la craie, les variétés colorées de chaux fluatée, les coquilles d'huître, les sulfates de potasse et de quinine... Le papier, la farine, surtout celle de maïs, et en général les substances organiques bien desséchées, sont dans le même cas. La plupart de ces matières produisent des lueurs au-dessous de 100°; les huiles volatiles en dégagent à 100°. Quand la chaleur change la structure des substances minérales pendant la phosphorescence, celle-ci cesse de se reproduire.

Bequerel a d'abord attribué la phosphorescence à l'électricité, et il expliquait pourquoi certains corps (chlorures de sodium, de mercure; sulfate de potasse, acide arsénieux vitreux), qui sont phosphorescents à 100°, cessent de l'être à la chaleur rouge, en remarquant qu'étant alors bons conducteurs, les électricités ne peuvent acquérir la tension nécessaire pour que leur recombinaison soit accompagnée de lumière. Aujourd'hui, on admet généralement, en partant du système des ondulations, que la chaleur excite dans les molécules de certaines substances, des mouvements vibratoires qui se propagent dans l'éther, à une température inférieure à celle du rouge pour laquelle tous les corps sont lumineux.

2° Pour manifester la phosphorescence par *décharge électrique*, on place le corps entre les branches de l'excitateur universel, et l'on fait passer la décharge. Aussitôt le corps répand une lueur assez vive, de couleur changeante, et persistant quelques secondes. Ce résultat s'observe sur une foule de minéraux non conducteurs; les corps bons conducteurs ne le produisent pas. MM. Dessaignes, Heinrich, et surtout M. Pearseal, ont fait beaucoup d'expériences à ce sujet. Le premier a reconnu, en 1809, que les substances qui ont perdu la faculté d'être phosphorescentes par insolation ou par la chaleur, peuvent la reprendre après avoir subi quelques décharges. Quand un corps répand la lumière phosphorescente, la décharge en augmente beaucoup l'intensité, en produisant souvent une série de magnifiques couleurs.

3^o Les actions mécaniques ne produisent ordinairement la phosphorescence que pendant qu'elles ont lieu. La présence de l'électricité est ici le plus souvent évidente; mais il est permis d'admettre cependant que l'ébranlement communiqué aux molécules peut concourir au phénomène. Le frottement entre substances non conductrices est souvent accompagné de lueurs assez vives, dont nous avons déjà parlé (III, 1582). La lumière jaillit de deux cailloux frappés l'un contre l'autre, et d'une foule de corps, craie, oxyde de plomb... Le feldspath adulaire, frappé à coups de marteau de manière à se fendiller, présente dans chaque fissure une lueur qui peut persister pendant plusieurs minutes; pilé dans un mortier, il paraît tout en feu. L'azotate d'urane cristallisé et sec est illuminé en entier quand on le rompt. Si l'on en met dans un flacon et qu'on agite, il se produit de magnifiques jeux de lumière (Dr Phipson). L'écrasement du sucre entre les doigts, le clivage, la séparation des feuillettes d'une carte, dégagent de la lumière.

En général, les actions mécaniques rendent phosphorescents les corps qui le sont par les autres moyens. Les bons conducteurs, comme les métaux, ne sont donc pas dans ce cas. Dans la cristallisation de certains corps, acide arsénieux, sulfate de potasse ou de soude, on voit de petits éclairs. L'acide borique fondu se fendille en se solidifiant, et de chaque fissure jaillit une vive lumière (Dumas).

4^o L'insolation ne paraît pas produire la phosphorescence aussi généralement que la chaleur. Elle ne peut l'exciter chez la plupart des bons conducteurs, ou bien elle ne la produit que pour un temps très-court. Les mauvais conducteurs demandent souvent une longue exposition aux rayons solaires, mais alors ils luisent pendant longtemps. La plupart des composés à base calcaire : le carbonate et le sulfate de chaux, la chaux fluatée, les pétrifications, les coquilles, les perles; certaines matières organiques, farine, sucre, gomme, cire blanche, luisent après insolation. Le diamant, dont la phosphorescence a été découverte par Boyle, peut quelquefois luire pendant une heure, après une exposition de quelques secondes au soleil.

Le phosphore de Canton n'est autre chose que du sulfure de calcium, que l'on obtient en chauffant avec du soufre, de la poudre de coquilles d'huître calcinées; il répand, après insolation, une lumière jaune assez vive pour qu'on puisse lire. La lumière d'une bougie, celle de la lune, suffisent même pour y exciter la phosphorescence. Le phosphore de Bologne (sulfure de baryum obtenu en calcinant un mélange de sulfate de baryte et de gomme), sur lequel la phosphorescence par insolation a été découverte, vers 1602, par Vincenzo Casciariolo, qui s'occupait d'alchimie, répand aussi une lumière vive, qui dure pendant plus de douze heures. Le phosphore de Baudoin (azote de chaux fondu) répand une lumière blanche, etc.

La phosphorescence excitée par la lumière est attribuée à des vibrations communiquées par les rayons incidents à l'éther intermoléculaire, qui continue ensuite de vibrer pendant un temps plus ou moins long, ne faisant ainsi que restituer peu à peu le travail dépensé pour l'ébranler, comme une cloche qui continue de vibrer longtemps après qu'on a cessé de la frapper.

On fait des fleurs artificielles, ou autres objets, recouverts d'une couche d'un phosphore appliqué à l'état pulvérulent, et qui, s'imprégnant, pour ainsi dire, de lumière pendant le jour répandent ensuite pendant la nuit une lueur plus ou moins vive. M. Norton, en Amérique, a proposé d'enduire ainsi d'un phosphore, les murs des maisons, qui éclaireraient pendant la nuit après avoir été frappés par la lumière pendant tout le jour.

§ 2. — DE LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

I. Propagation en ligne droite. — Ombres.

2395. Rayon de lumière. — *Quand la lumière se propage sans obstacle, dans un milieu homogène, elle marche en ligne droite, comme la chaleur rayonnante.* En effet, si l'on dispose entre l'œil et un point lumineux plusieurs écrans percés d'un petit trou, on ne peut apercevoir le point lumineux qu'autant que tous les trous sont sur une même ligne droite passant par ce point. — On ne peut voir à travers un tube contourné, qu'autant qu'une ligne droite peut être menée entre ses extrémités, sans toucher les parois intérieures. — Enfin, si l'on fait entrer la lumière du soleil par une ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, elle marque sa route en illuminant les poussières en suspension dans l'air, et l'on voit qu'elle forme un cylindre passant par l'ouverture.

Un *rayon de lumière* est une direction partant d'un point d'un corps lumineux, et suivant laquelle la lumière se propage. Un *faisceau de lumière* est un espace cylindrique dont chaque point est traversé par un rayon parallèle à ses arêtes; on le nomme *pinceau*, quand sa section est très-petite. Chaque point d'un corps lumineux lance des rayons qui divergent dans toutes les directions prises en dehors du plan tangent en ce point; en considérant une partie de ces rayons, on a un *faisceau* ou un *pinceau divergent*. Nous ne pouvons isoler un simple rayon; les plus fins pinceaux en contiennent un nombre infini. — Un pinceau ne produit d'effet sur l'organe de la vue qu'autant qu'il y pénètre; s'il ne fait que passer devant l'œil, celui-ci n'en reçoit aucune impression.

2396. De la vision. — De tous les rayons divergents qui partent d'un point lumineux, une petite portion entre dans l'œil par l'ouverture de la *pupille*. Cette portion forme un cône qui a pour base cette ouverture, et dont le sommet est au point lumineux. Ces rayons pénétrant dans l'œil, agissent sur les dernières ramifications d'un nerf spécial, le *nerf optique*, d'où résulte la sensation de lumière. Nous étudierons plus tard le mécanisme de la vision; pour le moment, nous remarquerons que l'impression est produite au fond de l'œil même, et que, cependant, nous avons la faculté de reconnaître la position du point lumineux, quand il n'est pas trop éloigné; mais cela n'a lieu qu'à la suite de l'éducation de l'organe, qui a fini par s'habituer, en comparant certaines conditions de

l'impression, avec la distance connue par le moyen du tact, à voir le point lumineux au sommet du cône de rayons divergents entrant par l'ouverture de la pupille.

Il résulte de ce principe, établi par Barlow à propos des images observées dans les miroirs courbes, que, si un pinceau de rayons partant d'un certain point s (fig. 1658) entre dans l'œil après avoir subi, par des causes quelconques, différentes déviations, le point s sera vu en s' , point de rencontre des prolongements des dernières directions que présentent les rayons en entrant dans l'œil. Ainsi, ce que l'œil perçoit, c'est le degré de divergence des rayons; et c'est par un acte intellectuel subséquent qu'il a conscience de la position du sommet du cône, correspondante à ce degré de divergence, et qu'il y rapporte la position du point lumineux. C'est là l'origine d'une foule d'effets curieux produits par divers instruments, et de beaucoup d'illusions d'optique.

Rayon visuel. — On nomme *rayon visuel*, l'axe du pinceau conique qui entre dans l'œil, ou la ligne allant du sommet du cône au centre de la pupille.



Fig. 1658.

2397. Diamètre apparent. — Si l'on mène des rayons visuels en deux points opposés du contour visible d'un corps, l'angle de ces rayons, ayant son sommet au centre de la pupille, se nomme le *diamètre apparent* ou *angulaire*, ou l'*angle visuel* de ce corps dans

le plan de ces rayons visuels. Si, au lieu du contour d'un corps, on considère deux points isolés, on a leur *distance angulaire* ou *angle visuel*.

Considérons une droite, h , perpendiculaire à la bissectrice de son angle visuel α ; on aura évidemment $\tan \frac{1}{2} \alpha = \frac{h}{2D}$, D étant la distance de la droite au sommet de l'angle. Si le rapport de h à $2D$ est assez petit pour que $\tan \frac{1}{2} \alpha$ puisse être regardé comme se confondant avec l'arc, on aura $\alpha = h : D$, et l'on voit que l'angle visuel est proportionnel à h et en raison inverse de la distance. On tire de là $h = \alpha D$, et si α est exprimé en degrés, on aura $h = l \alpha D$, en appelant l la longueur de l'arc de 1° dans une circonférence de rayon égal à l'unité. La valeur de l est égale à $\frac{2\pi}{360} = \frac{1}{57,3}$; d'où $h = \frac{1}{57,3} \alpha D$, formule d'un usage fréquent, qui donne la hauteur d'un objet éloigné quand on connaît sa distance et son diamètre angulaire.

2398. Corps transparents, opaques. — Il y a des corps à travers lesquels les rayons de lumière passent en conservant leur individualité et restant toujours distincts les uns des autres; ces corps sont dits *diaphanes* ou *transparents*; en regardant à travers, on peut distinguer nettement les objets. Tels sont le verre, l'eau, les gaz... D'autres laissent passer la lumière, mais en mêlant les rayons, qui, à leur sortie, n'ont plus de direction régulière; de manière qu'on ne peut distinguer nettement les objets qui sont du côté opposé;

on les nomme corps *translucides*; tels sont le verre dépoli, le papier, l'albâtre, la corne, etc.

Il y a enfin des corps qui interceptent complètement les rayons lumineux; ce sont les corps *opaques*, comme les métaux, le bois, les pierres... Ces corps laissent cependant passer la lumière, quand ils sont excessivement minces. C'est ce qui a lieu, par exemple, suivant l'observation de Newton, pour l'or en feuille de 0^{mm},001 d'épaisseur. Ce résultat ne peut être attribué à l'existence de fissures dans la feuille d'or; car la lumière du jour, celle d'une bougie, paraissent vertes vues à travers une feuille d'or; ce qui n'aurait pas lieu si cette lumière passait par de petites fissures. C'est pour cela que les corps qui se présentent sous un très-petit volume, comme les animaux infusoires, les fibres textiles, les poussières fines, les précipités chimiques, vus au microscope, se montrent transparents.

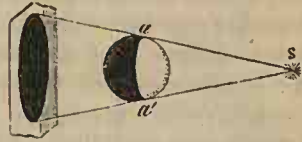


Fig. 1659.

2399. OMBRE. PÉNOMBRE. — Quand un point lumineux isolé *s* (fig. 1659) envoie des rayons sur un corps opaque, ces rayons sont interceptés, et il y a, du côté opposé du corps, un espace privé de lumière, qu'on appelle l'*ombre*. Si l'on place un écran derrière le corps, une partie de cet écran n'est pas éclairée, et constitue l'*ombre portée*. Pour avoir la limite de l'ombre, on mène par le point *s* une tangente au corps, et on la fait tourner en l'appuyant constamment sur sa surface, de manière à engendrer un cône enveloppant. L'intersection de la surface de ce cône avec l'écran forme la limite géométrique de l'*ombre portée*, et la courbe de contact du corps avec la surface du cône, est la ligne de séparation de l'ombre et de la lumière sur le corps.

Remarque. — Nous verrons plus tard que les rayons de lumière qui rasant la surface du corps opaque, semblent s'infléchir suivant des lois particulières, de manière qu'il y a de la lumière dans l'ombre géométrique, et de l'obscurité en certains points placés en dehors de cette ombre. Si ce phénomène, que nous étudierons plus tard sous le nom de *diffraction*, ne s'observe pas habituellement, c'est qu'on n'a pas habituellement affaire à un seul point, mais à un ensemble de points rayonnants formant la surface d'un corps lumineux.

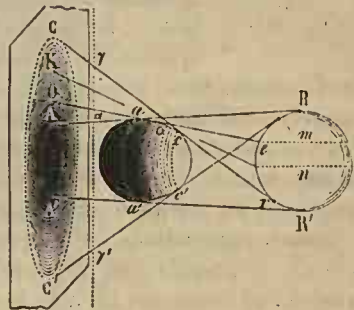


Fig. 1660.

Pénombre. — Considérons maintenant un corps lumineux de dimensions finies *RR'*, et un corps opaque *aa'* (fig. 1660). Si nous construisons un cône enveloppant les deux corps, en faisant tourner la tangente commune extérieure *AR*, nous obtiendrons une courbe *AA'* sur l'écran, et une autre *aa'*, sur

le corps, qui limiteront sur l'écran et sur le corps un espace dans lequel il ne parviendra pas de lumière. Si maintenant nous construisons un second cône en faisant tourner la tangente *intérieure* *Cer*, ce cône donnera deux courbes *CC'*, *ce'*, au-delà desquelles le corps et l'écran recevront des rayons lumineux, de tous les points du corps *RR'*. Entre les courbes *AA'*, *CC'*, et *aa'* *ce'*, l'écran et le corps ne recevront de rayons que d'une partie de *RR'*, d'autant plus petite que le point considéré sera plus rapproché de l'ombre absolue. Par exemple, on voit, en menant du point *O* une tangente *Ooe* au corps opaque, que ce point ne recevra que la lumière émanant de la partie *Rm* du corps lumineux; et il en sera de même en *o* sur le corps opaque. Le point *K* ne recevra, de même, que la lumière émanant de la partie *Ru*. — L'espace compris entre les deux courbes, tant sur l'écran que sur le corps opaque, est donc éclairé inégalement, et de plus en plus à partir de la limite de l'ombre absolue. Cet espace se nomme *pénombre*.

On voit facilement que la pénombre portée est d'autant plus étendue que les



Fig. 1661.

corps lumineux et opaque sont plus rapprochés l'un de l'autre, et que l'écran est plus éloigné du corps opaque. Si, par exemple, l'écran était en $\gamma\gamma'$, la pénombre aurait pour largeur γz , moindre que *CA*. C'est pour cela que les ombres faites au soleil ou à la lumière d'une bougie, ont des contours nets quand le corps opaque est très-rapproché de la surface qui reçoit l'ombre, et des contours diffus quand la distance est très-grande. On voit que l'angle $CaA = Rar$ n'est autre chose que le diamètre apparent du corps lumineux vu d'un point du



Fig. 1662.

corps opaque. Ainsi, pour le soleil, les rayons tangents aux corps opaques, et qui servent de limites à la pénombre, forment entre eux un angle de $30'$, qui est le diamètre apparent moyen du soleil. — C'est la pénombre projetée derrière la terre éclairée par le soleil qui fait que, dans les éclipses de lune, ce dernier astre perd peu à peu son éclat, au lieu de s'obscurcir tout d'un coup.

2400. Applications. — C'est en partie en imitant les teintes graduées que présente la pénombre sur les corps éclairés d'un seul côté, que les peintres produisent l'illusion qui fait voir le dessin en relief. On a fait une ingénieuse application de la pénombre pour produire certains effets de clair-obscur, au moyen des ombres portées : on découpe une carte de manière à représenter les contours d'un objet quelconque (fig. 1661), et l'on ouvre des jours correspondants aux parties qui doivent être représentées complètement éclairées. Si l'on place cette carte entre une bougie et un écran, et très-près de l'écran, les ombres et les jours se présentent comme en *A*; mais, si l'on éloigne l'écran de la carte, la pénombre devient sensible, et les teintes se fondent de manière à imiter un dessin à l'estompe, comme on le voit en *B* (fig. 1662).

Pour évaluer la hauteur d'un édifice, tel que *AD* (fig. 1663), quand on connaît

le pied, D, de la verticale qui passe par le sommet, on mesure la longueur DB de l'ombre portée, et on la compare à l'ombre bd d'une règle verticale ad de longueur connue. Les rayons solaires pouvant être regardés comme parallèles, les hauteurs AD et ad sont entre elles comme les longueurs BD, bd des ombres,

— Cette méthode est attribuée à Thalès de Milet, qui mesura ainsi la hauteur des obélisques de l'Égypte, à la grande admiration du roi Amasis.

La pénombre étant toujours très-petite par rapport à la hauteur cherchée, le résultat comporte une assez grande précision. Mais, quand il s'agit d'obtenir exactement la position de l'extrémité de l'ombre (par exemple, de celle d'un gnomon, pour tracer une méridienne), on termine le style par une plaque percée d'un petit trou, à travers lequel passent les rayons solaires, qui viennent peindre, comme nous allons le voir, au milieu

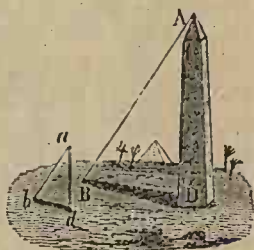


Fig. 1663.

de l'ombre de la plaque, une image nette du soleil, dont on prend le centre.

2401. Images par les petites ouvertures. — Quand la lumière, partant d'un corps, entre dans une chambre noire par une très-petite ouverture, elle vient peindre sur un écran opposé une image de ce corps, quelle que soit la forme de l'ouverture. Aristote avait observé ce phénomène sur le soleil et la lune, et il cherchait à l'expliquer en disant que la lumière conservait avec le corps lumineux, une *ressemblance* qu'elle reprenait dès qu'elle avait franchi l'obstacle qui la gênait.

On se contenta de cette prétendue explication, ou plutôt on regarda le fait comme inexplicable, jusqu'à Maurolicus et Kepler. Voici comment raisonnait le premier :

Menons par un point a du bord du petit trou (fig. 1664), des lignes

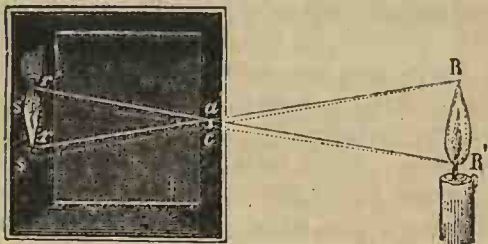


Fig. 1664.

droites aboutissant à chacun des points du corps lumineux RR', chacune de ces droites rencontrera l'écran, et pourra être prise pour un rayon lumineux apportant sur cet écran la lumière qui part du point correspondant, avec son éclat particulier et sa couleur. Chaque point éclairé de l'écran renvoie dans tous les sens la lumière qu'il reçoit (2391), et il est vu comme s'il était lumineux par lui-même ; et, comme il ne reçoit ainsi qu'un seul rayon, on voit sur l'écran une image, évidemment renversée, du corps lumineux. Si l'on fait les mêmes constructions pour tous les points de l'ouverture, on obtiendra une infinité d'images presque entièrement superposées, et d'autant mieux que l'ouverture

sera plus petite par rapport à sa distance à l'écran; ainsi, les points *a* et *c* de l'ouverture donneront les images *m'*, *ss'*, qui se dépasseront mutuellement de quantités insensibles, si *ac* est très-petit.

Kepler présente la même explication sous une autre forme : imaginons que chaque point du corps lumineux soit le sommet d'un pinceau conique de lumière allant former sur l'écran une image de l'ouverture, comme cela a lieu, en effet, avec un simple point lumineux. Si les images n'avaient pas de dimensions appréciables, chaque pinceau pourrait être considéré comme un simple rayon, et l'écran recevrait une image renversée de l'objet. Les petites images, empiétant les unes sur les autres, formeront encore une image de l'objet, mais un peu confuse, et d'autant plus que l'ouverture sera plus grande par rapport à la distance *ar*. Le contour de l'image sera aussi d'autant plus net que l'ouverture sera plus petite; c'est ce qui fait l'exactitude du gnomon, dont le style est muni d'une plaque percée d'un très-petit trou (2400).

Chambre noire simple. — Cet appareil, imaginé en 1560 par Jean-Baptiste Porta, consiste simplement en une boîte (*fig.* 1664), dans laquelle la lumière ne pénètre que par une très-petite ouverture *ac* pratiquée en mince paroi, et dans laquelle les objets extérieurs viennent peindre, avec leurs couleurs, leur image renversée, sur un écran. Cette image est évidemment d'autant plus grande, que l'écran est plus éloigné; mais, en même temps, elle est d'autant moins brillante, la même quantité de lumière se trouvant répartie sur une plus grande surface. Pour que l'image soit nette, il faut que l'ouverture soit très-petite; mais alors, les rayons qui tombent au même point de l'écran étant peu nombreux, l'image n'a qu'un faible éclat. Si l'on agrandit l'ouverture, l'image est plus brillante, mais moins nette. Nous verrons plus tard comment Porta a évité ce double écueil, par l'emploi d'une lentille.

Chaque jour, nous sommes témoins d'effets produits par les petites ouvertures : dans les chambres fermées, la lumière pénétrant par des fentes, de petites ouvertures des volets, vient souvent peindre sur les murs, sur le plafond, les images plus ou moins confuses des objets extérieurs. Les rayons solaires, en passant par les interstices des feuilles des arbres, forment sur le sol des images arrondies, ordinairement elliptiques, les rayons frappant obliquement le sol. La lune donne ainsi des images représentant ses différentes phases. Dans les éclipses partielles de soleil, l'image de cet astre est un croissant; quand l'éclipse est annulaire, l'image présente la forme d'un anneau.

II. Mesure de la vitesse de la lumière.

2402. Historique. — Les anciens croyaient généralement que la lumière se transmettait instantanément. Cependant, plusieurs philosophes, considérant qu'il n'y a pas d'effet sans durée, ont admis sa propagation progressive. Tel était Empédocle, qui répondait même à ceux qui lui objectaient que les astres

seraient alors vus hors de leur véritable position la lumière nous en arrivant d'une direction qu'ils auraient déjà quittée, que le mouvement du ciel n'est qu'une apparence provenant de la rotation de la terre sur son axe, et qu'alors l'observateur, allant trouver le rayon, voyait l'astre sur le prolongement de ce rayon, où il se trouve réellement. Parmi les modernes, F. Bacon est un des premiers qui aient admis que la lumière ne se transmet pas instantanément; ce que Galilée essaya plus tard de vérifier par l'expérience. Il se plaça sur une montagne, à une distance de 1800 mètres d'un observateur muni, comme lui, d'une lanterne allumée, qu'il devait découvrir au moment où il verrait disparaître celle de Galilée. Si la lumière mettait un temps appréciable à aller d'une station à l'autre, chaque observateur devait voir disparaître la lumière de l'autre, quelques instants après avoir caché la sienne. Mais les lumières disparaissaient exactement au même instant. Les académiciens de Florence firent des expériences semblables sur des distances trois fois plus grandes, sans obtenir de meilleur résultat.

C'est à l'astronome danois Olaus Rømer qu'est due la première évaluation de la vitesse de la lumière. Il prit ses distances dans les espaces planétaires, et s'appuya sur les éclipses du premier des quatre satellites de Jupiter observé dans une lunette. Peu s'en fallut que D. Cassini ne le précédât dans cette belle découverte; ayant aperçu quelques retards dans les éclipses du premier satellite, il les attribua d'abord à la transmission progressive de la lumière, et trouva qu'elle devait employer 14 minutes à traverser l'orbite terrestre. Malheureusement, il renonça à cette idée, les autres satellites ne lui ayant pas donné les mêmes résultats, l'instant précis de leurs éclipses étant incertain à cause de la lenteur de leurs mouvements, et de la pénombre qu'ils traversent avant de disparaître, pénombre peu sensible pour le premier satellite.

2403. Méthode de Rømer. — En 1655, Rømer, employé en France par D. Cassini à la construction des tables des satellites de Jupiter, remarqua que, dans les *oppositions*, c'est-à-dire quand Jupiter était directement opposé au soleil par rapport à la Terre, les éclipses avaient lieu un peu plus tôt qu'elles n'étaient annoncées; et qu'elles avaient lieu plus tard, dans les *conjonctions*, où Jupiter est à la plus grande distance possible de la Terre. Il remarqua, en outre, que, dans les positions intermédiaires, l'avance ou le retard étaient proportionnels aux changements de distance de la Terre à Jupiter. Il conclut de là que la lumière se transmet progressivement, et il chercha à en mesurer la vitesse.

Jupiter, J (*fig.* 1665), fait sa révolution autour du soleil, S, en 11 ans et 10 mois environ, et le premier satellite accomplit en 42 heures et 30 minutes sa révolution *synodique* autour de la planète, c'est-à-dire qu'il met ce temps à revenir à la droite JS qui joint les centres de Jupiter et du soleil, droite qui se déplace avec la planète. Pour obtenir le nombre de 42^h 30^m, on a cherché le temps qui s'écoule entre deux *immersions* consécutives du satellite dans le cône d'ombre projeté derrière la planète. Pour cela, on observe un assez grand nombre d'immersions consécutives, et l'on divise le temps total par le nombre



des éclipses. Cela doit se faire dans le voisinage des oppositions ou des conjonctions, parce que, les distances iT , JT , $i'T$ de Jupiter à la Terre T ne changeant pas alors sensiblement d'un jour à l'autre, la vitesse de la lumière n'a pas d'influence sur les résultats. On ne peut, du reste, observer aux conjonctions et oppositions même, l'ombre de Jupiter étant conique, et le contour de cette ombre se trouvant alors caché par le corps de la planète, comme on le voit en menant la ligne Ta tangente au globe de Jupiter. En i' , au contraire, le moment de l'immersion pourra s'observer, et en i , celui de l'émergence.

Cela posé, on observe l'heure exacte d'une immersion du satellite, en i' , dans le voisinage de l'opposition; puis, quelques mois plus tard, l'heure exacte d'une autre immersion, en J' , dans le voisinage de la conjonction, la Terre étant venue en T' . Lors de cette seconde observation, la distance $T'J'$ de la Terre à Jupiter est plus grande que lors de la première, de tout le diamètre de

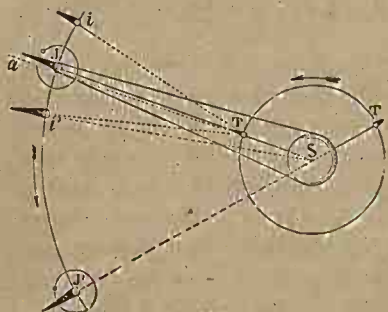


Fig. 1665.

l'orbite terrestre; le moment de l'immersion paraîtra donc retardé (par rapport à ce qu'il eût été si la distance n'avait pas varié) de tout le temps nécessaire à la lumière pour traverser le diamètre de cette orbite. Si ce temps était insensible, en divisant l'intervalle écoulé entre les deux observations par 42^h et 30^m , on devrait trouver un nombre entier représentant le nombre d'éclipses accomplies. Or, on trouve un reste, qui est, d'après les observations très-

précises de Delambre faites sur plus de 1000 éclipses, de 16 minutes 26 secondes, et qui provient du retard apporté au temps de la deuxième observation. La lumière emploie donc 16^m 26^s à franchir le diamètre de l'orbite terrestre. Divisant ce diamètre, qui est d'environ $76\,461\,000$ lieues de 4000 mètres par 16^m 26^s , on trouve à peu près $77\,000$ lieues, plus de 7 fois le tour de la terre, pour l'espace parcouru en 1^s , c'est-à-dire pour la vitesse de la lumière. On ne peut répondre du second chiffre, à cause des incertitudes des observations.

La lumière nous vient du soleil en 8^m 13^s . Un boulet des canons anciens qui conserverait toute sa vitesse initiale emploierait plus de vingt ans à franchir le même espace. La lumière met environ 1^s , 2 à nous arriver de la lune, 1^h 18^m pour aller du soleil à Saturne, et 4^h pour aller jusqu'à Uranus. Les étoiles sont tellement éloignées de nous que la lumière emploie trois ans à nous venir de la plus rapprochée. Or, si l'on considère cette multitude de petites étoiles et de nébuleuses qu'on n'aperçoit qu'au moyen de puissants télescopes, il sera permis d'admettre que ces corps sont à des distances de nous égales à des milliers et même des millions de fois la distance de l'étoile la plus rapprochée. La lumière doit donc mettre des siècles et des milliers d'années à nous venir de ces astres;

et, si l'un d'eux venait à être anéanti par une cause quelconque, nous continuerions à le voir briller paisiblement, au moyen de la lumière qui serait en route au moment de la catastrophe, de même que nous continuons à percevoir un son quand la cause éloignée qui l'a produit a cessé d'agir.

2404. Vitesse de la lumière déduite de l'aberration. — C'est en 1675 que Røemer publia sa découverte; elle n'avait été accueillie qu'avec doute, et était à peu près oubliée, quand Bradley en réveilla le souvenir, en expliquant l'aberration des étoiles par la combinaison du mouvement de la terre autour du soleil, avec la transmission progressive de la lumière. L'aberration consiste en une déviation apparente des étoiles, du côté vers lequel marche la terre, qui se transporte autour du soleil avec une vitesse moyenne de 304 kilomètres par seconde¹. Comme cette déviation n'a pas lieu, au même moment, dans le même sens pour toutes les étoiles, leurs distances angulaires sont différentes aux diverses époques de l'année, et c'est par là que Molineux et Bradley découvrirent l'aberration, que Bradley expliqua ensuite de la manière suivante :

Considérons une étoile envoyant de la lumière, suivant sa , au point a de la surface de la terre (fig. 1666). Si celle-ci était en repos, c'est suivant as qu'il faudrait diriger le tuyau d'une lunette pour voir l'étoile. Mais, si la terre se déplace dans le sens ca , il est évident que, pour qu'une molécule ou une ondulation lumineuse suive l'axe du tube, celui-ci devra être dirigé suivant cn , de telle manière que le point c se déplace de ca pendant que la lumière parcourt l'espace na . L'étoile apparaîtra alors dans la direction as' , tandis qu'elle est réellement sur la droite as . L'angle nam se nomme l'angle d'aberration. La lumière parcourant na pendant qu'un point de la surface de la terre se transporte de c en a , on aura, en appelant V la vitesse de la lumière, v celle de la terre, et α l'angle d'aberration :

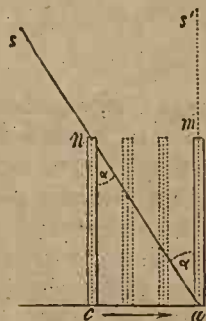


Fig. 1666.

$$[1] \quad V : v = \overline{na} : \overline{ca} = \sin \overline{acn} : \sin \alpha; \quad \text{d'où} \quad \sin \alpha = \frac{v}{V} \sin \overline{acn}.$$

On voit que l'aberration est maximum quand l'angle acn est droit, c'est-à-dire quand la lunette est perpendiculaire à la direction du mouvement de translation de la terre, c'est-à-dire à la tangente ca à l'écliptique, au point qu'occupe la terre; elle est donc maximum au même instant pour toutes les étoiles qui sont comprises dans le plan normal à cette tangente. Elle est nulle, au contraire, quand l'angle acn est nul, c'est-à-dire pour les étoiles qui sont sur le prolongement de l'élément de l'écliptique parcouru par la terre au moment de

¹ Le mouvement de la terre autour de son axe, n'étant que de 460 mètres par seconde à l'équateur, n'intervient pas sensiblement dans le phénomène.

l'observation. L'aberration passe donc chaque année par deux maximum de sens inverse, séparés par un intervalle de six mois environ. Les étoiles placées dans le plan de l'écliptique semblent décrire une petite ligne droite; celles qui sont au pôle de l'écliptique décrivent une circonférence; et celles qui occupent des positions intermédiaires, des ellipses d'autant plus allongées que ces étoiles sont plus éloignées du pôle de l'écliptique.

L'équation [1] donnerait la valeur de V , si v et l'angle d'aberration étaient connus. Or, la position réelle de l'étoile est au centre de l'ellipse qu'elle semble décrire; puisque l'aberration change de sens tous les six mois. Le maximum d'aberration a donc pu être mesuré; il est égal à $20'',44$, c'est-à-dire que le grand axe de l'ellipse que semble décrire annuellement l'étoile, est de $40'',88$. L'angle acn étant égal à 90° dans le cas du maximum, la formule donne, en représentant par v la vitesse moyenne de la terre dans son orbite,

$$V = \frac{v}{\sin 20'',44}; \quad \text{ou} \quad V = \frac{2\pi r}{t \sin 20'',44}; \quad [2]$$

car on a, en regardant l'orbite terrestre comme une circonférence de rayon r , $2\pi r = vt$; t étant le temps de la révolution de la terre autour du soleil, exprimé en secondes. Cette méthode a conduit à une valeur de la vitesse de la lumière qui diffère de moins de 0,01, du nombre trouvé par la méthode de Rømer.

Malgré les essais infructueux de Galilée et des académiciens de Florence, deux physiciens français, M. Fizeau et L. Foucault, ont entrepris de mesurer la vitesse de la lumière sur des distances prises à la surface de la terre; le premier opérait sur quelques kilomètres seulement, par la méthode que nous allons décrire, et le second sur des distances dépassant à peine 1 mètre.

2405. Méthode de M. Fizeau. — Les expériences de M. Fizeau datent de 1849; elles ont été faites par une méthode analogue à celle qu'a employée le même physicien, conjointement avec M. Gounelle, pour mesurer la vitesse de l'électricité (III, 2050). En voici le principe: Un faisceau de rayons lumineux est coupé transversalement par les dents d'une roue tournant rapidement, dents qui ne laissent passer la lumière que par intermittences. Cette lumière va se réfléchir normalement sur un miroir plan placé au loin; revient sur elle-même, et passe de nouveau par les dents de la roue, qui se sont déplacées, pendant que les molécules ou les pulsations lumineuses parcouraient deux fois la distance qui sépare le miroir de la roue. Si donc celle-ci tourne avec une vitesse convenable, la pulsation qui aura passé entre deux dents, trouvera à son retour une dent à la place d'un intervalle, et sera interceptée; de sorte qu'en regardant à travers la roue, on ne verra aucune lumière. Le temps employé par la lumière pour aller de la roue au miroir, et à revenir, sera égal au temps qu'il faut aux dents pour venir occuper la place des vides, supposés de même grandeur, qui les séparent. Ce temps se déduit de la vitesse de la roue et du nombre de ses dents. Si, par exemple, ayant n dents, elle fait t tours par seconde, il faudra $1 : nt$

secondes pour qu'une dent vienne prendre la place de la précédente, et $1 : 2nt$ pour qu'elle prenne la place du vide précédent.

La figure 1667 représente l'ensemble de l'appareil, destiné à appliquer cette méthode. En rr' , est la roue dentée, dite *des extinctions*, vue de profil; elle est mise en mouvement par un poids et des rouages à dents hélicoïdales; un compteur fait connaître sa vitesse, qui peut être modifiée au moyen d'un frein agissant sur l'arbre f de la troisième roue, et dont on voit la disposition, à part, en F. On serre plus ou moins les vis v , v' , jusqu'à ce qu'on ait obtenu la vitesse désirée. Les rayons lumineux émanant d'une source s , traversent deux lentilles l , l' , sont réfléchis par une glace transparente, mn , inclinée à 45° , et se concentrent en un foyer o , placé précisément au point où passent les dents de la roue rr' . Puis, ces rayons traversent une lentille a , qui les rassemble en un faisceau cylindrique. Ce faisceau franchit, sans perdre de son intensité autrement que par l'absorption de l'air, l'espace qui sépare l'appareil, d'un miroir plan éloigné, m ; il traverse

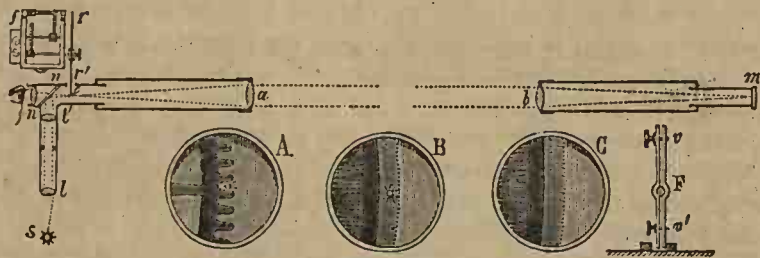


Fig. 1667.

d'abord une lentille b , qui réunit les rayons en un foyer, sur la surface même du miroir m . Ce dernier les renvoie, de manière à former un faisceau réfléchi qui suit en sens inverse la route du faisceau incident; traverse la lentille a , forme un nouveau foyer au point o , et, après avoir traversé la glace mn , vient tomber dans l'œil de l'observateur armé d'une loupe.

Quand la roue ne tourne pas, la lumière réfléchie en m apparaît sous la forme d'un point lumineux, entre deux dents, comme on le voit en A. Quand la roue tourne avec une vitesse croissante, on distingue le point lumineux de plus en plus faiblement, à travers l'espace que parcourt les dents, comme en B. Enfin, si la vitesse est convenable, le point lumineux disparaît, comme en C. Avec les dimensions de la roue employée, il suffisait de 12,6 tours par seconde pour obtenir ce résultat. — Si l'on accélère alors le mouvement de la roue, le point lumineux reparaît, comme on devait le prévoir; et il disparaît de nouveau quand la vitesse devient double, triple... de celle qui correspondait à la première extinction.

Les essais de M. Fizeau, faits entre Suresnes et Montmartre, dont la distance est de 8633^m, ont donné une vitesse de 74600 lieues de 4 kilomètres.

La méthode de L. Foucault est moins sûre que la précédente, mais elle se prête surtout à la comparaison des vitesses de la lumière dans différents milieux. Nous ne la décrirons que plus tard, quand nous aurons montré l'importance de semblables comparaisons. Disons seulement qu'elle a conduit à la valeur moyenne de 74500 lieues par seconde, qui diffère à peine de celle de M. Fizeau, et qui est notablement plus faible que celle à laquelle avaient conduit les méthodes astronomiques.

2406. Expériences de M. Cornu. — Quand on évalue la vitesse de la lumière par la méthode de Rømer ou par celle de l'aberration, le résultat dépend du nombre que l'on adopte pour exprimer la distance de la terre au soleil, nombre auquel ce résultat est proportionnel. Si donc on évaluait la vitesse au moyen d'une méthode indépendante de cette distance, celle-ci pourrait ensuite être calculée, et elle serait ainsi obtenue au moyen d'observations faites sur Jupiter ou sur des astres pris en dehors de notre système planétaire. Or, nous venons de voir qu'il existe deux semblables méthodes et qu'elles ont donné des vitesses moindres de $\frac{4}{30}$ environ que celle des méthodes astronomiques. La distance du soleil à la terre serait donc aussi trop forte de $\frac{4}{30}$, et par suite les distances des autres planètes au soleil, ces distances se déduisant toutes de la première au moyen de la dernière loi de Kepler (I, 95). Ces conséquences ont confirmé les doutes que les astronomes avaient conçus, d'après les résultats obtenus pendant une des dernières oppositions de la planète de Mars, par M. Winnerek à Poulkowa, et par M. Bond au Cap. Aussi attendait-on avec impatience l'époque du passage de Vénus sur le soleil, le 9 décembre 1874, pour obtenir une nouvelle évaluation de cette distance; et, quelques mois avant l'époque, des savants partis de France et de tous les pays du monde pour observer ce phénomène, se distribuèrent dans une vingtaine de stations éloignées les unes des autres. Pendant que ce grand mouvement scientifique se préparait et s'accomplissait, de nouvelles expériences étaient entreprises par M. A. Cornu, en suivant la méthode de M. Fizeau pour obtenir une évaluation très-précise de la vitesse de la lumière, afin d'en déduire la distance de la terre au soleil et de la comparer à celle qui devait être calculée au moyen du passage de Vénus.

Les premières expériences de M. Cornu ont été faites entre l'École polytechnique et la tour de l'administration des Télégraphes, puis le mont Valérien. Mais pour les plus précises, les stations ont été la plate-forme de l'Observatoire de Paris et la tour de Montlhéry, qui en est éloignée d'environ 23 kilomètres.

La figure 1668 représente la disposition d'ensemble de l'appareil. L est une lunette astronomique, de 9^m de longueur, et dont la lentille objective, placée en *a*, n'a pas moins de 37^{cm} de diamètre. La source lumineuse était une lampe oxy-hydrique (II, 1299), ou même une simple lampe à pétrole quand l'air était très-pur. La lampe était renfermée dans une lanterne, *s*, placée latéralement. Des massifs en pierre portaient une caisse *n* contenant le mécanisme à poids faisant tourner la roue des extinctions. Le faisceau lumineux, réfléchi suivant l'axe de la lunette par la glace sans tain inclinée à 45°, était rendu parallèle par

l'objectif *a*, allait se réfléchir au fond d'un gros tube de fonte placé sur la tour de Montlhéry, et revenait au point de départ. M. Cornu a pu observer jusqu'à 20 extinctions successives, en modérant l'action d'un frein de manière à accélérer peu à peu le mouvement de rotation en *n*.

Le point important était d'obtenir une mesure très-précise du temps, et d'évaluer exactement la vitesse de rotation de la roue au moment de l'extinction, cette roue ne tournant pas avec une régularité parfaite. Ces résultats ont été obtenus par la méthode graphique avec secours d'électro-aimants, si heureusement employée par V. Regnault dans ses recherches sur la vitesse du son (I, 592). Sur un cylindre enregistreur *C* (fig. 1668), mu par un appareil d'horlogerie à pendule conique *h*, est appliquée une feuille de papier enduite de noir de fumée, sur lequel des styles marquent des traits blancs. Ces styles sont

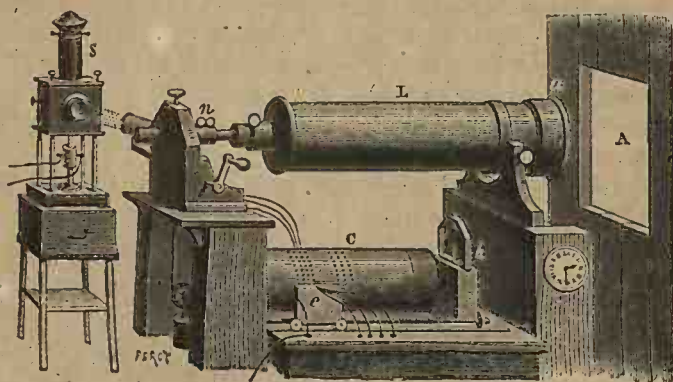


Fig. 1668.

actionnés par des électro-aimants disposés derrière l'écran *e*; le tout est porté par un chariot qu'une longue vis, mue par l'horloge *h*, fait glisser le long du cylindre *C*, de manière que chaque style abandonné à lui-même décrit une hélice. Un des styles marque les secondes données avec une grande précision par une horloge astronomique; un autre est fixé à un diapason, et marque en zigzag les dixièmes de seconde; un troisième reçoit un déplacement latéral et marque un crochet, au moment où une des roues du mécanisme *n*, venant d'accomplir un tour, ferme un instant le circuit de son électro-aimant. Enfin, un dernier style se déplace et fait une marque, quand l'observateur appuie sur la tête d'une clef Morse (III, 2300), au moment où il aperçoit une extinction. On peut ensuite, en comparant, à côté de cette marque, les indications du temps avec celles des tours de la roue, connaître la vitesse de celle-ci au moment même où l'extinction a été enregistrée.

De nombreuses expériences très-concordantes, faites par ce moyen, ont donné, pour la vitesse de la lumière, 300 400 kilomètres, ou environ 75 000 lieues

par seconde. Ce résultat est d'accord avec celui qu'on a calculé dernièrement au moyen des méthodes astronomiques, en employant la nouvelle valeur de la distance du soleil à la terre déduite de la discussion des observations du passage de Vénus sur le soleil en 1874. Il est résulté de ce travail que la parallaxe solaire (moitié de l'angle sous lequel la terre serait vue du centre du soleil) est égale à $8''86$, valeur supérieure à celle qu'on avait admise antérieurement.

2407. Vitesse des rayons de différentes couleurs. — La méthode de M. Fizeau permettrait de chercher directement si les rayons de différentes couleurs se propagent avec la même vitesse dans l'air, en expérimentant avec des flammes colorées. L'aberration conduit à admettre l'égalité de vitesse dans le vide, car elle est la même pour toutes les étoiles, quelles que soient leurs dimensions et leur couleur. Mais cette méthode n'est pas assez précise pour ne pas laisser de doutes. Arago a proposé trois manières de résoudre la question. Nous verrons plus tard que la lumière blanche est formée d'un mélange de rayons de différentes couleurs ; or, si ces rayons ne se propagent pas avec la même vitesse, un satellite de Jupiter devra changer de couleur au moment de s'éclipser ; car, des derniers rayons lancés au moment de l'immersion, les plus lents devront nous arriver après les plus rapides, et ne leur seront plus mêlés. Aux émer-sions, au contraire, les rayons colorés les plus rapides nous arrivant les premiers, le satellite paraîtra d'abord coloré, et d'une manière différente. Or, on ne voit rien de semblable. Ce moyen, qui paraît avoir été indiqué par Newton, dans une lettre à Flamsteed, n'est pas très-précis à cause de la pénombre et de l'atmosphère de Jupiter. Arago a proposé encore d'observer l'ombre des satellites sur la planète, et de voir si elle est bordée de bandes colorées à ses bords antérieur et postérieur. Enfin, il a signalé les étoiles changeantes comme pouvant fournir des indications sur le même sujet. La diminution d'intensité équivalant à une suppression de lumière, ces étoiles devraient changer de couleur en changeant d'éclat. Mais les variations d'éclat se font très-lentement, puisque la période la plus courte est de près de trois jours, pour *Algol*, de Persée. En tout cas, comme on n'a jamais pu distinguer de changements de couleur, on est en droit d'admettre que tous les rayons colorés ont la même vitesse dans le vide, d'autant mieux que cette égalité est une conséquence du système des ondulations.

§ 3. — PHOTOMÉTRIE

2408. On nomme *photométrie* la partie de l'optique qui s'occupe des lois de l'intensité de la lumière et de la comparaison des intensités des diverses sources lumineuses. Nous allons d'abord établir trois principes, que nous avons déjà rencontrés dans l'étude de la chaleur rayonnante.

I. Variation de l'intensité avec la distance. — *L'intensité de la lumière émanant d'un point et reçue par une surface, varie en raison inverse du*

carré de la distance. Nous entendons ici par *intensité*, la quantité de lumière reçue par l'unité de surface. Ce principe, établi par Kepler, se démontre de la même manière que pour la chaleur rayonnante (II, 920); il constitue une loi générale de la nature relative aux effets qui varient avec la distance, car elle préside à la gravitation, à l'intensité du son, aux forces magnétiques, électriques et électromagnétiques. Ce principe suppose, pour la lumière comme pour la chaleur, que chaque rayon conserve individuellement son intensité, c'est-à-dire qu'aucune partie n'est absorbée par le milieu ambiant.

Si, au lieu d'un simple point, on considère un *corps* lumineux, la loi s'appliquant à chaque point, s'appliquera aussi à l'ensemble, si le corps est assez éloigné pour que tous ses points puissent être supposés également distants de la surface éclairée. Dans ce cas, le diamètre apparent étant en raison inverse de la distance (2397), on peut dire que *l'intensité de la lumière varie en raison directe du carré du diamètre apparent ou de la surface apparente du corps lumineux*, en appelant ainsi l'espace compris dans la surface conique enveloppant ce corps, et ayant son sommet au point éclairé.

Pour vérifier par expérience la loi qui nous occupe, on assemble plusieurs bougies égales, pour former des sources d'intensité 4, 9, 16... fois plus grandes, et l'on reconnaît, au moyen des photomètres décrits plus loin (2414), que ces systèmes doivent être placés à des distances *double, triple, quadruple,...* pour n'éclairer une même surface qu'autant qu'une simple bougie. Cela suppose, ce que l'on peut regarder comme évident, que 4, 9... bougies égales émettent 4, 9... fois autant de lumière qu'une seule.

2409. Conséquences. — Cette première loi nous explique pourquoi, dans l'expérience de la chambre noire de Porta (2401), l'éclat, en chaque point de l'image, est indépendant de la distance de l'objet lumineux ou éclairé qui la produit. En effet, l'intensité de l'illumination produite par le pinceau de rayons émanant d'un point de l'objet et passant par l'ouverture varie en raison inverse du carré de la distance à cette ouverture. D'un autre côté, le diamètre de l'image, sensiblement proportionnel à l'angle visuel pris de l'ouverture, est en raison inverse de la distance D (2397), et sa surface en raison inverse du carré de cette distance. La quantité de lumière partant de l'objet est donc concentrée dans un espace 4, 9... fois moindre, quand l'intensité de chaque pinceau est rendue 4, 9... fois plus petite à cause d'une distance 2, 3... fois plus grande; il y a donc compensation. — Cela nous explique pourquoi les corps *lumineux* présentent *sensiblement* le même éclat quand on les voit à des distances différentes; c'est que notre œil, comme nous le verrons, est une véritable chambre noire. C'est ainsi que les planètes, par exemple, *Vénus*, paraissent toujours aussi brillantes quand elles sont à une même hauteur au-dessus de l'horizon et que l'atmosphère est également pure, quoique leur distance à la terre, et par conséquent leur diamètre apparent, varie beaucoup. Il en est de même des flammes d'éclairage, quand la quantité de lumière absorbée par l'atmosphère est négligeable. Il faut supposer aussi que l'ouverture de la pupille, par laquelle la

lumière pénètre dans l'œil, reste constante; ce qui n'a pas toujours lieu, comme nous le verrons.

Arago a vérifié ces conséquences, sur la lumière diffusée par les corps éclairés. Deux feuilles d'un même papier, éclairées par le soleil, sont disposées parallèlement derrière un écran dont elles sont inégalement éloignées. Cet écran est percé d'une large fente, qui se projette en partie sur chacune des feuilles, et à travers laquelle on les regarde. On trouve qu'elles présentent exactement le même éclat, l'intensité de la lumière émanant de chaque point étant en raison inverse du carré de la distance, et le nombre des points qui peuvent envoyer de la lumière par la fente étant en raison directe du carré de cette distance, ce qui compense exactement.

2410. II. Intensité de la lumière reçue obliquement. — *L'intensité de la lumière reçue sur une même surface est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à cette surface.* Cette loi se démontre comme pour la chaleur rayonnante (II, 921), et elle est relative à la quantité de lumière reçue par la surface, et non à la quantité qu'elle peut réfléchir, celle-ci dépendant, comme nous le verrons, de l'inclinaison des rayons incidents.

2411. III. Intensité de la lumière émise obliquement. — *L'intensité de la lumière émanant d'une surface lumineuse par elle-même est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons avec la normale à la surface.* Pour constater ce résultat, on n'a qu'à regarder à travers une petite ouverture une surface incandescente, que l'on incline plus ou moins par rapport à la direction des rayons qui vont à l'œil; on ne remarque pas de changements dans l'éclat de la lumière reçue; d'où l'on conclut la loi, au moyen du raisonnement que l'on fait dans le cas de la chaleur rayonnante (II, 922). La pupille pouvant remplacer la petite ouverture, on voit que l'éclat d'une surface lumineuse ne dépend ni de sa forme ni de son inclinaison par rapport aux rayons qui vont à l'œil; l'impression reste la même que celle que produirait une surface plane de même éclat, qui serait la projection de la surface lumineuse sur un plan perpendiculaire à la direction moyenne des rayons qui entrent dans l'œil. C'est pourquoi un boulet rouge, vu de loin, ressemble à un disque. Il en est de même du soleil, quoique ses bords soient un peu moins brillants que les parties centrales; mais cela provient de la présence d'une épaisse atmosphère qui enveloppe l'astre (II, 1247).

2412. Formule d'illumination. — On peut réunir dans une seule formule, établie par Lambert, les trois lois précédentes: Soit S la projection sur un plan quelconque, d'une surface courbe lumineuse, et I l'intensité des rayons émis normalement à cette projection, intensité mesurée par l'éclat intrinsèque, qui n'est autre chose que l'illumination produite par l'unité de surface, à l'unité de distance. Considérons les rayons émis dans une direction formant un angle e avec la normale à la projection, et tombant sur un plan situé à une distance d , en faisant avec la normale à ce plan un angle égal à r . On aura, pour l'illumina-

tion E du plan, c'est-à-dire pour la quantité de lumière reçue sur l'unité de surface :

$$E = \frac{I \cdot S \cdot \cos e \cdot \cos r}{d^2}$$

Cette formule suppose que le milieu que traversent les rayons incidents n'exerce aucune absorption sur ces rayons.

2413. COMPARAISON DES INTENSITÉS DE DEUX SOURCES LUMINEUSES. —

Huyghens paraît être le premier qui se soit occupé de comparer les intensités de deux lumières; il cherchait le rapport entre l'éclat du soleil et celui de l'étoile Sirius, en regardant les deux astres à travers un petit trou pratiqué dans un écran, et comparant les distances à l'écran auxquelles il devait se placer pour leur trouver le même éclat. Maurolicus, en 1525, a fait aussi de semblables comparaisons. Le capucin François-Marie, en 1700, cherchait le nombre de lames de verre qu'il fallait placer devant chacune des deux lumières pour qu'elles parussent de même éclat, et il supposait la perte d'intensité proportionnelle au nombre des lames, ce qui est inexact. Lampedius interposait des lames de corne; d'autres, des feuilles de papier jusqu'à ce que les lumières disparaissent. Celsius cherchait à quelle distance il fallait se placer des deux lumières à comparer, pour cesser de distinguer des cercles ou autres signes tracés sur une feuille de papier, qu'il nommait *lucimètre*. Ce moyen a été longtemps le seul que l'on connût quand les deux lumières étaient de couleur différente. Euler a fait des comparaisons nombreuses entre les « degrés de lumière » du soleil et des autres corps célestes, mais en partant seulement de principes mathématiques, et s'appuyant sur quelques suppositions vraisemblables, mais non démontrées. Lambert et surtout Bouguer ont fait des recherches étendues sur la photométrie. Arago a laissé un grand travail sur le même sujet, dont nous parlerons après avoir traité des principes sur lesquels il s'est appuyé.



Fig. 1669.

2414. Photomètres. — On nomme *photomètres* les appareils destinés à comparer les intensités des sources lumineuses. La plupart sont fondés sur la loi des carrés des distances (2408); quelques-uns, dont nous ne pourrions parler que plus tard, s'appuient sur les propriétés de la lumière polarisée; nous allons nous occuper de ceux qui appartiennent à la première catégorie.

Photomètre de Bouguer. — Bouguer a imaginé plusieurs *photomètres*; dans tous, il part de ce fait que, si l'œil est incapable d'apprécier la différence entre les intensités de deux lumières, il saisit facilement la moindre différence dans le degré d'illumination de deux surfaces identiques, quand elles sont modérément éclairées et que les deux lumières sont de même couleur. Un de ces photomètres (fig. 1669) consiste en une feuille translucide, de papier ou de verre

dépoli, disposée verticalement et séparée en deux parties a, a' par une cloison opaque e perpendiculaire au plan aa' . Les deux lumières à comparer l, l' sont placées de manière que chacune d'elles, qui n'éclaire que la partie de la feuille qui se trouve de son côté, envoie ses rayons suivant la même obliquité que ceux de l'autre. L'œil étant placé en o sur le prolongement de l'écran e , l'on éloigne la lumière la plus intense, jusqu'à ce que les deux parties a, a' paraissent également éclairées.

Les intensités des deux lumières sont alors en raison directe des carrés des distances à la surface aa' . En effet, i et i' représentant les intensités des sources l, l' , c'est-à-dire les quantités de lumière envoyées sur l'unité de surface à l'unité de distance, et d, d' étant les distances au plan aa' , les quantités de lumière envoyées sur l'unité de surface de a et de a' , sont $i : d^2$ et $i' : d'^2$; et comme les deux surfaces sont également éclairées, on a $i : d^2 = i' : d'^2$. — Il faut avoir soin de placer les deux sources à des distances convenables pour que les surfaces a, a' ne soient ni trop faiblement ni trop fortement éclairées.

Photomètre de L. Foucault. — Dans le photomètre qui précède, l'ombre

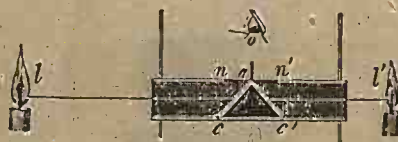


Fig. 1670.

verticale de la cloison nuit à l'appréciation de l'égalité d'éclat des moitiés a, a' . L. Foucault a fait disparaître cet inconvénient, en rendant la cloison mobile, de manière qu'on puisse l'écartier de la surface aa' jusqu'à ce que les deux parties éclairées se joignent sans se

superposer. Le photomètre de Foucault a la forme d'une petite caisse partagée en deux compartiments égaux, par la cloison verticale mobile et perpendiculaire à une face qui est munie d'une large ouverture fermée par une plaque de verre amidonnée.

Photomètre de Ritchie. — Dans un tuyau de carton noirci (fig. 1670) sont disposés deux miroirs identiques ac, ac' , inclinés à 45° . Les deux lumières à comparer l, l' envoient sur ces miroirs des rayons qui sont réfléchis, et tombent sur une feuille de papier huilé tendue sur une ouverture nn' . On éloigne la lumière la plus intense, jusqu'à ce que les deux parties an, an' soient également éclairées, pour l'œil placé dans la direction ao . On peut remplacer les miroirs par des feuilles de papier, et alors on supprime la feuille tendue en nn' .

Photomètre de Rumford. — Cet appareil, que l'on peut construire en quelques minutes, sert à appliquer une méthode imaginée par Lambert vers 1760. Il consiste en une feuille de papier verticale mn , MN (fig. 1671), derrière laquelle est fixé verticalement un petit cylindre a, A . Les deux lumières l, l', L, L' , étant placées à peu près sur la perpendiculaire à mn passant par l'axe du cylindre a , ce cylindre projette deux ombres o, o' sur l'écran. Chacune de ces ombres est éclairée par l'une des lumières seulement. Ainsi, l'ombre o' , formée par la lumière l' , est éclairée par des rayons tels que lo' émanant de l .

distance des diverses sources. Il supposait que l'effet différentiel produit était proportionnel à l'intensité lumineuse, ce qui ne peut être, la proportion de chaleur obscure mêlée aux radiations lumineuses n'étant pas la même pour les différentes sources. Par exemple, Arago a vu l'index du photomètre de Leslie marcher vers la bougie nue quand il l'exposait aux rayons solaires, marcher en sens inverse aux rayons d'une lampe d'Argant et rester stationnaire à ceux du feu d'une cheminée. Cependant, cet instrument peut donner d'assez bons résultats dans certains cas, par exemple pour comparer les intensités successives d'une même source, comme l'éclat variable de l'atmosphère.

2416. Photomètre de Wheatstone. — Ce petit instrument, destiné à comparer les lumières artificielles, est plus précis qu'on ne pourrait le croire au premier abord; il est surtout employé pour comparer les becs de gaz. Il consiste en une boîte cylindrique C, de 5^{cm} de diamètre (fig. 1672), traversée suivant son axe, par un arbre auquel on imprime un mouvement de rotation, au moyen d'une manivelle n, et de deux roues dentées intérieures. Cet arbre entraîne un



Fig. 1672.

bras a, à l'extrémité duquel tourne un pignon dont les dents s'engagent dans celles d'une couronne fixe portant quatre fois plus de dents que le pignon, qui fait alors quatre tours pendant que le bras a en fait un. On enfonce, dans des aiguilles que porte le pignon, un disque de liège d sur lequel est collée une petite ampoule sphérique

en verre étamé en dedans, m, vue en M avec sa grandeur réelle. La lumière produit, par réflexion sur l'ampoule, un point brillant qui décrit une circonférence, si ce point est exactement sur l'axe du pignon, et l'on voit un trait circulaire brillant et continu quand la vitesse de rotation est suffisante. Si le point brillant n'est pas sur l'axe du pignon, il décrit une courbe à quatre parties égales, dont la forme dépend de sa distance à l'axe, et si cette distance est assez grande, la courbe présente quatre nœuds, comme on le voit en A.

Cela posé, si l'on fait tomber sur l'appareil les rayons des deux sources que l'on veut comparer, chacune d'elles produit sur l'ampoule un point brillant particulier, et l'on voit deux courbes entrelacées. On éloigne l'une des sources, jusqu'à ce que les deux courbes présentent le même éclat; ce qui se reconnaît facilement, et l'on prend le rapport des carrés des distances. La différence d'épaisseur des deux courbes lumineuses pourrait induire en erreur, mais le rayon de l'ampoule est tellement petit, que cette différence est insensible.

2417. Photomètres chromatiques. — Les photomètres que nous venons de décrire ne s'appliquent qu'à la comparaison de lumières ayant même couleur. Pour celles qui sont de nuance différente, Herschell cherchait à quelle distance *maximum* il pouvait lire une page imprimée quand elle était éclairée successi-

vement par les deux lumières à comparer. Fraunhofer procédait en comparant la lumière colorée à celle d'une lampe constante, de la manière suivante : La lumière colorée était reçue dans une lunette astronomique, dont l'oculaire o (fig. 1673) porte un tube latéral équilibré par un contre-poids mobile P, P' . La lampe L, L' peut être déplacée le long du tube, dans une coulisse, au moyen d'une vis micrométrique v, v' . En n est un petit miroir incliné à 45° sur l'axe de la lunette, et dont le bord vertical intérieur rencontre cet axe. Les rayons colorés arrivent à l'œil placé en o , suivant la direction SO , en même temps que les rayons de la lampe, réfléchis en n . On déplace la lampe jusqu'à ce que ses rayons et ceux qui arrivent suivant SO soient de même intensité, et l'on admet qu'il en est ainsi quand le bord vertical du miroir ne se distingue plus, malgré la différence de couleur des rayons directs et réfléchis. Les intensités des rayons colorés éprouvés ainsi successivement sont entre eux comme les carrés des distances de la lampe au miroir n .

2418. Photomètre électrique de Masson. — Ce photomètre chromatique se compose d'un disque sur lequel sont tracés des secteurs égaux noir et blanc, et qu'un mouvement d'horlogerie fait tourner avec une vitesse constante de 200 à 250 tours par seconde. Ce disque, éclairé par une lumière permanente, présente une teinte grise uniforme, à cause de la durée de l'impression dans l'œil. Si alors on l'illumine par une

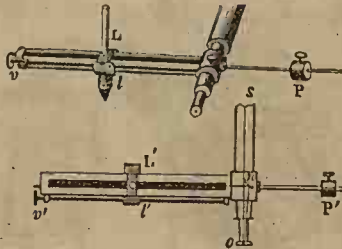


Fig. 1673.

lumière instantanée, par exemple par une étincelle électrique, on distingue subitement les secteurs, comme s'ils étaient en repos, parce qu'ils n'ont pas le temps de se déplacer pendant la durée de ce surcroît d'illumination. Si l'on augmente graduellement l'effet de la lumière permanente, en l'approchant peu à peu, il arrive un moment où le disque conserve sa teinte grise uniforme pendant les étincelles, le surcroît d'illumination étant relativement trop faible pour produire un effet sensible. La limite d'intensité de la lumière constante, pour laquelle il en est ainsi, varie avec la sensibilité de l'œil ; mais elle est toujours la même pour un même œil dans un même état. De sorte que si l'on cherche à quelle distance *maximum* du disque tournant deux sources doivent être rapprochées pour qu'on cesse de distinguer les secteurs pendant l'étincelle, le rapport des carrés de ces distances représentera celui de leurs intensités. L'expérience montre que ces distances s'établissent nettement, car les secteurs disparaissent presque subitement quand on approche lentement les sources, dont la couleur n'a pas d'influence sur cette sorte d'appréciation.

Expériences de photométrie électrique. — Masson a appliqué cette méthode photométrique à l'étude de la lumière électrique, en laissant fixe la source constante et faisant varier la distance de l'étincelle au disque tournant.

La figure 1674 représente l'ensemble de l'appareil employé¹. En *d* est le disque tournant, faisant un angle de 45° avec les directions des rayons des deux lumières, et qu'on regarde à travers un tube *t* noirci en dedans. La lumière constante est renfermée dans une boîte à ouverture, *L*, pouvant se placer à différentes distances du disque. L'étincelle est produite en *e*, entre deux boules isolées dont une peut se rapprocher de l'autre, au moyen d'une vis micrométrique. La tablette *c*, qui porte ces boules, glisse sur deux règles horizontales, le long d'une division servant à mesurer les distances au disque *d*. L'étincelle est fournie par un condensateur se déchargeant de lui-même dès que la charge est suffisante, et placé, avec la machine électrique, dans une chambre voisine. L'électricité positive arrive par une rigole isolée pleine de mercure, *mm*, qui reçoit une languette métallique *o*, en relation avec une des boules. L'électricité

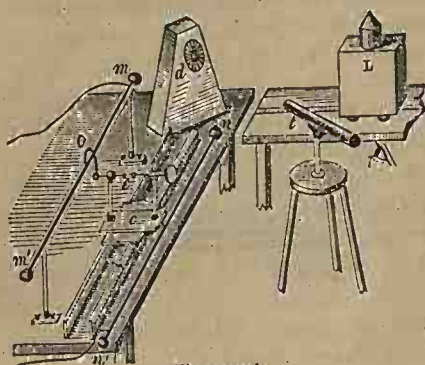


Fig. 1674.

négative arrive à l'autre boule par la rigole *m*. Les fils rhéophores aboutissant l'un en *m*, l'autre en *n'*, le circuit conserve la même longueur, quelle que soit la position de la tablette *c*.

Après avoir vérifié que l'intensité de la lumière de l'étincelle varie en raison inverse du carré des distances aux surfaces éclairées, Masson a constaté que cette intensité est : 1° proportionnelle aux surfaces des condensateurs ; 2° en raison inverse de leur épais-

seur ; 3° proportionnelle aux carrés des distances d'explosion ; 4° les quantités de lumière sont proportionnelles aux quantités de chaleur développées dans un fil fin faisant partie du circuit. Les quantités de chaleur se mesuraient au moyen du thermomètre électrique de Riess (III, 1708). Les trois premières lois sont représentées par la formule $i = K S d^2 : a D^2$, dans laquelle *i* est l'intensité de la lumière de l'étincelle, *S* et *a* la surface armée et l'épaisseur du condensateur, *d* la distance d'explosion, et *D* la distance du disque tournant. En vertu de la quatrième loi, la formule $t = n E^2 : S$, qui représente l'échauffement *t* d'un fil traversé par la décharge, en fonction de la quantité *E* d'électricité accumulée dans un condensateur de surface *S* (III, 1709), peut aussi servir à représenter l'intensité de la lumière, quand la distance reste constante.

2419. Faits généraux de photométrie. — 1° Bouguer a reconnu que l'égalité que l'on cherche à établir dans l'emploi de la plupart des photomètres, est d'autant plus difficile à obtenir avec précision, que l'intensité lumineuse des surfaces comparées est plus faible. La différence appréciable est proportionnelle

¹ Ann. de ch. et de phys., 3^e série, t. XIV, p. 129 ; t. XXX, p. 5, et t. XXXI, p. 295.

à cette intensité, résultat confirmé par Arago, Masson, Steinheil, et étudié avec détail par M. Fechner. — Il faut, du reste, opérer rapidement, l'œil se fatiguant assez promptement pour qu'on puisse changer notablement les distances sans qu'il s'en aperçoive, si ce n'est après un peu de repos. L'approximation est, en général, de $\frac{1}{60}$.

2^o Bouguer a reconnu, par la méthode de Rumford, que l'une des ombres formées par des lumières égales disparaît quand une de ces lumières est 8 fois plus éloignée que l'autre, c'est-à-dire quand la plus rapprochée éclaire l'écran 64 fois plus que celle qui produit l'ombre qui disparaît. Le résultat reste le même, quelles que soient les intensités absolues des deux sources. Arago a reconnu que l'ombre, alors insensible, devient distincte quand on la fait mouvoir en déplaçant latéralement la lumière qui la produit, On a cherché à déduire de là un procédé photométrique, en concentrant une lumière prise pour terme de comparaison, en un foyer sur une plage éclairée par la source dont on veut évaluer l'intensité, et dont on fait varier la distance jusqu'à ce que le foyer disparaisse. Mais ce moyen est peu précis, et les résultats diffèrent notablement quand on opère en approchant la source ou en l'éloignant peu à peu. Il suffit même de savoir où est le foyer pour l'apercevoir tout à coup, quand on ne pouvait le distinguer d'abord. Quoi qu'il en soit, il résulte de l'expérience de Bouguer, qu'une lumière en fait disparaître une autre 64 fois plus faible; ce qui explique pourquoi les étoiles et les planètes ne sont pas visibles pendant le jour, l'atmosphère nous envoyant de la lumière au moins 64 fois plus forte que celle qui nous vient de ces astres. C'est par une raison semblable que, le soir, on ne distingue pas les objets extérieurs, d'une chambre très-éclairée; et que le jour on ne distingue rien, du dehors, dans une chambre sombre.

3^o Les flammes sont très-transparentes. Ainsi, l'effet produit par une série de bougies juxtaposées est sensiblement le même quand la série est parallèle ou perpendiculaire aux rayons reçus. Un bec de gaz à flamme aplatie, dit *bec papillon* ou *chauve-souris*, éclaire de la même manière dans toutes les directions. — M. Hirn a fait de nombreuses expériences sur ce sujet¹. Il plaçait les unes derrière les autres 8 lampes à pétrole à mèches plates parallèles entre elles et renfermées dans une longue caisse de cuivre fermée à ses extrémités par des glaces. Les flammes, aussi égales que possible, avaient chacune une cheminée placée sur la caisse, et le système pouvait pivoter autour d'un axe vertical passant par son milieu. On comparait l'effet produit par cet ensemble à celui d'une lampe type mobile, par la méthode des ombres. La flamme la plus rapprochée étant à une distance fixe de 1^m de l'écran, les 8 flammes, ramenées par le calcul à une distance commune de 1^m, valaient 8,1633 fois la flamme type. Si l'on supprimait les rayons des 4 dernières lampes au moyen d'un diaphragme, l'effet n'était plus que 5,4083, et les becs supprimés, ramenés à la même distance de 1^m, eussent donné le nombre 3,2473, qui, ajouté au précédent,

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. XXX, p. 319.

forme un total de 8,6556; tandis que les 8 becs rayonnant ensemble n'avaient donné que 8,1633. La proportion des rayons des 4 derniers becs, interceptée par les 4 premiers était donc de 0,05688, ou 5,7 pour 100 de la lumière totale.

Les 4 premières flammes ayant été abaissées sous les petits dômes fendus destinés à rendre complète la combustion des lampes à pétrole, les colonnes gazeuses invisibles de ces 4 becs interceptèrent 0,0635 de la lumière des 4 derniers. Ce n'est donc pas la flamme qui intercepte les rayons, mais le gaz chaud, et cela en déviant les rayons irrégulièrement, comme le montre l'ombre que donnent les flammes au soleil ou en présence de la lumière électrique; cette ombre, comme l'a remarqué M. Offret, n'est qu'un assemblage de stries, dans lesquelles la lumière est inégalement distribuée, les unes étant plus brillantes aux dépens de la lumière qui a quitté les autres.

On peut donc dire que la flamme laisse passer les rayons lumineux sans les intercepter sensiblement. Il faut donc que les parcelles solides en suspension qui lui donnent son éclat soient transparentes; ce qui est d'accord avec ce fait que la lumière rayonnée par les solides incandescents vient d'une certaine profondeur au-dessous de leur surface, comme le prouvent certains phénomènes de polarisation que nous étudierons plus tard.

2420. Résultats de mesures photométriques. — On a reconnu que deux becs de gaz ordinaires équivalent à trois lampes d'Argent brûlant 12^{es} d'huile par heure. D'après Brande, un bec de gaz remplace 10 bougies, ou 12 chandelles de 82^{es}, quand ce bec dépense 42,6 de gaz oléfiant pur, ou 79^l,87 de gaz extrait de l'huile, ou enfin 214^l,98 de gaz de houille. On a pu aussi comparer les qualités éclairantes des gaz provenant de différentes variétés de houille, étudier les formes les plus favorables des becs et des cheminées de verre. On a reconnu, par exemple, que les cheminées dont la grosseur diminue par une courbure graduée au-dessus de la flamme, donnent plus de lumière, pour la même dépense, que celles dont le diamètre change brusquement; qu'un bec de gaz donne le plus de lumière, à dépense égale, quand, le gaz sortant par une couronne de trous au milieu de laquelle passe l'air, le canal intérieur de l'air et la cheminée sont plus étroits, et les trous plus nombreux.

Franklin a remarqué que l'intensité lumineuse des flammes de deux bougies qui se touchent, est plus grande que la somme de leurs intensités observées séparément, et il attribuait ce résultat à l'élévation plus grande de la température. Rumford, partant de ce fait, a expérimenté sur des mèches plates imbibées d'huile, et a reconnu que ces mèches, réunies presque au contact, donnent beaucoup plus de lumière, pour une même dépense d'huile, que lorsqu'elles sont séparées. Arago et Fresnel ont imaginé, pour les phares, des lampes à plusieurs mèches concentriques dont les intervalles sont parcourus par de l'air appelé dans une cheminée commune. La flamme étant transparente, on a ainsi beaucoup de lumière dans un petit espace, et cette flamme comparée à celle d'une lampe Carcel, a donné une lumière proportionnelle au poids d'huile dépensé. Cependant, M. Allard a trouvé que l'éclat d'un bec de phare à 5 mèches

représente 3 fois seulement celui d'une des mèches brûlant seule; ce qui peut tenir à l'arrivée insuffisante de l'air autour des 5 mèches brûlant ensemble.

Une même bougie peut donner une lumière variant de 100 à 60, suivant l'état de la mèche. Suivant Rumford, si l'on représente par 100 l'intensité d'une chandelle fraîchement mouchée, cette intensité n'est plus que 39, après 11 minutes; 23, après 19^m; et 16, après 29^m. Ces différences énormes tiennent à ce que la colonne opaque formée par la mèche intercepte une partie des rayons, et empêche l'air de se mêler au gaz; ce qui fait qu'une partie du charbon précipité n'est pas brûlée et forme de la fumée, et qu'une portion du suif se perd en vapeur non décomposée.

2421. Équivalents d'éclairage. — On nomme ainsi les poids de substances diverses qu'il faut brûler pendant le même temps pour obtenir la même intensité de lumière, ou les volumes quand il s'agit de gaz. Ces quantités dépendent, pour une même substance, de la manière dont la combustion se fait et de diverses autres circonstances.

D'après Rumford, 100 représentant le poids de cire qu'il faut brûler en un certain temps sous forme de bougie, pour obtenir une certaine quantité de lumière, il faut, en temps égal, brûler 101 de suif, quand la chandelle est toujours bien mouchée, et 229, quand la mèche est longue; 110 d'huile d'olive, dans une lampe d'Argent, et 129 dans une lampe ordinaire brûlant sans fumée; 125 d'huile de navette, et 120 d'huile de lin dans une lampe ordinaire.

110 litres de gaz de houille équivalent à 30 litres de gaz extrait de l'huile, et donnent la même quantité de lumière que 42^{sr} d'huile brûlée dans une lampe Carcel. La lampe d'Argent, dont la mèche n'est pas rafraîchie par un courant d'huile, comme celle de la lampe Carcel, donne une lumière moins vive.

Pelet ayant calculé la dépense par heure, pour une même quantité de lumière, correspondante à différents systèmes d'éclairage, a formé le tableau suivant, en supposant le prix du bec de gaz à 5 centimes par heure :

Lampe Carcel, chandelle de 82^{sr}, chandelle de 16^{sr}, bougie de cire de 100^{sr}, bougie de stéarine.

5,8

9,8

12,0

48,6

18

On voit que l'éclairage par le gaz est le plus économique. Les résultats dépendent, du reste, de la manière dont se fait la combustion, de la facilité avec laquelle l'air pénètre dans la flamme, de la forme des mèches et des becs; de la longueur de la flamme. Par exemple, un simple jet de gaz dont la flamme a 54^{mm} de longueur, et qui donne une quantité de lumière représentée par 100, donne 150 quand la flamme a de 110 à 135^{mm} de long; l'orifice étant plus étroit, de manière que la dépense de gaz reste la même. Avec un bec formé de trous rangés circulairement, l'intensité lumineuse est représentée par 1, quand la flamme n'a que 13^{mm} de longueur; et par 7, quand elle a de 110 à 135. Pour expliquer ces résultats, on remarque que dans une flamme plus longue, la poussière de charbon reste plus longtemps incandescente avant de brûler.

Pour contrôler la qualité du gaz employé à l'éclairage public, on en mesure l'équivalent, comparé à 10^{sr} d'huile de colza brûlés dans une lampe Carcel consommant 42^{sr} par heure. Le bec de gaz, en couronne, et la lampe sont placés à la même distance d'un photomètre de Foucault. La lampe est posée sur le plateau d'une balance, avec une surcharge de 10^{sr} de son côté, de manière qu'elle est soulevée quand 10^{sr} d'huile ont été brûlés, ce qui est indiqué par un coup de marteau que le mouvement de la balance fait frapper sur un timbre. La flamme du gaz est réglée par un robinet, de manière que son éclat soit le même que celui de la lampe, et un compteur fait connaître le volume de gaz qui s'écoule pendant le temps que la lampe emploie à brûler 10^{sr} d'huile.

2422. Intensités lumineuses des astres. — Pour comparer l'éclat du soleil à celui d'une bougie, Bouguer commençait par affaiblir l'éclat de l'astre dans une proportion connue, en faisant passer ses rayons à travers une lentille bi-concave qui les rendait divergents. Le rapport entre l'intensité en chaque point, de la lumière arrivant sur la lentille, et de celle qui était reçue sur un écran placé du côté opposé, était en raison inverse des sections du faisceau incident et du faisceau divergent à l'endroit où était placé l'écran. Ayant ainsi rendu la lumière du soleil 11664 fois plus faible, Bouguer la trouva équivalente à celle d'une bougie placée à 43^{cm} de l'écran, quand le soleil était à 31° au-dessus de l'horizon. La lune, à la même hauteur de 31°, ayant été comparée à la même bougie, il fut facile de calculer le rapport entre les intensités des rayons du soleil et de la lune à la surface de la terre. La moyenne d'un grand nombre d'observations a donné le nombre 300 000. Comme le soleil est environ 400 fois plus éloigné de la terre que la lune, s'il se trouvait à la même distance, son éclat serait 160 000 fois plus grand, et par conséquent égal à $300\ 000 \times 160\ 000$, ou 48 billions de fois celui de la lune.

Ayant comparé les rayons émanant des différents points de la surface du soleil, Bouguer avait pu reconnaître que l'éclat est sensiblement plus faible près des bords que dans les parties centrales. Ce résultat, nié par Lambert, a été confirmé par des expériences récentes, comme nous l'avons dit en parlant de la chaleur envoyée par les différents points de la surface du soleil (II, 1255).

Étoiles. — On a fait beaucoup d'expériences pour comparer l'éclat des étoiles et chercher ce que représente leur classification en différentes *grandeurs*. Les *photomètres stellaires* ou *astromètres*, imaginés pour cet objet, sont de diverses sortes. Bouguer employait deux lunettes astronomiques identiques, les dirigeait vers deux étoiles voisines, et diminuait, au moyen de diaphragmes, l'ouverture d'une des lunettes jusqu'à ce que les deux étoiles parussent égales. W. Herschell se servait de télescopes à miroirs. — Talbot, puis Babinet et le P. Secchi, faisaient tourner rapidement devant l'étoile la plus brillante, un disque portant des secteurs alternativement pleins et évidés, et modifiaient le rapport des secteurs jusqu'à ce que cette étoile parût égale à celle qu'on lui comparait. Certains phénomènes de *diffraction*, d'autant plus prononcés que les ouvertures du disque sont plus étroites, modifient sensiblement les résultats. — Nous décri-

rons plus tard des photomètres plus précis qui sont fondés sur la *polarisation*.

Pour étudier l'éclat des *nébuleuses*, des *aurores boréales*, de la *lumière zodiacale*, du *fond du ciel*, M. Pickering dispose dans l'oculaire d'une lunette astronomique, une lame de verre portant une petite tache de collodion. Cette tache est éclairée en dessous par une lumière latérale réfléchie par un miroir incliné à 45° , et qu'on éloigne peu à peu jusqu'à ce que la tache disparaisse.

2423. LOI D'ABSORPTION PAR LES MILIEUX. — Nous allons encore examiner, comme application de la photométrie, la question de l'absorption des rayons lumineux à travers les milieux diaphanes. — On a cru pendant longtemps que la quantité de lumière absorbée était proportionnelle à l'épaisseur du milieu traversé; mais Bouguer a reconnu que la loi est plus compliquée. Divisons le milieu transparent en tranches infiniment minces perpendiculaires à la direction du rayon considéré, et représentons par I l'intensité de ce rayon à son entrée dans la première tranche. Soit a la fraction, supposée constante, qui représente le rapport entre la quantité de lumière qui arrive à une tranche et celle qui la traverse sans être absorbée; a dépend de la nature du milieu. La quantité de lumière arrivant à la première tranche étant I , celle qui parviendra à la deuxième sera Ia ; la quantité qui se présentera à la troisième sera $Ia \times a = Ia^2$, et cette tranche transmettra à la suivante la quantité Ia^3 , et ainsi de suite. Si donc e représente l'épaisseur de n tranches, l'équation $i = Ia^e$, qui est celle d'une *logarithmique*, donnera l'intensité du rayon après qu'il aura traversé cette épaisseur. Les intensités successives du rayon forment donc une progression géométrique décroissante quand les épaisseurs forment une progression arithmétique croissante. Les quantités absorbées par les tranches successives suivent une loi semblable; car elles sont, pour la première tranche, $I - Ia = I(1 - a)$; pour la deuxième, $Ia - Ia^2 = Ia(1 - a)$; pour la troisième, $Ia^2(1 - a)$...; et $Ia^{n-1}(1 - a)$, pour la n^e .

Nous avons supposé que la proportion de lumière absorbée par une tranche est indépendante de l'intensité du rayon qui se présente pour la traverser. Cette supposition peut être regardée comme démontrée *à posteriori*, car les résultats calculés en l'adoptant se trouvent d'accord avec les faits. On peut, du reste, ne rien laisser à désirer dans la démonstration, en suivant la marche que nous avons employée dans le cas de la chaleur (II, 880), et tenir compte aussi, comme nous l'avons fait alors, de la réflexion aux surfaces.

Mesure expérimentale de l'absorption. — Bouguer a fait beaucoup d'expériences pour évaluer les quantités de lumière absorbées par les milieux¹. Voici une des méthodes qu'il a employées. Deux écrans blancs identiques e, e' (fig. 1675) sont éclairés par une même bougie l , et envoient les rayons réfléchis, par deux ouvertures égales e, e' , dans l'œil placé entre elles. Les rayons venant de l'écran e traversent le corps transparent c , terminé par des faces parallèles. On éloigne l'écran e' jusqu'à ce que les deux surfaces e, e' paraissent de même

¹ *Traité d'optique sur la graduation de la lumière.*

éclat. Il est évident que, si alors les intensités lumineuses des écrans e , e' , à l'unité de distance, sont i et i' , le corps aura réduit l'éclat de la lumière qui le traverse dans le rapport de i à i' , l'interposition de ce corps amenant les rayons de e à ne produire que l'effet des rayons de e' , qui n'ont que l'intensité i' . Quant au rapport de i à i' , il est donné par celui des carrés des distances le , le' .

Voici quelques résultats publiés par Bouguer : l'interposition de 16 lames de verre à vitre de 21^{mm} , 43 d'épaisseur rend la lumière 240 fois plus faible. — 6 lames de verre à glace, formant une épaisseur totale de 26^{mm} , l'affaiblissent dans le rapport de 10 à 3. — Quand la lumière traverse une masse unique dont l'épaisseur est égale à la somme des épaisseurs des lames, la perte est plus faible, de toute celle qui a lieu par réflexion aux surfaces des lames séparées.

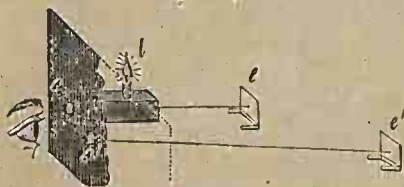


Fig. 1675.

— 3^{m} , 11 d'eau de mer affaiblissent la lumière dans le rapport de 14 à 5, ou à peu près de 3 à 1.

2424. Absorption par l'air.

— L'air atmosphérique absorbe une faible partie de la lumière qui le traverse; Bouguer s'est proposé de l'évaluer. Il a d'abord mesuré, par les procédés ci-dessus (2422), l'intensité de la lumière du soleil au

solstice d'hiver quand il est élevé de 19° , $16'$ à midi, et au solstice d'été quand sa hauteur est de 66° , $11'$. Il trouva, dans le premier cas, une intensité égale à environ les $\frac{2}{3}$ de ce qu'elle était dans le premier. Il calcula ensuite que, l'atmosphère étant supposée homogène et ramenée tout entière à la densité des couches inférieures, les rayons solaires auraient eu à traverser, au solstice d'hiver, une couche d'air de 5872 mètres environ, et, au solstice d'été, une couche de 2137^m seulement. La différence d'intensité serait donc due à une couche d'air de 3735^m d'épaisseur. En partant de là, et s'appuyant sur la loi d'absorption, Bouguer trouve qu'à la surface de la terre une lumière est affaiblie de $\frac{1}{3}$ quand ses rayons traversent une couche d'air de 3 lieues et un quart. — Ayant ensuite comparé les intensités des rayons du soleil à différentes hauteurs au-dessus de l'horizon, Bouguer a trouvé les résultats suivants, en représentant par 1000 la lumière qui nous parviendrait en l'absence de l'atmosphère :

HAUTEUR	INTENSITÉ	HAUTEUR	INTENSITÉ	HAUTEUR	INTENSITÉ
0°	6	5°	4201	30°	6613
1	7	10	3149	40	7237
2	192	15	4535	50	7624
3	454	20	5174	70	8016
4	802	25	6136	90	8123

On voit combien est faible l'intensité près de l'horizon ; ce qui fait qu'on peut regarder impunément le soleil à son coucher. Indépendamment de l'incertitude des méthodes, les résultats qui précèdent doivent être regardés comme des à peu près, particulièrement ceux qui correspondent aux faibles hauteurs, la pureté de l'air n'étant pas toujours la même, surtout près de la surface de la terre, où il est le plus souvent souillé par des brouillards ou diverses impuretés en quantité très-variable.

CHAPITRE II

CATOPTRIQUE

Le mouvement rapide qui l'anime (le fluide lumineux) s'effectue en ligne droite ; mais si un corps à surface bien polie résiste à son passage, il tombe et se relève en faisant des angles égaux. PLATON.

§ 1. — LOIS DE LA RÉFLEXION. — POUVOIRS RÉFLECTEURS

I. Lois de la réflexion.

2425. Réflexion de la lumière. — Quand un rayon lumineux rencontre la surface de séparation de deux milieux, une partie plus ou moins considérable de la lumière de ce rayon, au lieu de passer outre, revient du même côté du plan tangent à la surface. Ce phénomène porte le nom de *réflexion*, et la partie de l'optique dans laquelle on l'étudie se nomme *catoptrique*. Euclid² paraît être le premier qui ait écrit sur cette science.

La portion de lumière qui n'est pas réfléchi se partage en deux : une partie pénètre dans le second milieu en conservant sa forme de rayon, s'il est transparent, l'autre est éteinte ou absorbée. C'est à cause de la destruction partielle de la lumière incidente que les rayons lancés dans un espace fermé sont aussitôt anéantis ; une partie est détruite à chacune des réflexions qu'ils subissent en allant d'une paroi à l'autre, et ces réflexions sont extrêmement nombreuses dans un temps insensible, à cause de la grande vitesse de la lumière.

Le *point d'incidence*, le *rayon incident* et le *rayon réfléchi*, l'*angle d'incidence* et l'*angle de réflexion* se définissent de la même manière que pour la réflexion de la chaleur (II, 854).

2426. Lois de la réflexion. — Ces lois sont les mêmes que pour la

chaleur rayonnante : 1^o les rayons incident et réfléchi et la normale sont dans un même plan ; en d'autres termes, le rayon réfléchi reste dans le plan de l'angle d'incidence ; 2^o l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Ces lois, connues des platoniciens, se prouvent par l'expérience, de la manière suivante :

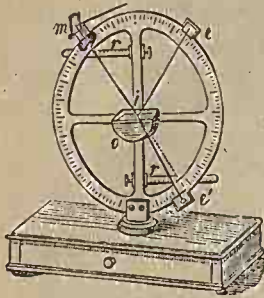


Fig. 1676.

on prend un cercle divisé en degrés (fig. 1676), au centre duquel est placé un miroir plan perpendiculaire au plan du cercle. Ce cercle porte deux curseurs *m* et *e* ; le premier est muni d'une plaque percée d'un petit trou, et le second, *e*, soutient un disque de papier dont le centre est marqué. Les rayons du soleil, ou d'une source artificielle, sont réfléchis par un miroir *m*, de manière que le mince pinceau qui passe par l'ouverture de la plaque tombe au centre *i* du cercle ; là, elle se réfléchit, et l'on place le curseur *e* de manière que le faisceau réfléchi passe par le centre du disque. On trouve toujours une position pour laquelle cela a lieu ; ce qui prouve que le rayon réfléchi est dirigé, comme le rayon incident, dans un plan parallèle au plan du cercle. De plus, l'arc compris entre les deux curseurs est partagé en deux parties égales par la normale au miroir en *i*, ce qui démontre la première loi. — Dans cet appareil, on remplace souvent la plaque *m* et l'écran *e* par des tubes à canal étroit et noirci, dirigés vers le centre, et à travers lesquels on fait passer les rayons incident et réfléchi.

Ce moyen n'est pas très-précis. Pour avoir une démonstration expérimentale plus satisfaisante, on emploie un théodolite (I, 19) ou simplement un cercle vertical gradué (fig. 1677), muni d'une lunette à réticule *Ll*. Près de cet appareil, est disposé un miroir horizontal, *i*, formé le plus souvent par du mercure. On vise d'abord avec la lunette, dans la direction *ca'*, une mire très-éloignée, par exemple une étoile assez voisine du pôle pour qu'elle ne se déplace pas sensiblement pendant la durée de l'expérience. Tournant ensuite la lunette dans la direction *Ll*, on vise l'image de la même mire vue par réflexion dans le miroir, et on l'amène au point de croisement des fils du réticule ; et, comme cela est toujours possible, la première loi se trouve démontrée. — De plus, on remarque que les arcs *cl'* et *el*, situés de part et d'autre de l'horizontale *en*, sont égaux ; d'où l'on conclut la seconde loi. En effet, les rayons *ai* et *a'c*, partant d'un point extrêmement éloigné, doivent être considérés comme parallèles ; les angles *a'en* et *aib* sont donc égaux entre eux, ainsi que les angles *nei*, *cib'*. Les angles *a'en* et *nei* étant égaux, il en est donc de même

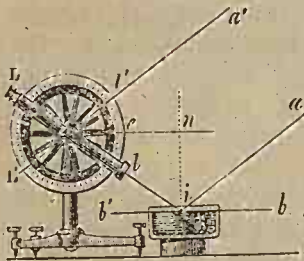


FIG. 1677.

les angles *a'en* et *nei* étant égaux, il en est donc de même

des angles aib et cib' , et par conséquent de leurs compléments nia et cin . — La mesure des angles $a'cn$ et nci pouvant se faire ici avec une très-grande précision, la démonstration est aussi satisfaisante que peut l'être une démonstration expérimentale.

Si la mire n'était pas à l'infini, on verrait facilement que l'angle $a'cn$ serait égal à nci diminué de l'angle que font entre eux les rayons ca' et ca . Il faudrait, pour le vérifier, marquer la position du point d'incidence i .

On peut montrer aux yeux la direction des rayons réfléchis, en faisant entrer dans une chambre noire un pinceau de rayons solaires que l'on reçoit sur un miroir plan, et dont on peut suivre la marche, ainsi que celle du faisceau réfléchi, au moyen de l'illumination des poussières en suspension dans l'air. On peut aussi constater par ce moyen que, si le faisceau incident est normal au miroir, il en est de même du faisceau réfléchi, qui se confond alors avec le premier.

2127. Construction du rayon réfléchi. — Soit am (fig. 1678) le rayon incident donné. Menons le plan mp tangent à la surface réfléchissante au point d'incidence m ; d'un point quelconque a pris sur le rayon incident, abaissons la perpendiculaire ap sur ce plan, et prolongeons-la d'une quantité pa' égale à elle-même. Nous obtenons ainsi un point a' symétrique du point a . Joignons a' au point d'incidence m , et prolongeons $a'm$, la droite mr située dans le plan amn sera le rayon réfléchi. En effet, les obliques ma et ma' s'écartant également du pied de la perpendiculaire mp au milieu de aa' , on a $amp = a'mp = rmc$, et par conséquent $amn = rmn$; mr est donc bien le rayon réfléchi.

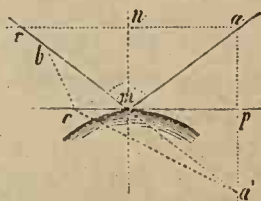


Fig. 1678.

On peut encore construire le rayon réfléchi, en abaissant du point a une perpendiculaire sur la normale nm , la prolongeant d'une quantité nr égale à elle-même, et joignant rm .

Remarque. — Le chemin parcouru par la lumière pour venir d'un point a à un point b (fig. 1678) après s'être réfléchi sur une surface plane cp , est un minimum; car, si la lumière suivait toute autre route, par exemple en allant de a en c , puis de c en b , on aurait $am + mb = a'b < a'c + cb$. On s'était autrefois appuyé sur ce résultat pour démontrer par raisonnement les lois de la réflexion, en partant du principe de la moindre action, ou loi d'économie de la nature, qui consistait à admettre que la nature atteignait toujours son but par le moyen le plus simple. Telle était la marche que suivaient les anciens, notamment Héron d'Alexandrie, et aussi, d'après Vitellion, l'astronome Ptolémée.

2128. RÉFLEXION DIFFUSE. — La lumière réfléchiée par une surface polie est dite réfléchiée spéculairement. Quand la surface n'est pas polie, elle réfléchit encore la lumière, mais les rayons sont renvoyés dans toutes sortes de directions. La lumière ainsi réfléchiée est dite lumière diffuse ou réfléchiée irrégulièrement. Cependant, elle suit les lois ordinaires de la réflexion, et ce sont les innom-

brables aspérités qui recouvrent les surfaces non polies, qui font que les rayons réfléchis s'élancent dans une infinité de directions différentes. Soit, en effet, une surface non polie; s, s', s'', s''' (fig. 1679) des rayons parallèles tombant sur la surface d'une aspérité ac ; et n, n', n'', n''' des normales aux points d'incidence. Les rayons incidents donneront les rayons réfléchis divergents r, r', r'', r''' . Ces rayons prolongés se rencontrent à très-peu près en un même point situé à une distance insensible au-dessous de la surface éclairée, de sorte que l'œil recevant une partie de ces rayons verra le point de concours comme s'il était lumineux par lui-même. Ce raisonnement pouvant s'appliquer à tous les points d'une surface dépolie, on voit que cette surface, frappée par la lumière, se comporte comme une surface lumineuse.

Si tous les corps étaient parfaitement polis, nous ne verrions que ceux qui sont lumineux par eux-mêmes, ainsi que leur image reproduite par réflexion sur la surface des autres. C'est ainsi que nous ne voyons pas une glace bien polie, et que nous n'en connaissons la présence que par le cadre qui la limite et par les images qu'y forment les objets environnants. Si quelquefois on peut en distinguer la surface, c'est qu'elle n'est pas nette, et renvoie un peu de lumière diffuse.

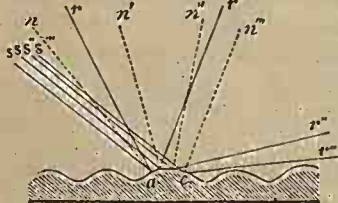


Fig. 1679.

Une foule de surfaces dépolies peuvent donner à la lumière qu'elles réfléchissent d'une manière diffuse une couleur différente de celle des rayons incidents.

C'est de cette propriété, que nous étudierons à part (ch. iv), que viennent les couleurs des corps.

On peut mettre en évidence la lumière réfléchie avec diffusion en faisant tomber, dans une chambre obscure, les rayons solaires sur une surface non polie; on voit aussitôt la chambre illuminée par de la lumière diffuse présentant la couleur qui appartient à cette surface. Les corps parfaitement polis ne modifient pas ainsi la couleur de la lumière réfléchie spéculairement, qui reste toujours de la même couleur que les rayons incidents, comme on peut le vérifier avec des verres colorés bien polis. Si les rayons solaires réfléchis par une lame d'or, de lait ou de cuivre polis sont colorés, c'est que le poli des métaux n'est jamais parfait, et qu'il se produit à leur surface, comme nous le verrons, des phénomènes tout particuliers.

C'est par la lumière réfléchie avec diffusion qu'une chambre est éclairée dans les parties non opposées aux fenêtres, et que l'obscurité n'est pas complète dans l'ombre portée et dans celle qui se trouve sur les corps. On nomme *reflet* cette illumination secondaire des corps due aux rayons diffus renvoyés par les objets environnants. Les peintres en tirent parti, ainsi que des ombres et des pénombres, pour imiter les reliefs.

La lumière diffuse réfléchiée par les corps dépolis est le plus souvent mêlée d'un peu de lumière réfléchiée spéculairement. La proportion de cette dernière est d'autant plus grande que les rayons incidents sont plus rapprochés de la surface réfléchissante. Par exemple, si l'on dispose la flamme d'une bougie très-près de la surface d'une feuille de papier, d'une lame de verre dépolie..., l'œil étant placé à l'opposé et aussi très-près de cette surface, on voit assez nettement l'image de la flamme, comme dans un miroir. C'est que les rayons qui rasent la surface ne pénètrent que très-peu dans les petites cavités qui séparent les aspérités, et se réfléchissent presque tous sur leur partie culminante, où se trouve un élément parallèle à la direction générale de la surface; de sorte que les normales sont, pour la plupart, à peu près parallèles entre elles.

II. Pouvoirs réflecteurs.

2429. Méthodes de mesure. — La quantité de lumière réfléchiée à la surface d'un corps dépend de la nature de ce corps, de l'état de sa surface et de l'angle que font les rayons incidents avec la normale. Bouguer, puis Fresnel et

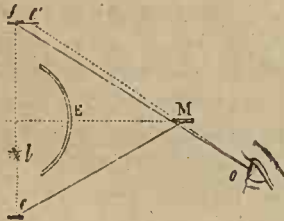


Fig. 1680.

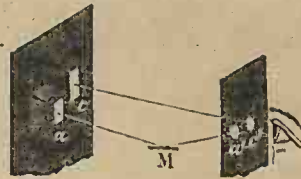


Fig. 1681.

Arago, se sont particulièrement occupés de cette question. Voici une des méthodes employées par Bouguer. M (fig. 1680) est la surface réfléchissante; deux cartons blancs identiques *e* et *f* sont placés symétriquement par rapport au plan de M, et sont éclairés par une bougie *l* placée sur la ligne droite qui les joint. Un écran *E* empêche la lumière de la bougie de parvenir à la surface *M* et à l'œil placé en *o*. Les rayons réfléchis venant de *e* forment une image *e'* de ce carton, comme dans un miroir plan, et arrivent à l'œil dans la direction des rayons envoyés directement par la surface *f*. On déplace la bougie sur la ligne *cf*, jusqu'à ce que les deux surfaces *f*, *e'* paraissent de même teinte, et la proportion *r* de lumière réfléchiée en *M* sera alors $r = d^2 : d'^2$, *d* et *d'* étant les distances *le* et *lf*. En effet, *i* étant l'intensité de la lumière *l*, les illuminations en *e* et en *f* seront $i : d^2$ et $i : d'^2$. Après la réflexion en *M*, l'intensité des rayons envoyés par *e* sera $r(i : d^2)$, et, comme elle est égale à l'intensité des rayons émis par *f*, on aura $i : d'^2 = ri : d^2$, d'où $r = d^2 : d'^2$.

Bouguer a aussi opéré avec la lumière du jour. Deux trous rectangulaires a et c (fig. 1681) laissent passer des faisceaux de lumière diffuse venant d'un même point du ciel. Ces faisceaux viennent éclairer séparément de petites lames translucides a' , c' , derrière lesquelles se place l'observateur. L'un des faisceaux est réfléchi par la surface à éprouver, M , et les trous rectangulaires sont disposés de manière que les chemins parcourus aMa' , cc' soient égaux. On rétrécit peu à peu l'ouverture c , jusqu'à ce que les deux faisceaux qui arrivent en a' et c' paraissent de même éclat. Les intensités des faisceaux incident et réfléchi en M sont alors en raison inverse des aires des ouvertures a et c .

M. C. Wolf mesure les pouvoirs réflecteurs des surfaces polies au moyen de l'appareil (fig. 1682), qu'il a aussi appliqué à divers autres cas¹. En cv , $c'v'$ sont deux tubes perpendiculaires l'un à l'autre, fermés en c , c' par des plaques percées d'un petit trou demi-circulaire, et munis en v , v' de lentilles destinées à rendre les rayons parallèles. En r est une lampe fixe constante, et en s une lampe mobile sur des rails, que l'on peut déplacer en tirant des cordons. Les rayons parallèles fournis par la lampe r vont se réfléchir en a sur un miroir plan argenté, reviennent sur eux-mêmes et sont réfléchis latéralement par la face hypoténuse inclinée à 45° , d'un prisme rectangulaire couvrant la moitié de l'ouverture d'une lunette L . En même temps, les rayons directs de la lampe s entrent dans cette lunette, et l'on dispose le miroir a et

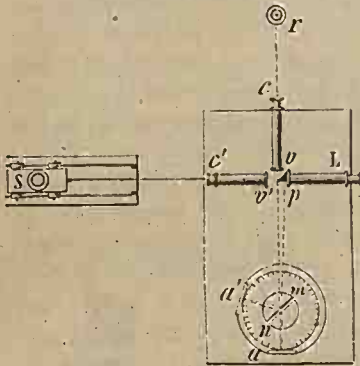


Fig. 1682.

le prisme p de manière que les images des deux ouvertures demi-circulaires c , c' paraissent se toucher par leur côté diamétral. On déplace ensuite la lampe s jusqu'à ce que ces deux images aient le même éclat. — Cela fait, on dispose en mn la lame dont on veut évaluer le pouvoir réflecteur sous une incidence donnée, et l'on transporte le miroir a en a' , de manière que, le faisceau réfléchi sur mn le frappant perpendiculairement, revienne sur lui-même pour se réfléchir de nouveau sur mn , et entrer par p dans la lunette L . L'égalité des deux images est détruite à cause des pertes dans les deux réflexions sur mn ; et l'on rétablit cette égalité, en éloignant la lampe s , d'une quantité qui dépend du pouvoir réflecteur de la surface mn .

2430. Résultats relatifs à la réflexion spéculaire. — Voici quelques-uns des résultats trouvés par Bouguer avec des surfaces bien polies, pour la quantité de lumière réfléchie, la lumière incidente étant représentée par 100 :

¹ Journal de physique de M. d'Almeida, t. I, p. 81.

SUBSTANCES	ANGLES FORMÉS AVEC LA SURFACE			
	AU-DESSOUS DE 5°	15°	30°	60 à 90°
Eau.....	Pour 0°30' ... 72	21	6,5	1,8
Verre à glace (1 ^{re} surface)	5° ... 54	30	11,2	2,5
Marbre noir poli	3°15' ... 60	15,6	5,1	2,3
Mercure-métal des miroirs.	70	»	»	60

Les glaces étamées au mercure réfléchissent, sous l'incidence de 15°, 0,63 de la lumière incidente, les métaux polis 0,56, et l'argent déposé chimiquement sur le verre, 0,94. On voit que le pouvoir réflecteur des diverses substances est très-différent sous la même incidence, et que l'incidence n'a pas la même influence pour toutes. Par exemple, la proportion de lumière réfléchie diminue beaucoup plus rapidement pour le marbre noir que pour les métaux polis, à mesure que les rayons se relèvent au-dessus de la surface.

La lumière qui n'est pas réfléchie sur les corps opaques est éteinte, et l'on voit qu'elle forme, dans le cas de l'incidence normale, sur le mercure et le métal des miroirs, 0,3 environ de la lumière incidente. La proportion réfléchie est beaucoup plus faible encore pour les corps transparents, une portion de la lumière pénétrant dans leur intérieur. Quand il s'agit d'une plaque terminée par deux surfaces polies, cette portion de lumière la traverse de part en part. Bouguer pensait que, même dans ce cas, une petite partie de la lumière était éteinte dans la réflexion; mais nous verrons, en parlant du photomètre d'Arago, qu'aucune partie appréciable de lumière ne disparaît, et que la somme des quantités transmises et réfléchies aux surfaces d'entrée et de sortie représente la totalité de la lumière incidente, quand l'absorption est insensible.

2434. Pouvoir de diffusion. — Dans le cas de la réflexion diffuse sur les surfaces mates, les rayons, étant réfléchis dans tous les sens, peuvent être reçus dans des directions diverses, et leur intensité dépend non-seulement de la direction des rayons incidents, mais aussi de celle des rayons réfléchis considérés. Par exemple, dans la direction des rayons réfléchis spéculairement, on trouve plus de lumière que dans toute autre direction. Bouguer a fait beaucoup d'expériences sur les rayons diffus revenant dans la direction même des rayons incidents. Il employait un appareil semblable à celui de la figure 1675; seulement, le corps transparent était supprimé, la plaque mate était placée en *e*, où l'on faisait varier son inclinaison par rapport aux rayons venant de la bougie, et l'on éloignait plus ou moins l'écran *e'* pris pour terme de comparaison, de manière à obtenir l'égalité d'éclat aux deux ouvertures *e* et *e'*.

Voici quelques résultats trouvés par cette méthode. Les angles sont toujours comptés à partir de la surface, et l'on représente par 100 la quantité de lumière réfléchie suivant la normale, quand l'incidence est aussi normale :

	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Argent mat	24	32	45	64	80	100
Plâtre	19	35	53	64	76	100
Papier	20	33	51	75	97	100

On voit combien les résultats changent avec la direction. Il en est de même quand l'incidence seule varie, et quand, l'incidence étant constante, on observe les rayons réfléchis dans différentes directions.

Quand on compare les divers corps, on trouve d'énormes différences, sous la même incidence, dans le pouvoir réflecteur de diffusion. Les corps de *couleur sombre* sont ceux qui réfléchissent peu de lumière. Le noir de fumée, comme pour la chaleur, ne réfléchit pas de lumière diffuse. Le peu qu'il réfléchit est dû à la réflexion spéculaire qui se fait sur la matière grasse qui recouvre les parcelles de charbon qui le composent.

§ 2. — RÉFLEXION SUR LES SURFACES PLANES, ET INSTRUMENTS D'OPTIQUE QUI S'Y RAPPORTENT

I. Miroirs plans.

2432. Foyer virtuel des rayons réfléchis sur une surface plane. — Considérons une surface plane réfléchissante *ap* (fig. 1683), et un point lumineux *s*. Pour obtenir le rayon réfléchi produit par un rayon incident *si*, on construira le point *s'*, symétrique du point *s*, et l'on mènera la droite *s'i*, dont le prolongement *ir* sera le rayon réfléchi cherché (2427). On ferait de même pour tout autre rayon incident émanant du point *s*, et il en résulte que les prolongements de tous les rayons réfléchis par la surface plane se rencontrent derrière le miroir, au point *s'* symétrique du point *s*. Ce point de rencontre se nomme un *foyer*. Comme ce ne sont pas ici les rayons réfléchis eux-mêmes, mais seulement leurs prolongements qui s'y rencontrent, ce point est un *foyer virtuel* ou *imaginaire*; c'est le *catopète d'incidence* des anciens physiciens.

On voit que le faisceau conserve, après la réflexion, le même degré de divergence qu'auparavant. On reconnaîtrait, de même, qu'un faisceau convergent, allant de *r* en *i*, conserve le même degré de convergence après la réflexion, et que le point de convergence *s* des rayons réfléchis, qui est alors un *foyer réel*, est symétrique du point de rencontre *s'* des rayons incidents prolongés derrière

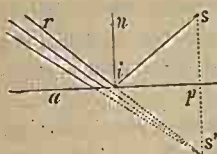


Fig. 1683.

le miroir. — Si les rayons incidents sont parallèles, il en sera de même des rayons réfléchis.

2433. Images vues dans les miroirs plans. — On nomme, en général, *miroir* une surface polie destinée à produire par réflexion les images des objets. Dans le *miroir plan*, les images sont vues derrière sa surface, et dans une position symétrique. En effet, soit ac (fig. 1684) un objet placé devant le miroir plan mm . D'après le principe précédent, les rayons partant du point a formeront, après la réflexion, un cône dont le sommet est en a' , point symétrique de a . De sorte que l'œil placé en O , rapportant la position du point d'où émanent les rayons qui entrent dans la pupille, au sommet a' du cône qu'ils forment quand on les prolonge, ce point imaginaire a' sera vu comme s'il existait réellement (2396). On ferait la même construction pour tous les points de l'objet ac ; son image virtuelle, aa' , est donc placée symétriquement derrière le miroir.

¹ On peut construire facilement le faisceau incident qui, partant d'un point de l'objet, fournit les rayons réfléchis qui entrent dans l'œil. Considérons, par exemple, le point a ; on joindra le point a' aux bords de l'ouverture de la pupille, et l'on joindra au point a l'intersection, oo' , avec la surface du miroir, du cône ainsi formé; aoo' sera le pinceau incident cherché. — Ce pinceau n'est plus le même si l'œil change de place, mais le lieu de l'image $a'e'$ est indépendant de la position de l'œil. On comprend aussi que l'on pourra voir l'image du point a , même quand il sera en dehors de la limite m du miroir, à la condition que l'œil sera suffisamment éloigné du côté opposé.

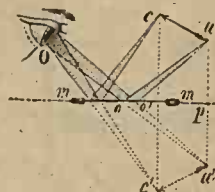


Fig. 1684.

Champ du miroir. — Si, du point a' , on mène une ligne droite qui touche le bord du miroir, et qu'on la fasse tourner en suivant le contour mm , elle engendrera un cône dans l'intérieur duquel l'œil devra être placé pour apercevoir l'image a' du point a . L'espace limité par la surface de ce cône se nomme le *champ* du miroir, pour le point a . On voit que le champ est d'autant moins étendu que le miroir est plus petit, et qu'il dépend aussi de la position du point a considéré.

2434. Miroirs de glace étamée. — L'usage des miroirs remonte à l'antiquité la plus reculée. D'après l'Exode, les femmes d'Israël se servaient de miroirs d'airain. Les anciens en faisaient en bronze, étain, fer bruni, or, argent. Ces derniers, d'après Pline, étaient d'un usage vulgaire chez les Romains. On en faisait aussi de diverses pierres précieuses, comme l'émeraude; avec les jaspes, l'obsidienne. Les anciens Péruviens fabriquaient des miroirs avec cette dernière substance et d'autres pierres dures, et l'on en trouve encore de temps à autre dont le poli s'est bien conservé. Aujourd'hui, on emploie sous le nom de *glaces*, des miroirs plans formés d'une lame de verre, derrière laquelle est appliquée une mince couche d'amalgame d'étain, dont le pouvoir réfléchissant est considérable, et dont l'invention est attribuée aux habitants de Sidon, avant le

sixième siècle. D'abord, on ne put en faire que de très-petits, à cause de la difficulté d'obtenir de grandes plaques de verre. Les Vénitiens en firent bientôt d'assez grandes dimensions par le procédé du soufflage, mais elles n'étaient pas parfaitement planes, et les images étaient déformées. Enfin, en 1688, A. Thévert imagina les glaces coulées, qu'on obtient en versant sur une table de fer une couche de verre fondu, que l'on polit ensuite sur les deux faces. — Il y a quelques années, M. Drayton a imaginé de remplacer l'amalgame par une couche d'argent déposée par procédé chimique.

Les miroirs de glace étamée ou argentée réfléchissent plus de lumière que les miroirs métalliques (2130), et conservent mieux leur pouvoir réfléchissant. Mais ils présentent un grave inconvénient pour les expériences d'optique : la lumière se réfléchissant non-seulement sur la surface antérieure de la glace, chaque rayon incident donne plusieurs rayons réfléchis, et chaque point lumineux fournit plusieurs images. Comme la *réfraction* joue un rôle dans ce phénomène, nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

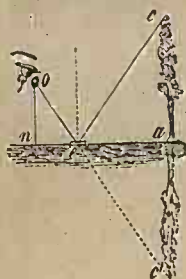


Fig. 1685.

2135. APPLICATIONS DIVERSES DES MIROIRS PLANS. — On fait une foule d'applications des miroirs plans. Nous allons en citer quelques-unes.

Depuis quelques années, on emploie sous le nom de *réflecteurs Troupeau* de grands miroirs étamés, pour renvoyer horizontalement dans les galeries souterraines, les caves, les magasins obscurs, ... la lumière qui arrive verticalement d'en haut. — En déplaçant plus ou moins rapidement un miroir plan frappé par les rayons du soleil, on fait passer le faisceau réfléchi par un poste éloigné, où un observateur voit comme des éclairs courts ou longs.

M. Leseurre a constitué ainsi un télégraphe solaire auquel on applique les signaux de Morse (III, 2300). — Dans les pays du Nord, on dispose en dehors des fenêtres des miroirs inclinés nommés *espions*, dans lesquels on voit l'image des objets extérieurs placés au loin, à droite et à gauche de la fenêtre, sans avoir besoin de l'ouvrir.

Mesure des hauteurs. — On se déplace peu à peu, de manière à voir dans un petit miroir horizontal *e* (fig. 1685) l'image *e'* du point culminant de l'objet *ac* dont on veut connaître la hauteur. On mesure la hauteur *no* de l'œil au-dessus du sol, et les distances *ne* et *ae*, et les triangles semblables *one*, *cae* donnent $ca = no \times ae : ne$.

Miroir magique. — Au moyen de plusieurs miroirs, on peut produire divers effets curieux. Le *miroir magique* consiste en deux miroirs plans inclinés *n* et *m* (fig. 1686) combinés de manière à faire voir par double réflexion, à l'observateur placé en *o*, un objet *ab* situé derrière un mur *cc'*. Considérons en particulier le point *a*; son image dans le miroir *m*, sera *a'*, point symétrique de *a* par rapport au plan *pm* de ce miroir. Les rayons réfléchis se trouvant dans

le même cas que s'ils partaient de a' , donneront, en se réfléchissant sur le miroir n , une nouvelle image a'' symétrique de a' par rapport au plan nq du miroir n . Un observateur placé en o verra donc en $a''b''$ une image de ab . — Les astrologues employaient cet artifice pour montrer aux spectateurs placés en o différentes scènes disposées d'avance dans une chambre ignorée, placée derrière le mur cc' . Des draperies d , cachent le miroir supérieur m .

Pour construire le pinceau qui, parti du point a , entre dans l'œil placé en o , on joint l'image a'' aux bords de la pupille, puis le point a' à l'intersection du pinceau $a''o$ avec le miroir n , puis enfin le point a , à l'intersection du cône $a'n$ avec le miroir m ; ce qui donne le pinceau $amno$.

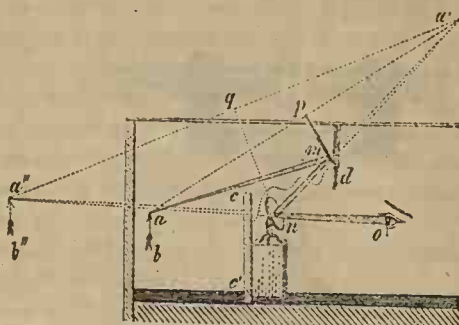


Fig. 1686.

Polémoscope. — Le polémoscope d'Hévélius, destiné à observer en guerre, tout en restant caché derrière un parapet, est une combinaison de miroirs semblable; ab serait l'objet à observer et cc' , l'abri. On peut placer en avant de chacun des miroirs, les verres lenticulaires qui terminent les lunettes grossissantes, de manière à mieux distinguer au loin.

Spectres impalpables. — Cette curieuse expérience se fait au moyen d'une glace sans tain, m (fig. 1687), un peu inclinée, et montrant en a' l'image réfléchie et symétrique d'un objet a vivement éclairé et caché aux yeux du spectateur o . Ce dernier voit, à travers la glace sans tain, des personnages pouvant passer à travers l'image a' , qui n'a rien de matériel, et qu'on peut faire disparaître instantanément en tirant un rideau noir devant l'objet a .

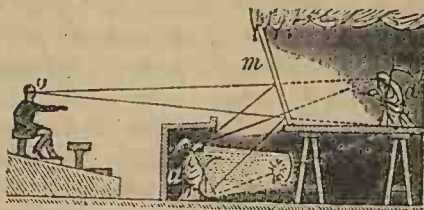


Fig. 1687.

Lunette magique. — Au moyen de quatre miroirs o, e, e, a (fig. 1688), inclinés à 45° sur l'axe d'une lunette mm' , on peut voir au loin, malgré l'interposition d'un corps opaque n , les rayons parcourant la route $m'oecam$, en se réfléchissant sur ces quatre miroirs. La distance des verres de la lunette, placés en m' et m , est représentée par la longueur absolue $maceom'$.

2436. Mouvements comparés du miroir et du rayon réfléchi. —

Quand un miroir ab (fig. 1689) tourne d'un angle α autour d'un axe perpendiculaire au plan d'incidence, le rayon réfléchi tourne de 2α . Soit, en effet, so le rayon incident, or le rayon réfléchi, et on la normale; quand le miroir tournant, de ab vient en $a'b'$, la normale tournant de la même quantité, l'angle d'incidence diminue de α , et il devra en être de même de l'angle de réflexion. Le rayon

réfléchi se rapprochera donc de la normale, de la quantité α , et par conséquent, se rapprochera du rayon incident, de 2α .

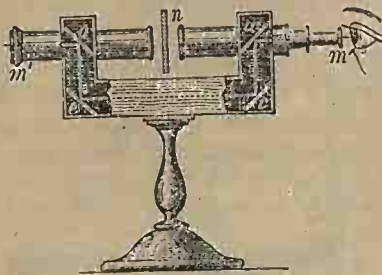


Fig. 1688.

du second rayon réfléchi mr , est égal au double de l'angle des miroirs. En effet, en appelant i les angles d'incidence et de réflexion sur le miroir m , et i' les mêmes angles sur le miroir m' , on a, dans le triangle mcm' , l'angle extérieur $sm'm = 2i' = c + 2i$; d'où $c = 2(i' - i)$; ou $c = 2p$, car on a $i' = i + n = i + p$, d'où $p = i' - i$.

2438. Sextant. — Cet instrument, destiné à mesurer la distance angulaire de deux points éloignés, est une application du principe précédent. Il consiste en un secteur AB (fig. 1691), dont l'arc, divisé en demi-degrés, comprend à

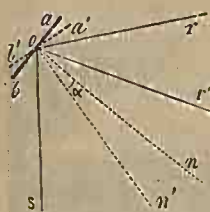


Fig. 1689.

peu près 60° ; d'où le nom de sextant. Une alidade, mobile au centre du secteur, peut être déplacée lentement au moyen d'une vis de rappel m' , et d'une pince p que l'on fixe par une vis de pression; les déplacements se mesurent au moyen du vernier v dont

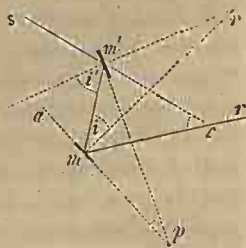


Fig. 1690.

on lit les divisions en s'aidant de la loupe mobile l . Un miroir m , dont le plan prolongé passe par le zéro du vernier, tourne avec l'alidade autour du centre du secteur, au plan duquel il est perpendiculaire. Un second miroir n , parallèle au rayon oB qui passe par le zéro de l'arc gradué, est fixé sur le côté opposé à ce rayon. Ce miroir, représenté à part en MN , n'est étamé que sur la moitié N qui touche le secteur. L est une petite lunette à réticule, dirigée vers le

miroir n , et mobile sur oB , dans un plan perpendiculaire au secteur. On la remplace assez souvent par un simple tube viseur. Enfin, une poignée P , fixée parallèlement derrière le secteur, sert à le tenir à la main et à faire passer son plan par les deux points dont on veut mesurer la distance angulaire.

Supposons que ces deux points soient deux étoiles situées dans les directions s, s' ; on visera d'abord, avec la lunette L et à travers la partie non étamée du miroir n , l'une des étoiles, s ; puis on fera tourner l'alidade ov jusqu'à ce que le rayon $s'oo'e$, venant de la seconde étoile s' et réfléchi successivement par les deux miroirs, arrive dans la lunette L et se confonde avec le rayon direct venant de l'étoile s ; ce qui a lieu quand les deux points lumineux paraissent coïncider. Alors l'angle cherché ses' n'étant autre chose que l'angle du rayon incident $s'o$ avec le rayon réfléchi $o'e$, est le double de l'angle des deux miroirs.

Or, cet angle est mesuré par l'arc Bv ; la distance angulaire cherchée est donc représentée par un nombre de degrés égal au nombre de demi-degrés compris dans cet arc. — Quand la lumière de l'un des points est trop vive, comme lorsqu'il s'agit du soleil, on en diminue l'éclat au moyen de disques de verre coloré d, d' , montés dans des anneaux à charnière, et que l'on peut amener dans le trajet du rayon réfléchi oo' , ou du rayon direct sn .

Le principe du sextant est dû à Hooke, en 1664, mais il n'employait qu'une seule réflexion. Newton perfec-

tionna ensuite cet instrument, et, en 1731, Hadley, qui ignorait les essais faits antérieurement, publia sous le nom d'*octant*, le secteur ne comprenant que 45° , l'appareil que nous venons de décrire. Le principe sur lequel il repose paraît avoir été indiqué avant Hadley, mais comme il est le premier qui en ait fait construire, et qui en ait montré l'importance pour la navigation, il passe à bon droit pour l'inventeur. L'usage du sextant a fait faire d'immenses progrès à l'art nautique, en permettant de mesurer en mer les distances angulaires, malgré les mouvements du navire, parce qu'il n'y a qu'à établir une coïncidence entre deux points lumineux, dont ces mouvements affectent de la même manière la position apparente.

2439. Images multiples dans deux miroirs plans parallèles. — Soit o (fig. 1692) un point lumineux placé entre deux miroirs parallèles mn et pc . Le point o fera une première image o' dans mn , à une distance no' égale à no . Les rayons réfléchis sur mn étant dans le même cas que s'ils partaient du foyer virtuel o' , formeront dans pc , à une distance $co'' = co'$ une image o'' de o' . De même, les rayons qui semblent partir du foyer virtuel o'' , donneront dans mn

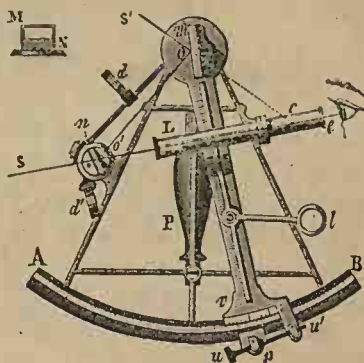


Fig. 1691.

l'image o''' , à une distance $no''' = no''$, et ainsi de suite. Il y aura donc un nombre infini d'images, de plus en plus faibles et finissant par disparaître.

Pour construire le pinceau qui, entrant dans l'œil, fait voir l'image o'' , on joint ce point aux bords de la pupille : puis, au point o'' , l'intersection p avec le miroir pc , du pinceau ainsi obtenu; l'intersection q , au point o'' ; l'intersection r , au point o' ; et enfin l'intersection t au point lumineux o . On obtient ainsi le pinceau brisé $otrqp$.

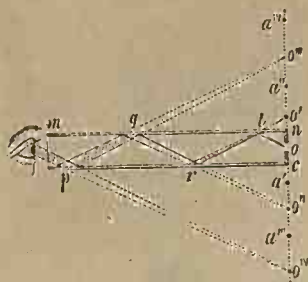


Fig. 1692.

Indépendamment de la série d'images o' , o'' , o''' ... , il se produit une autre série a' , a'' , a''' ... d'images intercalées entre les premières, et qui sont formées par les rayons qui, partant de o , se réfléchissent d'abord sur le miroir pc , au lieu de commencer par mn . Si le point o est à égale distance des deux miroirs, les images appartenant indifféremment aux deux séries, seront équidistantes deux à deux. — On a souvent occasion d'observer la multiplicité d'images dont nous venons de parler; par exemple, quand, dans un salon, deux glaces sont parallèles et opposées. Si l'on veut distinguer les unes des autres les images appartenant aux deux séries, on n'a qu'à employer un corps présentant à chacun des miroirs une face de couleur différente.



Fig. 1693.

Au lieu de deux miroirs plans, considérons un tube poli en dedans, et fermé par un disque opaque percé à son centre o (fig. 1692); deux arêtes opposées du tube, se comportant comme deux miroirs linéaires parallèles, donneront les deux séries d'images, et, comme il en est de même pour deux arêtes quelconques opposées, on verra dans le tube des anneaux concentriques o et a , o' et a' ,... appartenant au même anneau, et d'autant moins brillants que leur diamètre sera plus grand.

2440. Images multiples dans deux miroirs inclinés. — Quand les deux miroirs OB , OA (fig. 1693) forment un angle, un point lumineux s donne deux séries d'images situées sur une circonférence passant par le point lumineux et ayant son centre à l'intersection des miroirs. Chaque série a pour point de départ la première image faite dans un des miroirs. Nous allons considérer celle qui commence par l'image s' faite dans OA ; tout ce que nous dirons s'appliquera à l'autre série.

Remarquons d'abord que l'image s' du point s dans le miroir AO est située sur une corde ss' de la circonférence ayant son centre en O. Le point s' pouvant être considéré comme le point de départ des rayons réfléchis par AO, donnera, dans le second miroir OB, l'image r' située sur la corde $s'r'$. De même, le point r' conduira à l'image s'' dans le miroir AO, s'' à l'image r'' dans OB...

Pour construire le pinceau qui, entrant dans l'œil, o , fait voir une des images, par exemple r'' , on joindra r'' aux bords de la pupille, puis l'intersection α du pinceau $r''o$ avec OB, au point s'' ; l'intersection β de zs'' , au point r' ; l'intersection γ , au point s' ; et enfin, l'intersection δ , au point s . On obtiendra ainsi le pinceau brisé $s\delta\gamma\beta zo$ qui fait voir l'image r'' .

On pourrait faire une semblable construction pour le point s''' , si l'œil était très-près de AO. Mais elle est impossible pour r''' , point symétrique de s''' ; car une ligne droite menée de r''' à l'œil placé en un point quelconque dans l'angle AOB ne rencontre pas le miroir OB. Le nombre d'images est donc limité, et il en sera toujours ainsi, car, une fois que la perpendiculaire à un miroir a dépassé le centre du côté extérieur à l'angle O, les foyers virtuels s'' , s''' , ... r' , r'' , r''' ... se rapprochent de plus en plus des miroirs, et finissent par passer en dehors de l'angle aob , du côté de la face réfléchissante prolongée du miroir correspondant.

2441. Nombre des images. — Ce nombre augmente à mesure que l'angle des miroirs est plus petit, et il devient infini quand l'angle est nul, c'est-à-dire quand les miroirs sont parallèles (2439). Voici à peu près comment M. A.

Bertin trouve le nombre des images¹. Considérons d'abord les images des miroirs eux-mêmes, ou celles de leurs extrémités A et B (fig. 1694). Les images A', B'', A''', de A et B, faites dans le miroir BO, sont situées sur la demi-circonférence Bab; et les images B', A'', B''', faites dans le miroir AO, sur la demi-circonférence Aba. Ces images partagent le cercle en secteurs égaux, dont les deux derniers B''OA''', A''OB''' se superposent en partie, comme en B'''OA''', ou laissent entre eux un certain espace, toutes les fois que l'arc BA n'est pas une partie aliquote de la circonférence. Ces secteurs se suivent, au contraire, sans se superposer dans le cas opposé. Un point s, placé entre les deux miroirs, forme deux séries d'images : les unes, produites par réflexion sur AO, sont toutes situées sur la demi-circonférence Aba; et les autres, par réflexion sur BO, dans la demi-circonférence Bab. Chaque secteur contient une de ces images. Une des deux séries correspond au cas où la réflexion commence par le miroir AO, et l'autre au cas où elle commence par BO.

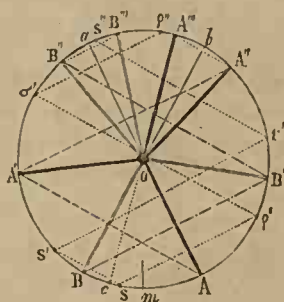


Fig. 1694.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIX, p. 257.

Cela posé, considérons les divers cas qui peuvent se présenter. En général, l'arc BA, que nous appellerons 2α , est compris un certain nombre de fois, n , dans la circonférence, avec un reste 2β ; de sorte que l'on a $\pi = n\alpha + \beta$. n peut être pair ou impair, et le reste, β , peut être nul ou ne l'être pas.

1^o n PAIR. — Pour fixer les idées, supposons $n = 6$ (fig. 1694). Les images des miroirs et les miroirs eux-mêmes AO, BO forment alors sept secteurs, dont les deux derniers A''B''', B''A''' se superposent en partie, puisque 2α , plus grand que $\frac{1}{2}\pi$, est moindre que $\frac{1}{6}\pi$; et les arcs A''A''', B''B''' sont égaux à 2β . Le milieu m de l'arc AB donnant une image au milieu de chaque secteur, il y aura aussi sept images, ou, en général, $n + 1$, en comptant le point lui-même, comme on le fait toujours. — Le nombre d'images de tout autre point situé dans le demi-arc mB ou mA dépend de sa position sur cet arc. Prolongeons A'''O en Oc; on aura Bc = A'''b = β . Les images du point a seront toutes à

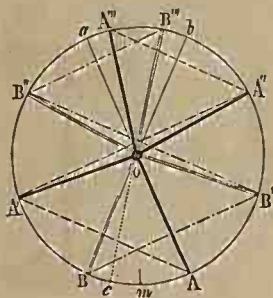


Fig. 1695.

des distances des images du miroir BO égales à β ; la troisième image de la série, commençant par la réflexion sur le miroir BO, viendra donc en a sur le prolongement de AO et ne pourra plus produire de nouvelle image. Il en sera de même à *fortiori* de tout point, tel que s , situé sur l'arc cm . L'image s'' sera donc la dernière, puisqu'elle tombe dans l'angle aOb des miroirs. Un point situé sur l'arc Bc donnant la troisième image sur l'arc aB'' , en dehors de l'angle aOb , pourra fournir une quatrième image. — Quant aux images faites en commençant par le miroir AO, elles seront seulement au nombre de trois, le point s étant éloigné de ce miroir d'une

quantité plus grande que β . Il y aura donc en tout six images pour les points situés en cm , et $6 + 1$ pour ceux situés sur l'arc Bc, ou, en général, en comptant le point s , n images pour les premiers, et $n + 1$ pour les seconds.

Supposons maintenant que n étant toujours pair, l'arc AB soit une partie aliquote de la circonférence; on aura $\pi = n\alpha$, et β étant nul, les deux secteurs B''OA''', A''OB''' se confondront, ainsi que les images du point m qu'ils contiennent. Il y aura donc six images des miroirs, ainsi que du point m . Le point c se confondant avec le point B, il en sera de même des images s'' et s''' du point s . Car si l'on a B''s'' = Bs, on a aussi A'''s''' = As; la différence $s''s'''$ disparaît donc quand les secteurs se confondent. Il y a donc en général n images des miroirs en les comptant eux-mêmes, et n images d'un point quelconque, m ou s .

2^o n IMPAIR. — Supposons, pour fixer les idées, que l'on ait $\pi = 7\alpha + \beta$. Il y aura d'abord huit images des miroirs, A, A', A'', A''', et B, B', B'', B''' (fig. 1695), et le cercle contiendra sept secteurs égaux, plus un petit secteur A'''OB''' dont l'arc A'''B''' est égal à 2β ; car, si 2β devenait nul, les

deux images OA''' , OB''' devraient se confondre, pour que le cercle soit divisé en sept secteurs égaux. Il y a donc huit images des miroirs, en les comptant eux-mêmes, ou, en général, $n + 1$. Le point milieu donnera une image dans chacun des n secteurs, ce qui fera $n + 1$ en le comptant lui-même. Mais il y aura, de plus, deux autres images sur l'arc ab ; car les images qui tombent au milieu des arcs $B'A'''$ et $A'B'''$ sont nécessairement en dehors de ab ; $A'''a = B'''b$ étant moindre que $\frac{1}{2}AB$; autrement $A'''B'''$ serait nul, puisque $ab = AB$. Il y aura donc en tout neuf images du point m , ou, en général, $n + 2$. Si maintenant nous considérons un point situé sur l'arc cm , on verra facilement que ce point donne aussi $n + 2$ images, les images qui tombent sur les arcs $B'A'''$, $A'B'''$ étant en dehors de l'arc ab et en fournissant chacune une nouvelle. Les points situés sur l'arc Bc ne donneront que $n + 1$ images, celles qui tombent sur les arcs $B'A'''$, $A'B'''$ étant comprises dans l'arc ab .

Si l'on a $\beta = 0$, les images OB''' , OA''' des miroirs se confondent, et il n'y en a plus que n . Le point c se confond avec B , et tout point situé sur l'arc AB forme $n + 1$ images, car il y en a toujours deux dans l'arc ab , à moins qu'il ne s'agisse du point milieu m , auquel cas ces deux images se confondent en une seule, et il n'y en a plus que n .

En résumé, quand l'arc AB est compris un nombre entier de fois, n , dans la circonférence, un point situé sur cet arc donne $n + 1$ images en le comptant lui-même, excepté quand n est pair, et quand, n étant impair, le point est au milieu de AB ; alors deux images coïncident, il n'y en a plus que n .

Quand AB est contenu n fois dans la circonférence avec un reste 2β , pour tout point situé à une distance de chaque miroir plus grande que β quand n est pair, et plus petite quand n est impair, il y a $n + 1$ images, en comptant le point lumineux, et il y en a $n + 2$ quand ce point est à une distance plus petite ou plus grande que β , suivant que n est pair ou impair.

Vérifications par l'expérience. — Tous ces résultats peuvent se vérifier au moyen de deux miroirs A et B (fig. 1696) réunis par une charnière horizontale, et dont on peut faire varier l'angle, mesuré sur l'arc ab . L'objet qui doit former les images est fixé entre deux lames de verre soutenues par l'anneau métallique an . Si l'on regarde par un petit trou pratiqué dans la plaque ab près de l'angle des miroirs, on voit un espace circulaire divisé en secteurs, dans lesquels se trouvent les images de l'objet, situées sur une circonférence ayant son centre sur l'intersection des miroirs. Si l'angle est de 90° , on a 4 images; 6, s'il est de 60° ; 3, s'il est de 120° , etc.

2442. Applications. — On a imaginé divers instruments d'optique montrant les effets de la réflexion sur plusieurs miroirs.

Kaléidoscope. — Le kaléidoscope de Brewster consiste en un tube opaque



Fig. 1696.

dans lequel sont disposés deux miroirs $a, b; a', b'$ (fig. 1697) formant une espèce de gouttière. En cd est un espace fermé par deux lames de verre v, v' , dont l'extérieure, v' , est dépolie, et dans lequel on place de petits corps de formes et de couleurs diverses; par exemple, des morceaux de verre de différentes couleurs. Si l'on regarde par l'ouverture o , on voit les images de ces objets former des figures symétriques, dont on varie la disposition en déplaçant ces objets au moyen de quelques secousses. Une vis n, n' sert à faire varier l'angle des miroirs. L'instrument de la figure 1696 n'est autre chose qu'un kaléidoscope de précision, dont les dessinateurs pour tissus font usage afin d'y chercher des combinaisons de dessins et de couleurs.

Caisse catoptrique. — Si au lieu de deux miroirs, on en emploie trois ou un plus grand nombre formant un prisme, on a ce qu'on nomme une *caisse catoptrique* (fig. 1698). Le prisme se place verticalement, et la base supérieure est formée d'une lame de verre dépolie ou d'une membrane. On regarde dans l'intérieur de la caisse, par de petites ouvertures, o , pratiquées dans le haut de

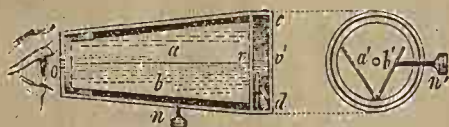


Fig. 1697.



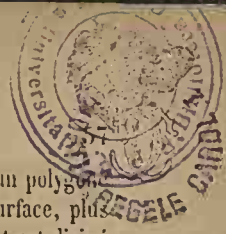
Fig. 1698.

chaque miroir, et l'on voit les objets placés dans l'intérieur, reproduits un très-grand nombre de fois. Au moyen d'une caisse à six miroirs, dans laquelle on dispose de petits modèles d'arbres, de navires ou de soldats, on voit par les réflexions multiples, une immense forêt, une flotte ou toute une armée, occupant un espace beaucoup plus grand que l'étendue de la caisse.

Le champ de vue est distribué symétriquement, quand la base de la caisse est un polygone régulier. Mais cette condition n'est pas toujours nécessaire. Ainsi, dans le cas de trois miroirs, la symétrie existe quand chacun des angles est une partie aliquote de quatre droits; ce qui n'a lieu que lorsque le triangle de base est équilatéral, ou droit et isocèle, ou, enfin, droit avec les angles aigus égaux l'un à 30° , l'autre à 60° .

En disposant convenablement des glaces dans une chambre, on peut en faire une caisse catoptrique, dans laquelle les images des objets, et surtout des lumières, produisent en se multipliant des effets merveilleux.

2443. Marche d'un rayon lumineux en ligne courbe. — A la réflexion sur plusieurs miroirs se rattache une expérience curieuse, dans laquelle on peut faire marcher un rayon de lumière en ligne courbe. M. Plateau prend un ruban métallique bien poli, courbé partout dans le même sens, c'est-à-dire sans points d'inflexion. On fait tomber très-obliquement du côté concave, un mince pinceau de rayons solaires, qui se réfléchit, rencontre de nouveau la surface concave, s'y



réfléchit une deuxième fois, puis une troisième..., et forme ainsi un polygone inscrit dans la courbe. Plus le rayon incident est rapproché de la surface, plus les côtés du polygone sont petits et nombreux, et si le rayon incident est dirigé tangentiellement à la surface courbe, les côtés du polygone sont infiniment petits, et le pinceau lumineux forme une courbe continue appliquée sur celle que forme le ruban métallique. — Ce résultat se vérifie par l'expérience, en suivant la marche de la courbe lumineuse sur une feuille de papier, sur laquelle est posé le ruban, ou en approchant normalement de cette bande un petit écran de papier, au point où l'on veut vérifier le passage des rayons. Le pinceau courbe redevient rectiligne à l'extrémité de la bande, et la quitte dans la direction de la tangente. Ce phénomène curieux peut être rapproché de celui que produit le son, qui suit les contours des gouttières formant une courbe concave (I, 618).

Babinet avait, antérieurement, dirigé des rayons suivant une courbe continue *quelconque*. Il faisait entrer le pinceau lumineux de dedans en dehors dans une veine liquide, normalement à la paroi du vase, et à travers l'orifice de sortie. Le pinceau restait emprisonné dans la veine, en se réfléchissant *totalemment* sur ses parois internes, comme nous le verrons (ch. III). Ce n'était qu'au moment où la veine se brisait contre un obstacle, que l'on voyait la lumière

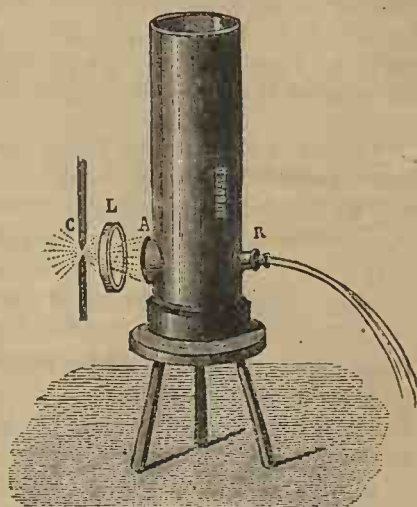


Fig 1699. — 1/20.

rejaillir avec le liquide, impuissant dès lors à la retenir. Si l'eau était trouble, la veine devenait visible à cause de la lumière réfléchie par les parcelles en suspension. — Babinet a vu aussi des baguettes de verre courbées d'une manière quelconque, conduire un pinceau de lumière d'une extrémité à l'autre. Cette lumière, affaiblie par l'absorption du verre, sortait avec une teinte verdâtre. — On peut par un semblable moyen amener la lumière, par une route sinieuse quelconque, en un point que l'on veut éclairer. Au lieu d'une baguette de verre massive, on peut employer un tube de verre, à surface extérieure noircie.

Colladon, pour montrer la structure des veines liquides, lance de la lumière dans la veine, de dedans en dehors, à travers la paroi du vase opposée à l'orifice. Une lentille rassemble les rayons solaires, ou autres, en un foyer où ils se croisent de manière à entrer dans la veine en formant des angles très-petits

avec sa surface intérieure. Cette veine, à peine visible, s'éclaire d'une vive lumière là où elle se divise en gouttes, ou quand elle se brise contre un obstacle. Si l'on imprime quelques secousses au vase, il se fait dans la partie limpide, des fissures, d'où s'échappe une lumière très-brillante.

Les *fontaines lumineuses*, qui ont eu tant de succès sur diverses scènes théâtrales, sont une application de ces mêmes effets. Les rayons lumineux lancés par l'arc voltaïque C (fig. 1699), traversent la lentille L et une glace enchâssée en A, et pénètrent dans la veine liquide R. On a illuminé ainsi des jets d'eau verticaux, des gerbes, dont chaque branche munie de son foyer lumineux présentait une couleur particulière produite par l'interposition d'un verre de couleur entre L et A. Il est évident que toutes les pièces C, L, A doivent être cachées au spectateur, par une partie du décor.

II. Goniomètres de réflexion.

2444. Les *goniomètres* sont des instruments destinés à mesurer les angles dièdres, particulièrement ceux des cristaux. Nous n'avons à nous occuper ici que de ceux dans lesquels on emploie la réflexion, en utilisant le pouvoir réflecteur des faces de ces cristaux, qui sont le plus souvent très-brillantes. C'est Lambert qui a, le premier, employé ce moyen, que Wollaston a rendu pratique en inventant l'instrument suivant.

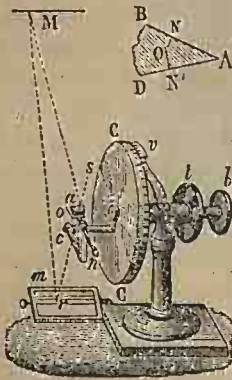


Fig. 1700.

2445. Goniomètre de Wollaston. — Cet instrument, qui donne les angles des plus petits cristaux, à une minute près, consiste en un cercle vertical gradué CC (fig. 1700), que l'on peut faire tourner sur lui-même en agissant sur la tête t d'un arbre horizontal porté par le pied de l'instrument. Un vernier fixe v sert à mesurer les angles de rotation. L'arbre est traversé, suivant son axe, par une tige à bouton b, qui peut tourner sur elle-même indépendamment de l'arbre foré. Cette tige supporte du côté opposé, par l'intermédiaire de pièces articulées eno, une petite palette o sur laquelle on fixe, au

moyen de cire molle, le cristal a. Le mouvement de la pièce cn autour de l'axe c parallèle au cercle, et celui de la tige no sur elle-même, permettent de diriger l'arête du cristal perpendiculairement au plan du cercle, de manière qu'elle passe par le centre de l'instrument. Cela fait, et le zéro de la division du cercle CC coïncidant avec celui du vernier, on fait tourner le cristal au moyen du bouton b, sans déranger le cercle, de manière à voir par réflexion sur une de ses faces l'image d'une mire horizontale très-éloignée M, par exemple le bord inférieur d'une fenêtre, et l'on amène l'image de cette mire à coïncider avec une seconde

mire horizontale vue directement suivant sr , ce qui a lieu quand le rayon réfléchi as se confond avec le rayon ra venant directement de la seconde mire. Celle-ci peut être le bord d'une feuille de papier posée sur la table, ou bien l'image de la première mire réfléchie dans un miroir horizontal m fixé au pied de l'instrument. On a ainsi parfaitement déterminé la position de la face du cristal. On fait ensuite tourner le cercle CC , en agissant sur la tête t , de manière à obtenir la même coïncidence au moyen de la seconde face du cristal, et le vernier donne l'angle dont il a fallu faire tourner le cercle. Le supplément de cet angle est égal à l'angle du cristal; car, BAD représentant à part l'angle à mesurer, pour amener la surface *extérieure* d'une des faces, DA , à la place de l'autre, BA , il faut que la normale ON' vienne prendre la place de la normale ON . Le cristal doit donc tourner d'une quantité égale à l'angle NON' des normales, qui est le supplément de l'angle A des deux faces.

Pour obtenir une bonne mesure, il faut plusieurs conditions : 1° le plan du cercle gradué doit être bien perpendiculaire aux mires horizontales; 2° il faut que l'arête du cristal soit exactement perpendiculaire au plan du cercle; on reconnaît que cette condition est remplie quand les deux mires peuvent coïncider dans toute leur longueur; 3° l'œil doit toujours occuper la même position, condition remplie, sans qu'on ait à s'en préoccuper, quand les faces du cristal sont très-petites, ce qui n'empêche pas qu'on puisse apercevoir facilement l'image réfléchie de la mire, même quand les faces sont à peine visibles; 4° l'axe de rotation du cercle doit être contenu dans le plan qui partage en deux parties égales l'angle dièdre à mesurer. Alors les deux faces occuperont successivement la même position. Si, au contraire, l'axe passait à une certaine distance du plan bissecteur, les normales abaissées d'un point de cet axe sur les faces seraient de longueur inégale, et une face ne pourrait prendre qu'une position parallèle à la direction qu'avait la première, et l'écart serait égal à la différence de longueur des deux normales. Si cet écart était sensible par rapport aux distances des mires à l'axe, les surfaces qui réfléchissent successivement l'une des mires ne seraient pas tout à fait parallèles quand il y aurait coïncidence avec l'autre mire, et l'angle trouvé ne serait pas exactement celui des deux faces. On évite cette cause d'erreur en choisissant des mires assez éloignées pour que l'angle sous-tendu par la différence des deux normales et ayant son sommet à l'une ou l'autre mire soit plus petit que la fraction de degré que permet d'évaluer le vernier. — Comme il est impossible, avec un cristal très-petit, de connaître la position du plan bissecteur, on cherche à faire passer l'arête même de l'angle par l'axe du cercle.

Goniomètre de Mitscherlich. — Le goniomètre de Mitscherlich n'est autre que celui de Wollaston, auquel sont ajoutées différentes pièces accessoires, destinées à le rendre plus précis et plus commode. Une pince, à vis de pression agissant sur le contour de la tête t (*fig.* 1699), sert à rendre le cercle C fixe pendant qu'on fait tourner le cristal. Une vis de rappel, portée par le pied de l'instrument, sert à mouvoir la pince, et par conséquent le cercle, de manière à

placer celui-ci avec précision dans la position voulue. La tête *b* de l'axe intérieur, qui porte le système *cro*, est aussi munie d'une pince et d'une vis de rappel au moyen de laquelle on achève de donner au cristal exactement la position pour laquelle les deux mires coïncident. Le support du cristal porte plusieurs vis destinées à l'orienter avec précision, les unes servant à le déplacer parallèlement et normalement au plan du cercle, les autres obliquement. On vise le cristal, au moyen d'une petite lunette, articulée à l'extrémité d'une colonne fixée au pied de l'instrument; et un fil horizontal, tendu au foyer de cette lunette, permet de n'employer qu'une seule mire, dont on fait coïncider l'image réfléchi par le cristal, avec ce fil.

Quand les faces du cristal sont ternes ou très-petites, la lunette affaiblissant les rayons réfléchis, on l'enlève et l'on regarde directement en se servant du miroir. Il est même des cas où il faut opérer dans une chambre obscure, en prenant pour mire une fente d'un écran, derrière laquelle on place une bougie.

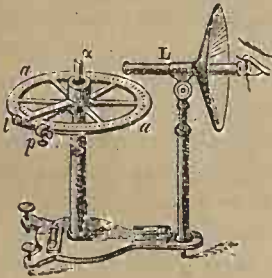


Fig. 1701.

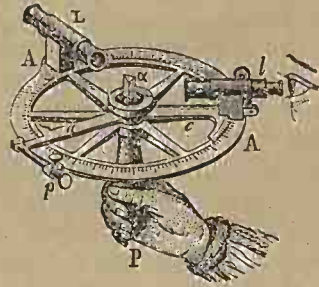


Fig. 1702.

M. Ch. Chevallier a aussi apporté au goniomètre de Wollaston différentes modifications qui le rendent plus précis. M. Mosch a disposé horizontalement le cercle gradué, à cause de la facilité de trouver des mires verticales éloignées, par exemple, les angles des édifices, les jambages des portes et des fenêtres. Alors l'arête du cristal doit évidemment être verticale.

2446. Goniomètre de Charles et Malus. — Ce goniomètre est horizontal et n'exige qu'une seule mire. Le cristal (*fig. 1701*) est fixé verticalement au moyen de cire, au-dessus de l'axe d'une alidade *l* tournant autour de l'axe du cercle gradué *aa*, et portant un vernier avec pince à vis de rappel *p*. Une lunette à réticule sert à viser, par réflexion sur une des faces du cristal, une mire éloignée. On fait de même avec l'autre face, en faisant tourner convenablement l'alidade, et le déplacement angulaire qu'elle a subi représente le supplément de l'angle cherché.

2447. Goniomètre de Babinet. — Avec cet instrument, on n'a plus besoin de mire éloignée. Un cercle gradué *AA* (*fig. 1702*) est fixé par son centre à une poignée *P*, ou mieux à un pied à genou. Un collimateur *L*, ou tube à réticule

dont un des fils est perpendiculaire au plan du cercle, est fixé parallèlement à un rayon de ce cercle. Quand le collimateur est tourné vers le jour, les fils enveloppés d'un faisceau de rayons parallèles, forment des ombres qui remplacent une mire placée à l'infini. Une lunette à réticule l , dirigée comme le collimateur, est fixée sur un bras e tournant autour du centre, et muni d'un vernier et d'une pince avec vis de rappel. Le cristal α est collé avec de la cire molle, sur un support placé au centre de l'appareil, et que l'on peut faire tourner sur lui-même au moyen d'une alidade a à vernier et pince à vis de rappel p . On place d'abord la lunette l de manière qu'elle fasse un certain angle avec le collimateur L ; puis, ayant placé le vernier de l'alidade a sur le zéro du cercle, on fait tourner le cristal avec son support, jusqu'à ce que, en regardant à travers la lunette l , on voie le centre de son réticule coïncider avec celui du collimateur, vu par réflexion sur l'une des faces du cristal. On fait ensuite tourner le cristal au moyen de l'alidade a jusqu'à ce que la même coïncidence se reproduise par réflexion sur l'autre face; et l'angle indiqué par le vernier de l'alidade est le supplément de l'angle cherché. — Il est bon d'entourer le cristal d'écrans noirs, pour intercepter toute autre lumière que celle qui sort du collimateur.

Au lieu d'un fil, le collimateur porte souvent une fente étroite dont on peut faire varier la largeur, et à l'extrémité opposée, une lentille qui rend parallèles les rayons partant de la fente. Ces rayons, après s'être réfléchis, entrent dans la lunette, que l'on place de manière que le fil de son réticule perpendiculaire au cercle, coïncide avec l'un des bords de l'image de la fente.

Il faut que l'arête de l'angle à mesurer soit perpendiculaire au plan du cercle. On remplit cette condition en faisant en sorte, par tâtonnement, que l'arête paraisse sur le prolongement de son image dans un petit miroir placé au centre du cercle, bien parallèlement à son plan, et sur lequel le cristal est collé avec de la cire molle. — Il faut aussi que la fente ou le fil du collimateur, et le fil de la lunette soient perpendiculaires au plan du cercle, auquel cas ils paraissent coïncider dans toute leur longueur. Remarquons enfin que ce goniomètre ne convient pas aux cristaux trop petits et à faces ternes.

2418. Mesure de l'angle d'un prisme. — Malus a imaginé d'employer le cercle répétiteur pour mesurer avec une très-grande précision les angles formés par des faces polies. Cette méthode, qui suppose ces faces assez grandes, comme celle d'un prisme, s'applique de différentes manières. Soit Λ (fig. 1703) l'angle que l'on veut mesurer. On fixe le prisme, ABC , de manière que ses arêtes soient perpendiculaires au plan du cercle; puis, ce cercle étant en o , on vise une mire, d'abord par réflexion sur la face AB , puis directement, et l'on mesure l'angle $soi = d$. La mire doit être très-éloignée pour que les rayons so et $s'i$, qui en émanent, puissent être regardés comme parallèles. Transportant

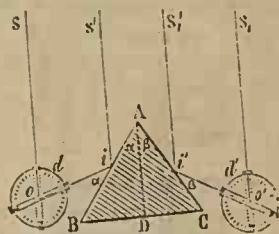


Fig. 1703.

en second lieu, le cercle gradué en o' , on vise la même mire par réflexion sur la face AC, puis directement, et l'on mesure l'angle $s_1 o' i' = d'$. L'angle cherché sera égal à $\frac{1}{2}(d + d')$. Car si l'on divise l'angle A en deux parties α, β , par la droite AD parallèle à la direction commune des rayons incidents, on a $\alpha = \frac{1}{2}d$, puisque d et 2α sont également supplémentaires de l'angle i ; de même, $\beta = \frac{1}{2}d'$; d'où $\alpha + \beta = \frac{1}{2}(d + d')$.

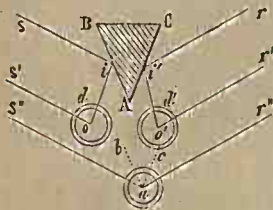


Fig. 1704.

Arago et Petit ont employé une autre méthode. On vise, au moyen d'un théodolite placé en o (fig. 1704), une mire s' , directement, puis par réflexion sur la face AB, et l'on mesure l'angle $s'oi = d$. Plaçant ensuite le théodolite en o' , on vise de même une seconde mire, r , directement et par réflexion sur la seconde face AC, et l'on mesure l'angle $i'o'r' = d'$. Enfin, on mesure l'angle $s''ar'' = D$, obtenu en visant successivement aux deux mires. Si l'on mène ab et ac parallèles à AB et AC, on aura $bac = A = D - bas'' - car'' = D - \frac{1}{2}(d + d')$.

III. Héliostats.

2449. Porte-lumière. — Dans les expériences d'optique, on a souvent besoin de faire entrer dans la chambre obscure un faisceau de rayons solaires conservant une direction constante malgré le mouvement du soleil. Pour atteindre ce but, on emploie les héliostats; mais, quand on n'a pas besoin d'une grande

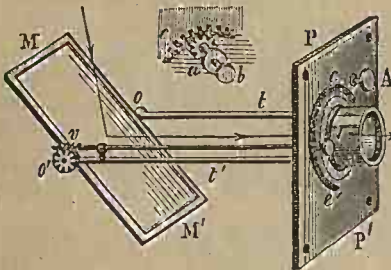


Fig. 1705.

précision, on se sert du porte-lumière à réflexion, que nous allons d'abord décrire. Cet appareil consiste en une plaque PP' (fig. 1705) que l'on fixe, au moyen de vis, au volet de la chambre obscure, et qui porte deux montants t, t' , qui soutiennent un miroir MM' placé en dehors du volet, et pouvant recevoir deux mouvements: l'un autour d'un axe perpendiculaire au volet, l'autre autour d'un axe parallèle oo' . Les deux montants sont fixés à un plateau circulaire denté, renfermé dans la double plaque PP' , et qu'on peut faire tourner sur lui-même en agissant sur un pignon denté dont la tête A est en dedans de la chambre. Le mouvement autour de oo' est imprimé au miroir par un système d'engrenage $o'v$ que l'on fait mouvoir au moyen du bouton V . La tige Vv est portée par le plateau denté, et se meut avec lui en passant par une

fente circulaire ce' . En agissant sur les deux boutons A et V, on donne au miroir une position telle que les rayons réfléchis entrent suivant une direction donnée, par l'ouverture ménagée au centre de la plaque; et il suffit d'agir de temps en temps sur les boutons A et V pour ramener les rayons réfléchis dans cette direction, que le mouvement du soleil leur fait sans cesse quitter.

Pour rendre cette manœuvre plus commode, M. Dubosq a réuni les deux boutons, comme on le voit en ab , en faisant passer la tige Vv dans l'axe du pignon denté, qui se déplace alors avec le plateau circulaire, et lui imprime le mouvement en engrenant dans une couronne fixe c , dont les dents sont dirigées vers le centre.

2450. HÉLIOSTATS. — Les *héliostats* sont des appareils destinés à donner par réflexion une direction constante aux rayons du soleil, malgré son mouvement horaire d'orient en occident. Indépendamment de ce mouvement, le soleil en possède un autre, en vertu duquel il s'approche ou s'éloigne de l'équateur, de sorte que, par la combinaison de ces deux mouvements, il paraît décrire une courbe hélicoïdale. Mais le mouvement dans le sens du méridien est si peu sensible pendant la durée du jour, qu'il est inutile d'en tenir compte. Nous supposons aussi que la terre est réduite à un point, c'est-à-dire que nous négligerons son rayon, l'angle sous-tendu par ce rayon ayant son sommet au centre du soleil, n'étant que de 8 à 9".

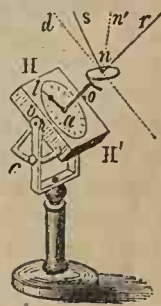


Fig. 1706.

2451. Héliostat de Farcinheit. — Cet instrument, le plus simple de tous, donne un rayon réfléchi, constamment parallèle à l'axe de la terre. Il consiste en une horloge IIII' (fig. 1706), dont l'aiguille fait un tour en 24 heures. On place ce cadran parallèlement à l'équateur. Pour cela, on commence par diriger l'axe horizontal oo , autour duquel l'horloge peut basculer, perpendiculairement au méridien du lieu, puis on incline l'horloge de manière que le plan IIII' fasse avec la verticale un angle égal à la latitude du lieu, angle qui se mesure sur l'arc divisé c fixé à l'axe oo et tournant avec lui. L'aiguille de l'horloge tourne alors autour d'un axe parallèle à la ligne des pôles de la sphère céleste, et un rayon solaire, sn , décrit autour de cette ligne un cône dont le demi-angle au sommet, snr , est le complément de l'angle snd que fait un rayon solaire avec l'équateur, angle qui n'est autre chose que la déclinaison du soleil. Si donc nous adaptons à l'axe na , un miroir plan perpendiculaire au plan snr du méridien, lequel se confond avec le plan nal , dans lequel se trouve l'aiguille indiquant l'heure vraie, et, si ce miroir est perpendiculaire à la bissectrice nn' de l'angle snr , complément de la déclinaison du soleil le jour de l'expérience, le rayon sn se réfléchira suivant nr , parallèle à l'axe de la terre. De plus, comme le miroir tourne avec l'aiguille al , de manière que le plan nal coïncide toujours avec le plan du méridien contenant le soleil, le rayon réfléchi sera toujours dirigé suivant nr . — Si l'on veut donner à ce rayon une

toute autre direction, il suffira de le faire réfléchir par un second miroir incliné convenablement; mais la double réflexion fait perdre beaucoup de lumière.

M. V. Monckhoven a perfectionné l'héliostat de Fareinheit, particulièrement pour l'usage des photographes, en donnant une grande stabilité à l'appareil et une grande étendue au miroir. L'arbre tournant A qui porte ce miroir MM (fig. 1707) n'est plus soutenu par la caisse *n* du mouvement d'horlogerie, mais il tourne sur une pointe *p* et dans un collier *e* portés par un châssis métallique à large base. Cet arbre reçoit son mouvement d'un pignon extérieur de l'horloge *n*, agissant sur une roue dentée *d*. On incline tout ce système suivant la latitude, en le faisant basculer autour de l'axe horizontal *r*, et on le fixe au moyen de vis de pression agissant sur la large bande courbe *a*. Pour orienter l'appareil dans le méridien, on le fait tourner autour d'un axe vertical *o*; les heures sont indiquées en *h*.

2452. Héliostat de M. O. de Littrow. — Dans cet appareil, très-simple (fig. 1708), on distingue un arbre tournant orienté parallèlement à l'axe du monde, comme dans l'appareil de Fareinheit; mais le miroir est fixé le long de l'arbre, de manière que son plan contient l'axe de rotation, qui fait un *demi-tour* seulement en 24 heures. L'installation est des plus simples: une fois l'axe orienté, le rayon réfléchi reste fixe dans une direction qui passe par un point du parallèle décrit par le soleil, et qu'on détermine par la position initiale donnée au miroir. Il n'y a besoin de connaître ni la déclinaison du soleil, ni l'heure initiale.

Pour faire comprendre la marche de l'appareil, supposons d'abord que le miroir soit fixe. Pendant le temps *t*, le rayon incident partant d'une position **1** se déplacera sur un cône ayant pour axe celui du miroir, le rayon réfléchi se déplacera d'une quantité égale, mais en sens contraire, sur un autre cône opposé au premier par le sommet, de manière que le rayon s'éloignera de la normale de la même quantité que le rayon incident, et que son plan de réflexion tournera autour de cette normale d'une même quantité que le plan d'incidence, avec lequel il doit toujours se confondre, et le rayon arrivera, au bout du temps *t*, à une nouvelle position, **2**. — Supposons, en second lieu, que le miroir tourne avec la même vitesse que les rayons incidents, un rayon réfléchi tournera de même et dans le même sens, et les angles d'incidence et de réflexion ne varieront pas. Si, au bout du temps *t*, on ramenait subitement le plan du miroir dans sa première position, le rayon réfléchi reviendrait à la position **2**; et l'on conçoit que, si le miroir rétrogradait seulement de la moitié de la quantité dont il s'était déplacé pendant le temps *t*, le rayon réfléchi prendrait une direction intermédiaire entre la direction **2** et la direction **3**, c'est-à-dire qu'il reviendrait à sa position première, les déplacements de rayons que nous avons considérés se faisant tous uniformément avec la même vitesse, quel qu'en soit le sens. Il suffira donc que le miroir tourne en sens inverse du mouvement du soleil, et avec une vitesse d'un *demi-tour* en 24 heures, pour que le rayon réfléchi reste fixe dans la position initiale qu'on lui aura donnée. Cette position sera nécessairement sur un

cône dont les arêtes forment avec l'axe tournant un angle égal au complément de la déclinaison du soleil. On voit que, si la direction à donner au rayon réfléchi n'est pas arbitraire, on a du moins assez de choix pour que l'héliostat de M. de Littrow puisse être préféré, dans un grand nombre de cas, aux appareils d'un champ plus étendu, mais plus compliqués et plus coûteux, qui ont été imaginés depuis l'invention de l'héliostat par Fareinheit. Beaucoup de physiciens sont parvenus, en effet, à donner aux rayons solaires réfléchis une direction constante, choisie arbitrairement entre des limites étendues. Le premier qui ait résolu complètement la question est Sgravesande; mais son héliostat, malgré les perfectionnements apportés par Charles, est compliqué et d'une installation difficile et exigeant d'assez longs calculs. Aussi, après avoir été longtemps célèbre, a-t-il été complètement abandonné depuis l'invention d'appareils plus pratiques, parmi lesquels nous allons en décrire trois des plus importants.

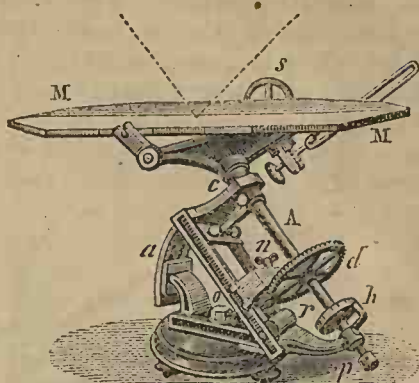


Fig. 1707.

2453. Héliostat de Gambey. — Le prin-

cipe de cet instrument est des plus simples. Soit un cercle EE' (fig. 1709) parallèle à l'équateur et tournant sur lui-même en 24 heures. Au centre de ce cercle est une colonne $o'o$, qui ne tourne

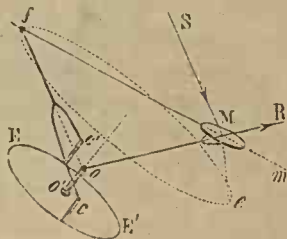
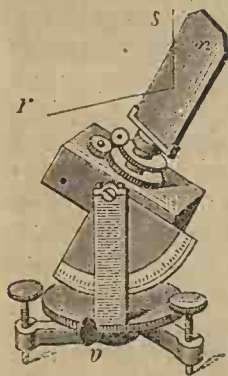


Fig. 1709.

pas avec lui, et à l'extrémité de laquelle est articulée une tige oM que l'on place dans la direction oMR que doit avoir le rayon réfléchi. A l'extrémité de

cette tige est articulé le miroir M , pouvant se mouvoir dans tous les sens. Un levier ccf , mobile autour d'un axe cc' parallèle au plan du cercle EE' et passant par le point d'articulation o , est dirigé parallèlement aux rayons solaires, et par conséquent fait avec le plan EE' un angle égal à la déclinaison. Ce levier

Fig. 1708.



porte en f une charnière universelle soutenant un tube dans lequel peut glisser une tige ou queue MS , fixée au miroir dans le prolongement d'un de ses diamètres. La distance of est exactement égale à oM ; de sorte que le triangle fMo est isocèle, et l'angle Mfo égal à fMo , et par conséquent à RMm . Si donc nous menons le rayon incident SM parallèle à fo , l'angle SMf étant aussi égal à Mfo , la ligne MR , prolongement de Mo , sera le rayon réfléchi. Quand maintenant le cercle équatorial EE' tournera sur lui-même, de manière que le plan du

triangle fMo contienne toujours le centre du soleil, la queue Mf décrira un cône oblique dont la base sera un cercle se parallèle à l'équateur, et le triangle fMo restant toujours isocèle, tout en changeant de forme, le rayon réfléchi sera constamment dirigé suivant oMR .

Description de l'appareil. — EE' (fig. 1710) est le cercle équatorial, sur le contour duquel sont marquées les heures. Il fait un tour en 24 heures, sous l'action d'une horloge renfermée dans le cylindre Hp , et faisant tourner un pignon denté p qui engrène des dents qui porte en dessous le cercle EE' . Un index fixe e marque les heures. Le cercle EE' et l'horloge qui le même, sont fixés à un axe

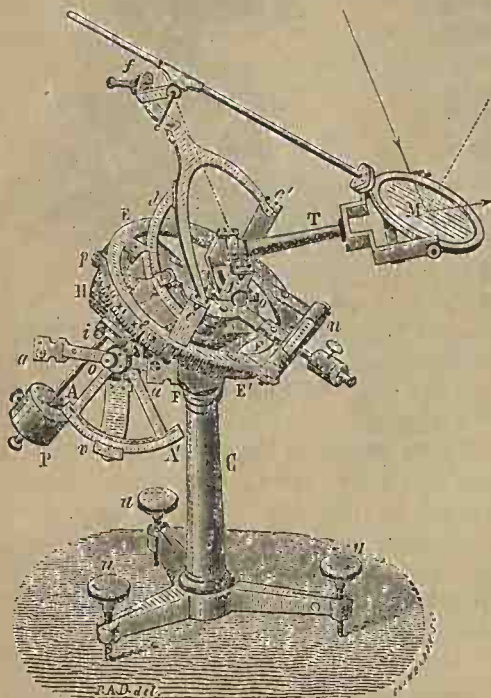


Fig. 1710. — $\frac{1}{6}$.

horizontal oo porté par une large fourchette FF qui surmonte le pied de l'appareil. Au moyen de cet axe, on peut placer le cercle EE' parallèlement à l'équateur. Pour cela, on dirige l'alidade à pinules an , qui est perpendiculaire à l'axe oo , dans le plan du méridien; puis on incline le plan EE' de manière que l'arc Av , pris sur le secteur AA' fixé à l'axe oo , soit égal au complément de la latitude, le zéro du vernier fixe v étant sur la verticale qui passe par l'axe o . L'appareil est alors orienté. Au centre du cercle équatorial EE' se trouve la colonne perpendiculaire, qui peut tourner sur elle-même et être arrêtée au moyen d'une vis de pression placée en dessous. Sur cette colonne est articulée

la tige à fourchette T, qui porte le miroir M. Cette colonne peut prendre différentes positions autour d'un axe parallèle au plan EE', et être arrêtée au moyen d'une vis *r* qui presse un petit arc fixé à l'axe. La tige T peut donc être placée dans la direction que l'on veut donner au rayon réfléchi, au moyen de ce dernier mouvement et de celui de la colonne sur elle-même. Le levier *cc'*, mobile autour de l'axe *cc'*, qui coupe l'axe d'articulation de la tige T, est soutenu par des supports *c, c'* fixés au cercle EE'. L'arc de déclinaison *d* permet de placer le plan *cc'f* de manière qu'il fasse avec l'équateur un angle égal à la déclinaison du jour. Cela fait, il reste à mettre le cercle EE' sur l'heure vraie. P est un contre-poids destiné à équilibrer tout l'appareil, et *n* un autre contre-poids pour équilibrer le cercle EE' d'après son inclinaison. E'n est un niveau à bulle d'air au moyen duquel on place les trois pieds de l'instrument dans un plan horizontal, en mettant d'abord le cercle EE' perpendiculaire à la colonne C, c'est-à-dire en faisant coïncider les zéros du vernier *v* et de l'arc AA', puis agissant sur les vis calantes *u, u, u*, de manière que la bulle du niveau se tienne toujours au milieu, pendant qu'on fait tourner le cercle EE' sur lui-même, le pignon *p* étant séparé des dents du cercle EE', ce qui se fait en abaissant un peu l'horloge II, qui peut basculer sur deux pointes à vis, dont se voit en *i*. Une vis de pression la tient soulevée quand l'appareil fonctionne.

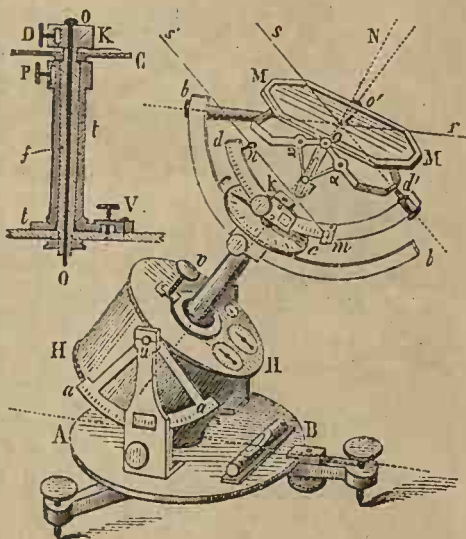


Fig. 1711.

2451. Héliostat de Silbermann. — Cet instrument (fig. 1711) est plus simple, et beaucoup moins coûteux que le précédent; mais il est moins stable. III est une horloge, dont on dirige la base parallèlement à l'équateur, au moyen de l'arc de latitude *aa* et d'une ligne de foi AB, que l'on dirige suivant le méridien du lieu et qui est tracée sur un plateau AB mobile sur un axe vertical. L'horloge fait tourner un arbre dirigé suivant son axe et représenté à part en OO. Cet arbre fait un tour en 24 heures, et porte une pièce carrée *K, k*, munie d'une aiguille qui indique les heures sur un cadran *cc, C*. Ce cadran est porté par un tube *f* enveloppant l'arbre OO, et fixé au couvercle de l'horloge. Dans une mortaise pratiquée dans la pièce carrée, peut glisser l'arc de déclinaison *dd'*, que l'on peut arrêter dans une position déterminée, au moyen d'une

vis de pression représentée à part en D. Le plan de cet arc doit toujours contenir le centre du soleil; ce que l'on obtient en mettant l'aiguille de la pièce carrée k sur l'heure vraie. L'arc dd' porte une tige normale d' , pouvant tourner sur elle-même, et terminée par une fourchette qui s'articule en oo' au miroir MM. On donne à cette tige une direction $d'is$ parallèle aux rayons solaires, et pour cela, on fait l'arc $d'k$ égal au complément de la déclinaison. La tige d' , entraînée avec la pièce k par le mouvement de l'horloge, reste parallèle aux rayons incidents. Un autre arc bb peut glisser dans une mortaise, représentée à part en P, pratiquée dans l'épaisseur d'un manchon t qui enveloppe le tube fixe f et l'axe OO . Ce manchon peut tourner autour du tube f , et être arrêté par une pince à vis V, v . L'arc bb porte aussi une tige normale b pouvant tourner sur elle-même, et munie d'une fourchette articulée au miroir en oo' . On donne à cette tige la direction ir que doivent avoir les rayons réfléchis, en faisant glisser l'arc bb dans sa mortaise, et tourner le manchon t sur lui-même.

Soit maintenant iN une normale au miroir; pour que le rayon réfléchi soit toujours dirigé suivant bir , il faudra que cette normale divise constamment en deux parties égales l'angle sir , ou celui que font entre elles les deux tiges b et d' , pendant le mouvement de l'horloge. Pour remplir cette condition, les fourchettes que portent ces tiges sont articulées aux extrémités d'un même axe, oo' , situé dans le plan du miroir. Deux leviers égaux $\gamma x, \gamma \beta$ sont articulés en γ , et en deux points x et β , également éloignés du point o . En γ est un mentonnet qui glisse dans une coulisse d'une pièce ox fixée normalement au plan du miroir. Les leviers $\gamma x, \gamma \beta$ forcent cette pièce à toujours diviser l'angle βox des plans des deux fourchettes, et par conséquent, l'angle sir , en deux parties égales. Donc, pendant que la pièce carrée k tourne avec l'horloge, de manière que la tige d' reste toujours parallèle aux rayons, si , du soleil, les fourchettes tournent sur les tiges b, d' qui les supportent, les articulations o, x, γ, β se prêtant à ces mouvements, et la tige b restant fixe avec le manchon qui porte l'arc bb , le rayon réfléchi dirigé suivant le prolongement de cette tige, ne change pas de direction.

Au lieu de disposer l'arc dd' d'après la déclinaison du soleil, on peut se servir de la mire n et du petit écran m , placés de manière que mn soit parallèle à la tige d' ; on fait en sorte que les rayons solaires passant par la mire, tombent au milieu de l'écran m . On peut ainsi installer l'instrument en ne connaissant que deux des trois données : latitude, déclinaison et heure vraie.

L'héliostat de Silbermann présente cet inconvénient que le système articulé $ox\gamma\beta$ jouant avec une extrême lenteur, le moindre jeu dans les articulations fait que le miroir éprouve, de temps en temps, des mouvements brusques. On y a remédié, en partie, en plaçant le système $ox\gamma\beta$ au-dessus du miroir, ce qui permet de lui donner de plus grandes dimensions.

2455. Héliostat de L. Foucault. — Cet appareil, remarquable par sa stabilité, est représenté (fig. 1712) tel qu'on le construit pour le cas des rayons réfléchis horizontaux. L'horloge H, inclinée suivant la latitude du lieu, fait faire

un tour en 24 heures à l'arbre Oa qui porte le cercle de déclinaison d . Un miroir $M'M$ peut tourner autour de l'axe $o'o$ parallèle à son plan et porté par la fourchette F , mobile autour d'un axe vertical Fc' . Le miroir porte une queue perpendiculaire qui peut tourner sur elle-même et glisser dans une douille f articulée à l'extrémité d'une tige diamétrale Of . Quand l'horloge est à l'heure vraie, la tige Of a constamment la direction des rayons solaires, qui sont réfléchis par le miroir MM' .

La longueur Of a été prise égale à Oc ; il en résulte que le triangle Ocf restant toujours isocèle, l'angle en f , qui est égal à l'angle d'incidence, est aussi égal à Ocf et à son opposé par le sommet oc ; de sorte que cr , prolongement de Oc , sera le rayon réfléchi et conservera une direction constante. — Pour qu'on puisse donner à ce rayon réfléchi la direction horizontale que l'on voudra, la colonne Fc' a été fixée à un bras Cc' qui tourne autour de l'axe vertical OC , quand on agit sur un pignon qui engrène la roue dentée fixe A .

L'héliostat de Foucault est souvent employé par les photographes; comme le miroir doit être alors de grandes dimensions, l'arbre tournant est porté par un support spécial indépendant de l'horloge, dont il reçoit le mouvement au moyen d'une roue dentée, comme dans l'appareil (fig. 1707).

Nous terminerons par une remarque qui s'applique à tous les héliostats. La chaleur du soleil altérant sensiblement la régularité du mouvement d'horlogerie, il faut le préserver des rayons solaires, par des écrans. Du reste, on pourrait placer l'horloge dans la chambre obscure et la faire communiquer avec les pièces mobiles, au moyen d'un arbre tournant traversant le volet; mais l'appareil serait plus compliqué.

2456. Sidérostat. — L'héliostat a été appliqué aux observations astronomiques, pour renvoyer constamment dans une lunette couchée sur un support fixe, les rayons du soleil ou d'autres astres, pendant leur mouvement autour de l'axe du monde. Avec cette disposition, plus de pied parallactique lourd et dispendieux pour faire suivre l'astre par la lunette, plus de vaste dôme mobile dans lequel elle puisse se mouvoir librement, plus de trépidations, de flexions à craindre, et enfin facilité d'installer à poste fixe devant l'oculaire, des appareils pour la photographie ou pour l'étude des propriétés de la lumière émise par les astres. L'idée d'employer ainsi la réflexion sur un miroir plan est assez ancienne, et a été réalisée avant l'invention de l'héliostat; plus tard, en 1845, MM. Fizeau

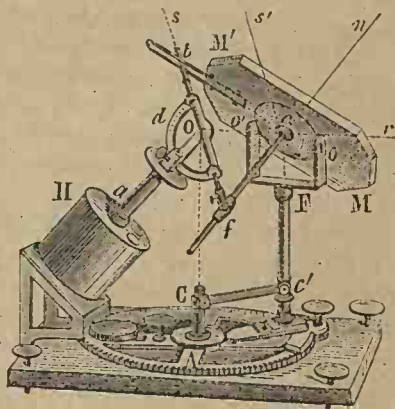


Fig. 1712.

et Foucault ont employé ce dernier instrument pour obtenir la photographie de l'image du soleil formée par une lunette. Mais ces faits étaient à peu près oubliés, lorsque M. Laussedat, étant à Batna, en Algérie, pour l'observation de l'éclipse totale de soleil, en 1860, songea à employer un héliostat de Silbermann pour rejeter les rayons solaires dans la lunette placée horizontalement. Il put ainsi, avec le concours de M. Girard, prendre la photographie des phases successives de l'éclipse. Les mêmes observateurs appliquèrent la même méthode, à Salerne, au sud de l'Italie, pour photographier les phases de l'éclipse annulaire de 1867. Plus tard, M. Laussedat proposa d'employer l'héliostat dans l'observation du passage de Vénus sur le soleil, en 1874 (2406). Il montra aussi, dans un mémoire étendu, comment un appareil installé à demeure dans un observatoire pourrait servir aux observations de position, en même temps qu'à l'étude suivie des propriétés de la lumière émise par les astres, et il donna le nom de *lunette horizontale* à l'ensemble de la lunette et de l'héliostat annexé.

Mais, pour obtenir de bons résultats, il fallait avoir un héliostat à mouvement très-régulier et à miroir parfaitement plan, car il ne s'agit pas seulement d'envoyer un rayon solaire dans une direction choisie pour éclairer des appareils, mais de conserver aux rayons réfléchis leurs directions relatives, pour obtenir une image nette de l'astre. L. Foucault est parvenu à remplir complètement ces deux conditions par l'invention de son régulateur à force centrifuge, et par la création d'une méthode, sur laquelle nous reviendrons, pour dresser la surface des miroirs de verre par des retouches successives. Il se proposait d'employer son héliostat, modifié et approprié à ce nouvel usage spécial, et lui avait donné le nom de *sidérost*, lorsqu'il fut malheureusement enlevé à la science. Peu de temps après un sidérost suivant les idées de Foucault, et destiné à une lunette de 20^{cm} d'ouverture, put être construit par M. Eichens, sur les indications de M. C. Wolf, et fut présenté à l'Académie des sciences de Paris, en décembre 1869¹. L'arbre tournant est soutenu à part au-dessus du mouvement d'horlogerie à régulateur centrifuge, et l'arc de déclinaison, avec sa tige diamétrale qui entraîne le miroir, est fixé à la partie inférieure de cet arbre, afin qu'on puisse tourner le miroir vers la partie sud du ciel, où l'on observe le plus fréquemment. Le miroir est soutenu entre deux forts montants verticaux portés par un disque tournant sur lui-même en roulant sur une couronne de galets. La surface de ce miroir, en verre épais, a été dressée par M. A. Martin, dépositaire des méthodes de Foucault, puis argentée par les procédés chimiques de M. Drayton, au moyen desquels on obtient une couche d'argent très-mince, qui ne peut altérer la forme de la surface du miroir, et qui peut réfléchir jusqu'à 0,94 de la lumière incidente.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXIX, p. 1222; et t. LXXIX, p. 455.

§ 3. — RÉFLEXION SUR LES SURFACES COURBES — MIROIRS SPHÉRIQUES

I. Disposition des rayons réfléchis par les miroirs courbes.

2457. Catacaustiques. — Quand des rayons partant d'un point lumineux s (fig. 1713) se réfléchissent sur une surface courbe, mm , on peut toujours tracer sur cette surface un premier système de courbes, dites *lignes de réflexion*, telles que les rayons infiniment voisins réfléchis sur une de ces courbes, Aa , Cc , Ee , Nn, se rencontrent deux à deux, eux ou leurs prolongements. Ces rayons forment ainsi une *surface développable*, c'est-à-dire qui peut s'étendre dans un plan sans se déchirer et sans faire de plis, composée de petits éléments triangulaires infiniment étroits ACa , CEc , ENE; et la courbe $acen$, formée par les intersections des rayons réfléchis deux à deux, est l'*arête de rebroussement* de cette surface. Toutes les courbes du système donnant ainsi une surface développable et une arête de rebroussement, l'ensemble de toutes les arêtes forme une surface, en chaque point de laquelle il se croise au moins deux rayons réfléchis; on la nomme *surface caustique par réflexion*, ou *catacaustique*. Quand ce sont les rayons mêmes qui se croisent, et non leurs prolongements, la caustique est dite *réelle*, et chacun de ses points reçoit plus de lumière que l'espace environnant.

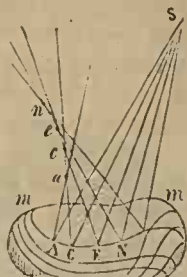


Fig. 1713.

Ces résultats se démontrent par l'analyse mathématique. On démontre aussi qu'il existe un second système de *lignes de réflexion* qui coupent normalement celles du premier système, et qui jouissent des mêmes propriétés; de sorte que les rayons réfléchis forment deux *catacaustiques*.

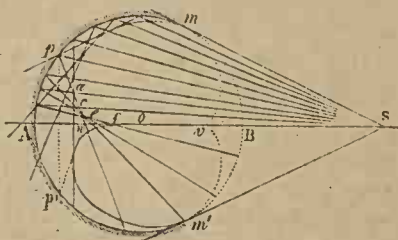


Fig. 1714.

Lignes focales. Foyers. — Les intersections des deux caustiques se nomment *lignes focales* ou *foyers*, suivant qu'elles forment des lignes ou des points. En chaque point d'une ligne focale il passe au moins 4 rayons réfléchis.

2458. Cas des miroirs sphériques. — Appliquons les principes qui précèdent au cas d'un miroir sphérique mAm' (fig. 1714), dont le centre est en o . Le diamètre AB passant par le point lumineux S , se nomme l'axe du miroir relatif au point S . Dans ce cas, le premier système de courbes est formé

par les circonférences perpendiculaires à l'axe SA. Les rayons réfléchis sur une de ces circonférences, pp' , vont tous évidemment se rencontrer en un même point n de l'axe, autour duquel tout est symétrique. La surface développable qu'ils forment est alors un cône, dont l'arête de rebroussement, réduite à un point, est le sommet n ; et la surface caustique formée par l'ensemble des arêtes de tous les cônes, se réduit ici à une droite, portion de l'axe AS.

Le second système de courbes est formé par les grands cercles passant par l'axe. Les rayons réfléchis sur un de ces cercles étant tous dans le plan même de ce cercle, la surface développable qu'ils forment est un plan, et leurs intersections deux à deux, forment une courbe plane $acef$, qui représente l'arête de rebroussement. Pour obtenir la surface caustique correspondante à ce second système de courbes, il suffit de faire tourner la courbe $acef$ autour de l'axe AS. Cette surface présente près de l'axe, la forme d'un pavillon de cor, et le point f où elle rencontre la caustique de l'autre système de courbes, c'est-à-dire l'axe, est un foyer.



Fig. 1715.

2459. Cas des miroirs de révolution. — Ce qui précède s'applique à une surface de révolution quelconque, dont l'axe de révolution passerait par le point lumineux; les deux systèmes de courbes sont alors formés par les parallèles et par les méridiennes. La forme de la surface caustique de révolution du second système dépend de la figure de la méridienne.

Les surfaces caustiques ont été trouvées par Tschirnhausen, en 1682. Barrow avait été bien près de les découvrir, car il considère le concours des rayons réfléchis; mais il n'eut pas l'idée d'examiner la courbe formée par leurs intersections deux à deux. On peut montrer la surface caustique d'un grand miroir sphérique exposé au soleil, en plaçant un écran suivant l'axe de cette caustique, dont l'intersection avec l'écran se distingue par un éclat plus vif. — On peut encore employer un miroir cylindrique (fig. 1715) posé sur une table et recevant, du côté concave, la lumière d'une bougie: l'intersection de la caustique avec la table se distingue par son éclat. On peut faire cette expérience avec une simple feuille de fer-blanc, ou se servir de l'intérieur d'un vase cylindrique verni.

2460. Construction de la génératrice de la caustique d'un miroir sphérique. — Petit a donné un moyen de construire cette génératrice par points, en cherchant les distances de ces points aux points d'incidence. Soit S (fig. 1716) le point lumineux, et o le centre du miroir sphérique mm , que nous supposons concave. Considérons un rayon incident Si , dont la position est déterminée par la distance $p = Si$, et représentons par $4a$ la corde bi . Le rayon réfléchi ir s'obtient en menant la normale in , et prenant l'arc nr égal à nb . Soit Si' un second rayon incident infiniment voisin du premier. Le point R , où le rayon réfléchi $i'r'$ coupe le rayon réfléchi ir , est un point de la courbe cherchée; et il s'agit de trouver la distance Ri en fonction de p et de a .

Pour cela, calculons les variations des angles d'incidence et de réflexion quand le rayon vient de Si en Si' , et écrivons que ces changements sont égaux. Or, les angles d'incidence \sin , $Si'n'$ ont pour mesure $\frac{1}{2}nb$ et $\frac{1}{2}n'b'$. Leur différence a donc pour mesure $\frac{1}{2}(nb - n'b') = \frac{1}{2}(bb' + nn')$. De même, la différence entre les angles de réflexion est égale à

$$\frac{1}{2}(nr - n'r') = \frac{1}{2}(rr' - nn').$$

Égalant les deux différences, il vient :

$$rr' - nn' = bb' + nn',$$

ou $rr' - bb' = 2i'i'$ [1],

en remarquant que $i'i'$ est égal à nn' .

— Il reste à évaluer rr' et bb' en fonction de p et de a . L'angle iSi'

étant infiniment petit, les triangles Sbb' , Sii' sont semblables, et l'on a $\overline{bb'} : i'i' = \overline{Sb} : Si = (p - 4a) : p$. Les triangles iRi' , iRr' donnent de même, en désignant par p' la distance cherchée Ri ,

$$\overline{rr'} : i'i' = rR : Ri = (4a - p') : p',$$

en remarquant que l'on a $\overline{ir} = \overline{ib} = 4a$. Portant dans l'égalité [1], les valeurs de bb' et rr' , $i'i'$ disparaît et il vient

$$\frac{4a - p'}{p'} - \frac{p - 4a}{p} = 2; \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{1}{a}, \quad [2]$$

en réduisant au même dénominateur et divisant partout par $4pp'a$. On tire de là p' ou Ri , pour chaque rayon incident, ou pour chaque valeur de p et de a .

Si le miroir est convexe, le point R se trouve sur le prolongement des rayons réfléchis, et p' et $4a$, étant comptés du côté opposé du miroir par rapport à p , doivent être pris négativement; la formule est alors $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{a}$, qu'on peut trouver directement.

2461. Formes de la méridienne de la caustique. — Quand on construit cette méridienne par points, on lui trouve des formes différentes suivant la position du point lumineux.

1° Cas des rayons parallèles. — Si les rayons incidents sont parallèles, on a $p = \infty$, et la formule [2] donne alors $p' = a$, ou le quart de la corde interceptée sur le rayon incident. Tschirnhausen et Lahire ont trouvé que, dans ce cas, la génératrice de la caustique est une épicycloïde engendrée par un point d'une circonférence ami (fig. 1717), ayant un rayon égal au quart de celui du miroir, et roulant sur une circonférence concentrique, d'un rayon ao moitié

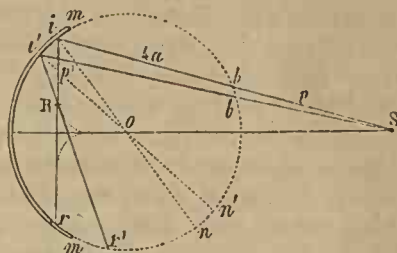


Fig. 1716.

le prolongement du rayon réfléchi $n'l'$. — A mesure que le point lumineux s s'approche du point c , milieu du rayon Bo de la sphère, les branches t, t' se rapprochent de l'axe, ainsi que le point r , et la partie virtuelle avv' s'éloigne de B.

4° Quand le point s arrive au milieu c du rayon (fig. 1719), les branches t, t' deviennent asymptotes à l'axe BA , de sorte qu'on peut dire que les rayons réfléchis très-près de l'extrémité B de l'axe la plus rapprochée du point lumineux, sont parallèles à cet axe. Le sommet e de la caustique correspond aux rayons réfléchis près du point opposé A.

5° Si le point lumineux s se trouve entre le milieu c du rayon et le centre o (fig. 1720), les branches t, t' se resserrent et se rencontrent sur l'axe, en formant un second sommet réel a correspondant aux rayons réfléchis près du point B, et la courbe méridienne est entièrement fermée. Les points de rebroussement, r , ainsi que les sommets e et a , se rapprochent du centre o en même temps que s , et la courbe se rapetisse et finit par se confondre avec les points o

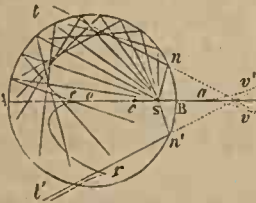


Fig. 1718.

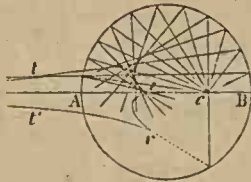


Fig. 1719.

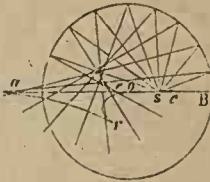


Fig. 1720.

et s , quand ce dernier arrive au centre. Ce résultat pouvait être prévu, car les rayons incidents étant alors tous normaux à la surface sphérique, les rayons réfléchis se croisent au centre.

Remarquons enfin, en général, que la caustique, réelle ou virtuelle, a toujours au moins un sommet, et que ce sommet est tourné vers le centre, quand il est formé par les rayons réfléchis près de l'extrémité de l'axe située du même côté que lui par rapport au centre; comme en e (fig. 1718, 1719, 1720), et en f et v (fig. 1714).

II. Propriétés des miroirs sphériques à petite ouverture.

2462. Définitions. — Un miroir sphérique est ordinairement limité par un contour circulaire. On nomme alors *axe principal*, une droite passant par le centre de figure et par le centre de la sphère dont ce miroir fait partie; et *axe secondaire*, ou simplement *axe* par rapport à un point lumineux, la droite qui passe par ce point et par le centre de la sphère. Un plan mené par l'axe principal, coupe le miroir suivant un arc de cercle, et le nombre de degrés contenus dans

cet arc, ou l'angle au centre auquel il sert de mesure, se nomme l'ouverture du miroir.

2463. Propriétés des miroirs à ouverture infiniment petite. — Quand des rayons lumineux, partant d'un point, tombent sur un miroir sphérique infiniment petit par rapport à son rayon de courbure, les rayons réfléchis se croisent en un même point nommé *foyer*, situé sur l'axe du point lumineux. — Pour le démontrer, on peut employer la méthode que nous avons suivie en parlant de la réflexion de la chaleur (II, 857), ou bien la suivante.

Soit *mn* (fig. 1721) le miroir, que nous supposons convexe pour fixer les idées, *s* le point lumineux, et *sn* un

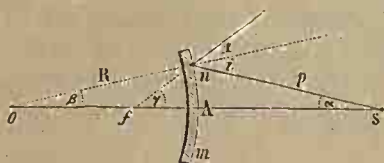


Fig. 1721

rayon incident donnant un rayon réfléchi, qui, prolongé, vient couper l'axe en *f*. Comme l'arc *An* est infiniment petit, posons $sn = s\lambda = p$, et $fn = f\lambda = p'$, et il s'agit de trouver la valeur de p' . Le triangle *onf* donne $\gamma = \beta + r$; et le triangle *ons*, *i*, ou $r = \beta + \alpha$. Ajoutant ces

deux égalités pour éliminer *r*, il vient $\gamma - \alpha = 2\beta$. Or, les angles α, β, γ , étant infiniment petits, ainsi que l'arc *An*, on peut les prendre pour leur tangente trigonométrique, et écrire

$$\gamma = \frac{\Delta n}{f\lambda} = \frac{\Delta n}{p'}, \quad \alpha = \frac{\Delta n}{\Lambda s} = \frac{\Delta n}{p}, \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\Delta n}{\Lambda o} = \frac{\Delta n}{R}.$$

Substituant dans l'équation $\gamma - \alpha = 2\beta$, elle devient, en posant $R = 2a$:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{2}{R} = -\frac{1}{a}. \quad \text{On trouverait} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}, \quad [1]$$

si le miroir était concave. Le signe (—) indique que les longueurs *a* et p' qui en sont affectées, sont comptées du côté opposé du miroir par rapport à *p* qui est positif. Ces longueurs sont positives quand il s'agit d'un miroir concave.

Foyers conjugués. — La formule [1] coïncide avec celle du n° 2460; elle montre que la valeur de p' reste la même, quel que soit le rayon incident considéré, puisque cette valeur ne dépend que de *a*, ou $\frac{1}{2}R$, et de *p*. Tous les rayons réfléchis iront donc couper l'axe *sAo* au point *f*, qui sera le *foyer* du point *s*. — Il résulte des lois de la réflexion que, si le point lumineux était en *f*, le point *s* en serait le foyer; c'est pourquoi les points *s* et *f* s'appellent collectivement *foyers conjugués*.

Foyer principal. — Dans le cas de rayons parallèles entre eux, on a $p = \infty$ et $p' = a$; le foyer est donc au milieu du rayon de courbure. On peut, du reste, démontrer directement ce résultat, comme nous l'avons fait en parlant de la réflexion de la chaleur (II, 857). Le foyer des rayons parallèles se nomme *foyer principal*.

Ce qui précède s'applique à un miroir quelconque de révolution infiniment petit, dont sA serait l'axe de révolution; car au sommet A , sa surface se confond, avec la surface de sa sphère osculatrice.

246-1. Aberration de sphéricité. — Quand l'ouverture du miroir sphérique n'est pas infiniment petite, mais seulement très-petite, les rayons ne se rencontrent pas exactement au même point, mais ils se croisent dans un espace très-petit, et forment la partie, voisine du sommet, de la caustique de révolution (2460). Ce phénomène constitue l'aberration de sphéricité ou de courbure, et est d'autant plus prononcé, que l'ouverture du miroir est plus grande.

Dans ce cas, les rayons réfléchis coupent l'axe d'autant plus près du miroir que le point d'incidence est plus éloigné de cet axe. Pour le prouver, considérons le rayon incident sn (fig. 1722). Le rayon réfléchi nf coupe

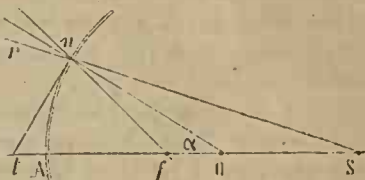


Fig. 1722.

l'axe en f , et nous allons chercher la distance fO en fonction de l'angle que fait le rayon réfléchi avec l'axe AOs . Posons $sA = p$, $fA = p'$, $fO = c$ et $OA = R$, et menons la tangente nt au point d'incidence. Cette tangente divisant l'angle nsf en deux parties égales; et la normale On divisant de même l'angle snf , on a

$$\frac{nf}{ns} = \frac{tf}{ts}, \quad \text{et} \quad \frac{nf}{ns} = \frac{fO}{Os}; \quad \text{d'où} \quad \frac{tf}{ts} = \frac{fO}{Os}; \quad [1]$$

on a aussi $tf = tO - fO = tO - c$, $Os = p - R$, $ts = tO + p - R$,

$$\text{et} \quad tO = \frac{nO}{\cos \alpha} = \frac{R}{\cos \alpha}; \quad \text{remplaçant dans [1], on en tire}$$

$$c = \frac{R(p - R)}{R + 2 \cos \alpha (p - R)}, \quad [2]$$

formule qui montre que c ou Of augmente quand α augmente jusqu'à 90° . Les rayons réfléchis coupent donc l'axe en des points d'autant plus rapprochés de A que les rayons incidents s'écartent davantage de l'axe.

Si les rayons étaient parallèles, on aurait $p = \infty$, et $c = \frac{R}{2 \cos \alpha}$ résultat facile à trouver directement.

Si l'on suppose l'ouverture infiniment petite, α est infiniment petit, $\cos \alpha$ est égal à 1, et en remplaçant c par $R - p'$ et divisant finalement par $pp'R$ on retrouve la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{R}$.

2465. Discussion. — Revenons au cas où l'aberration est négligeable.

La formule [1] $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$, donne $p' = \frac{pa}{p-a}$, ou $p' = a : \left(1 - \frac{a}{p}\right)$ [2]

Supposons d'abord que les rayons incidents soient parallèles, il faudra faire p infini, et l'on aura $p' = a = \frac{1}{2} R$, et les rayons réfléchis se croisent au foyer principal F , situé au milieu du rayon Ao (fig. 1723). Si le point lumineux s se rapproche, p diminue, $a : p$ augmente, et le dénominateur de la valeur de p' diminuant, p' augmente; le point lumineux et son foyer marchent donc l'un vers l'autre. — Quand $p = 2a$, le point lumineux est au centre du miroir, et l'on trouve $p' = 2a$; le foyer est donc aussi au centre. Si le point lumineux s'approche encore du miroir, p' augmentant toujours, le foyer passe au-delà du centre; et quand on a $p = a$, c'est-à-dire quand le point lumineux arrive en F , p' devient infini, et les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe du miroir.

Si le point lumineux se rapproche encore, et vient en σ , $a : p$ devient plus grand que 1, et p' est négatif; le foyer se trouve alors en φ derrière le

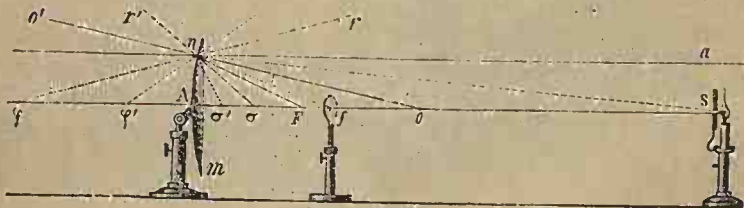


Fig. 1723.

miroir, et il est formé par le prolongement des rayons réfléchis; ce foyer est *virtuel* ou *imaginaire*. On voit que la valeur absolue de p' diminue avec celle de p , en écrivant [2] sous la forme $p' = -a : \left(1 - \frac{a}{p}\right)$. — Si les rayons incidents convergent vers un point de l'axe, ce qui s'exprime en prenant p négatif, p' est positif et d'autant plus grand que p est plus grand en valeur absolue, c'est-à-dire que les rayons sont moins convergents. Quand p est nul, il en est de même de p' ; le point lumineux et le foyer virtuel se confondent donc en A .

Tous ces résultats peuvent se voir sur la figure : le point lumineux venant de l'infini et se rapprochant du centre, l'angle d'incidence diminue; le rayon réfléchi se rapproche donc de la normale, et le point f s'avance vers le centre. En o , les deux rayons incident et réfléchi se confondent. Le point lumineux dépassant le centre, le rayon incident vient au-dessous de la normale; le rayon réfléchi passe donc au-dessus, et si le point lumineux est en f , son foyer conjugué est en s . Quand le point lumineux vient en F , les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe, et, si ce point vient en σ , l'angle d'incidence est plus grand que Fno ; l'angle de réflexion doit donc être plus grand que ona , et le rayon réfléchi nr ne pourra couper l'axe qu'en φ , sur son prolongement, et d'autant plus près du miroir que le point σ en sera lui-même plus rapproché.

On voit que, dans le *miroir concave*, le foyer, réel ou non, peut occuper tous les points de l'axe, excepté ceux qui sont entre le foyer principal et le miroir, à moins que les rayons incidents ne soient convergents.

On peut vérifier la plupart de ces résultats au moyen d'une bougie cachée par un carton, *s*, percé d'un petit trou qui représente le point lumineux; on cherche sur un écran de papier, *f*, la position du foyer, quand il est réel.

Cas du miroir convexe. — Pour que la formule réponde au miroir convexe, il faut faire *R*, ou *a*, négatifs. Alors la valeur de *p'* devient $p' = \frac{-ap}{a+p}$. Cette valeur étant toujours négative pour *p* positif, le foyer sera toujours virtuel. Si l'on a $p = \infty$, il vient $p' = -a$; puis, *p* diminuant, *p'* diminue aussi, et devient nul en même temps que *p*.

Ces résultats peuvent se trouver par la géométrie : supposons que le miroir *mn* (fig. 1723) soit poli sur la face convexe, et que *z* soit le point lumineux, un rayon incident *zn* se réfléchira suivant *nr'* et ne pourra rencontrer l'axe que sur son prolongement, en *σ*. On voit aussi que le foyer, toujours virtuel, ne peut se former que dans l'espace *AF*, quand les rayons incidents sont divergents.

Si les rayons sont convergents, *p* est négatif, ainsi que *p'*, qui devient infini quand la valeur absolue de *p* est égale à *a*. Si *p* continue d'augmenter, *p'* est positif et va en diminuant. Le foyer est alors réel.

— Ces résultats se voient facilement par la géométrie, et peuvent se vérifier par l'expérience au moyen de rayons convergents formés par un miroir concave.

Si le miroir était plan, on aurait $R = \infty$ et $a = \infty$, et la formule donnerait $p' = -p$. Le foyer est donc virtuel et situé derrière le miroir à distance égale et sur la perpendiculaire à sa surface, comme nous l'avons déjà vu (2432).

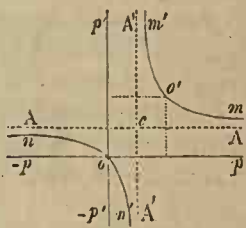


Fig. 1724.

2466. Déplacements relatifs des foyers conjugués. — L'expérience montre que *p'* augmente très-lentement quand *p*, d'abord très-grand, diminue rapidement; puis *p'* augmente très-rapidement pour de petites variations de *p* quand le point *s* a dépassé le centre. Pour nous rendre compte de ces variations relatives, construisons la courbe que représente la formule [1], en prenant pour abscisses les valeurs de *p*, et pour ordonnées celles de *p'*. La formule revient à l'équation $pp' = ap + ap'$, qui représente une hyperbole équilatère *mm'*, *nn'* (fig. 1724) passant par l'origine, et dont les asymptotes *AA*, *A'A'*, parallèles aux axes des coordonnées, sont à des distances de ces axes égales à *a*, car *p* ou *p'* sont égaux à *a* quand *p'* ou *p* sont infinis. Le sommet *o'* de l'hyperbole correspond aux valeurs $p = 2a$, $p' = 2a$. La branche *m'm* représente les valeurs de *p'*, quand celles de *p* diminuent, de $p = \infty$ à $p = a$. Si *p* est moindre que *a*, *p'* devient négatif, et ses valeurs sont représentées par la partie *on'* de

la seconde branche. Si p est négatif, p' est positif, et ses valeurs correspondent à la portion on de courbe.

Dans le cas du miroir convexe, il faut, dans l'équation $pp' = ap + ap'$, faire p négatif, tout en laissant à a sa valeur positive, pour exprimer que, le point lumineux passant derrière le miroir concave, ses rayons se réfléchissent sur la partie convexe. Alors l'équation représente la portion on (fig. 1724) de la branche

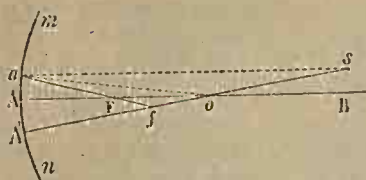


Fig. 1725.

inférieure de l'hyperbole; p' est positif et augmente avec la valeur absolue de p , jusqu'au maximum $p' = a$ qui correspond à $p = \infty$. — Si les rayons vont frapper la surface convexe en convergent, il faut changer le signe de p , qui alors devient positif, et les valeurs négatives de p' sont représentées par la portion on' , tant que l'on a $p < a$, et par la branche mm quand on a $p > a$.

2167. Point lumineux hors de l'axe principal. — Ce qui précède s'applique à un point s situé hors de l'axe principal AB (fig. 1725), quand on remplace ce dernier par la droite so passant par le point lumineux et par le centre. Cette droite, nommée l'axe secondaire correspondant au point s , jouit des mêmes propriétés que l'axe principal; il y a donc un foyer conjugué f , et l'aberration est négligeable quand l'angle soB est suffisamment petit. La distance p' du foyer f au miroir est toujours donnée par la formule [1].

On peut trouver facilement ce foyer sans employer la formule et sans construire un angle égal à un autre angle. Il n'y a qu'à mener par le point o un axe Ao différent de $A's$, et par le point s un rayon incident sa parallèle à ce nouvel axe Ao . Le rayon réfléchi doit couper l'axe Ao , auquel il est parallèle, au milieu du rayon Ao , c'est-à-dire au foyer principal. En joignant donc le point

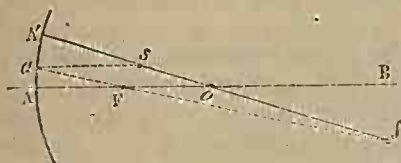


Fig. 1726.

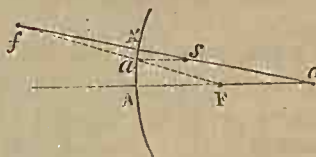


Fig. 1727.

d'incidence A au point F , on aura le rayon réfléchi; et son intersection, f , avec l'axe $A'o$ sera le foyer conjugué du point s sur son axe secondaire soA' . — Quand le point s est placé en dehors de l'axe principal, on prend ordinairement ce dernier pour axe auxiliaire.

Quand le point lumineux est situé entre le centre et le miroir, le foyer peut être réel ou virtuel, et la construction, comme la formule, fait connaître ce qu'il en est. Supposons d'abord le point s (fig. 1726) placé plus loin du miroir que le

foyer principal F . Le rayon réfléchi aF , produit par le rayon incident sa parallèle à oA , forme un des côtés d'un trapèze $aFos$, dans lequel le côté as est plus grand que Fo , puisque $OF = AF$, et que le point s a été supposé plus éloigné du miroir que le foyer F . Ce rayon aF prolongé coupera donc l'axe so en f au-delà du point o . — Si le point s (*fig. 1727*) était plus rapproché du miroir que le foyer principal, le côté sa du trapèze serait moindre que Fo , le rayon réfléchi prolongé ne pourrait rencontrer l'axe so que derrière le miroir, en f , et le foyer serait virtuel. — Si le point s était à la même distance du miroir que le point F , le trapèze serait remplacé par un parallélogramme, et le rayon réfléchi serait parallèle à l'axe so .

2168. Mesure du rayon des miroirs sphériques. — Quand on veut appliquer la formule des miroirs, il faut connaître leur rayon de courbure. Dans le cas d'un miroir concave, il n'y a qu'à le présenter aux rayons solaires, qui peuvent être considérés comme parallèles, et à chercher, avec un petit écran, la position du foyer principal, où se croisent les rayons réfléchis. La plus courte

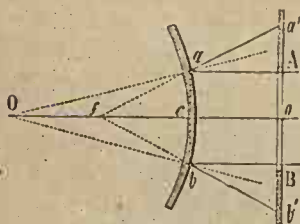


Fig. 1728.

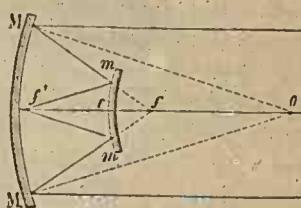


Fig. 1729.

distance de ce point au miroir est égale à la moitié du rayon. — On peut encore employer une bougie, et chercher le point où son image se confond avec elle; ce point est le centre du miroir.

Quand le miroir est convexe, on applique sur sa surface, suivant un grand cercle, une bande de papier noir dans laquelle sont ménagés deux petits trous a, b (*fig. 1728*), qui laissent voir la surface, et sont assez rapprochés pour qu'on puisse regarder l'arc ab comme se confondant avec sa corde. On expose ce miroir aux rayons solaires, en plaçant au devant, un écran $a'b'$ parallèle à la corde ab , et percé d'une large ouverture AB . Les deux pinceaux réfléchis en a et b viennent illuminer l'écran en a', b' , et l'on mesure au compas, les distances $ab, a'b'$, et Λa . Les prolongements des rayons réfléchis se rencontrent au foyer principal f , et les triangles semblables $fab, fa'b'$, donnent

$$ab : a'b' = fc : fo = fc : fc + \Lambda a;$$

d'où l'on tire fc , qui est la moitié du rayon cherché. — Si l'on éloigne l'écran de manière que $a'b'$ soit double de ab , on a sans calculs, $cf = \Lambda a$.

On peut encore opérer, sans modifier la surface du miroir convexe. On place ce miroir, mm (*fig. 1729*), en présence d'un miroir sphérique concave de plus

grandes dimensions, MM, dont on connaît le rayon, de manière que les axes principaux se confondent et que les surfaces réfléchissantes soient en regard. On fait ensuite tomber les rayons solaires sur le miroir concave, parallèlement à l'axe commun. Ces rayons, réfléchis une seconde fois par le miroir mm ; font un foyer réel en f' , à une distance cf' que l'on mesure. En appliquant la formule des miroirs, aux rayons convergents qui tombent sur mm ; on a $\frac{1}{cf} - \frac{1}{cf'} = \frac{2}{r}$; équation dans laquelle il n'y a que r d'inconnu, cf étant égal à la distance focale du miroir MM, diminuée de la distance des deux miroirs.

2469. Images projetées par les miroirs sphériques concaves. — Considérons un objet ab (fig. 1730) placé au-delà du foyer principal du miroir sphérique concave mm' , supposé très-petit par rapport à son rayon; tous les rayons lumineux partant du point a , et tombant sur le miroir près de l'axe aOe , iront, après la réflexion, se croiser au point a' , foyer conjugué du point a . Le

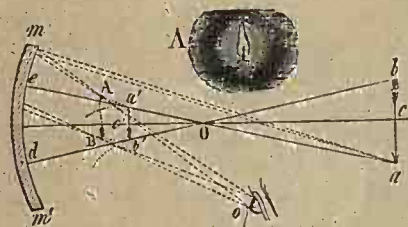


Fig. 1730.

point b ira de même faire son foyer en b' sur son axe bOd , le point c en c' sur l'axe cO , et ainsi des autres points de l'objet ab . Si donc on place en $a'b'$ un écran blanc, chaque foyer illuminera un point de l'écran; ce point renverra cette lumière d'une manière diffuse en la faisant diverger, et l'on verra sur cet écran une image de l'objet ab avec la couleur et l'éclat relatif de

ses différents points. Cette image est évidemment *renversée*; elle est située entre le foyer principal et le centre, quand l'objet est au-delà de ce dernier point, et au-delà du centre quand l'objet est entre le foyer principal et le centre. L'expérience se fait facilement au moyen d'une bougie. La position de l'image peut s'obtenir au moyen de la formule [1] (2465). On peut aussi la trouver en construisant les foyers conjugués des points extrêmes a et b , par la méthode décrite plus haut (2467). On voit facilement ainsi que, si l'objet est entre le foyer principal et le miroir, l'image est *virtuelle*; elle n'existe donc pas physiquement et ne peut être projetée sur un écran. — Il en est toujours ainsi quand le miroir est convexe.

2470. Grandeur de l'image. — La grandeur de l'image réelle ne dépend que du rayon de courbure du miroir, et de la distance de l'objet. Soit D et D' les hauteurs de l'objet et de son image, p , p' leurs distances au miroir, et $2a$ le rayon de courbure. Les triangles semblables aOb , $a'Ob'$ (fig. 1730) donnent

$$\frac{ab}{a'b'} = \frac{Oa}{Oa'}; \quad \text{ou} \quad \frac{D}{D'} = \frac{p - 2a}{2a - p'}; \quad \text{ou} \quad \frac{D}{D'} = \frac{p - a}{a},$$

en remplaçant p' par sa valeur $p' = ap : (p - a)$. On voit que le rapport $D : D'$

augmente en même temps que p ; par conséquent, D' est d'autant plus petit par rapport à D que l'objet est plus éloigné du miroir. Tant que l'objet est au-delà du centre, on a $p > 2a$, et D' est toujours moindre que D . Si l'objet est au centre, on a $p = 2a$, et $D = D'$. Si p' est entre le centre et le foyer principal, on a $p < 2a$; et D' est plus grand que D , et d'autant plus que p est plus petit. Si p est égal à a , on a $D : D' = 0$; l'image est donc infinie, et située à l'infini. Si, enfin, l'on a $p < a$, le rapport devient négatif; ce qui indique une impossibilité; et, en effet, l'image est alors virtuelle.

Tous ces résultats se vérifient facilement par l'expérience, qui se fait très-commodément avec la flamme d'une bougie, dans une chambre obscure.

2-171. Effets de l'aberration de sphéricité. — Dans ce qui précède, nous avons supposé le miroir très-petit par rapport à son rayon de courbure. S'il n'en était pas ainsi, les rayons tombant sur des points éloignés de l'axe considéré, appartenant à un même cercle normal à cet axe, se croiseraient sur cette ligne en un point plus rapproché du miroir (2164), et jetteraient des rayons divergents sur l'image formée par les rayons réfléchis près de l'axe, ce qui la rendrait moins nette. Pour reconnaître cette influence de l'aberration, on forme l'image d'une bougie au foyer d'un miroir concave à grande ouverture; cette image est entourée d'une auréole lumineuse qui l'empêche de se détacher nettement (A *fig.* 1730). Si alors on applique sur le miroir un écran annulaire, qui intercepte les rayons réfléchis près des bords, l'auréole disparaît, et l'image devient plus nette. Si, au contraire, on intercepte avec un écran circulaire, les rayons qui tombent près de l'axe, l'image devient confuse, et pour l'avoir nette, il faut rapprocher la surface sur laquelle on la reçoit.

2-172. IMAGES VUES DANS LES MIROIRS SPHÉRIQUES. — L'image réelle formée par un objet suffisamment éloigné d'un miroir sphérique concave, peut être vue directement, par un observateur plus éloigné du miroir que l'image. En effet, en chaque point de cette image se croisent des rayons réfléchis, provenant du point correspondant de l'objet, et ces rayons divergents entrant dans l'œil *s'il est convenablement placé*, font voir chacun des points de l'image comme s'il était un centre lumineux; l'image aérienne de l'objet sera donc vue comme si elle était un objet matériel. Les images virtuelles formées dans les miroirs convexes, et dans les miroirs concaves quand l'objet en est plus près que le foyer principal, peuvent aussi être vues, de même que les images virtuelles des miroirs plans. Comme l'ouverture du miroir n'est pas ordinairement assez petite pour qu'il n'y ait pas d'aberration de sphéricité, celle-ci joue un rôle dont nous allons tenir compte en étudiant les divers cas qui peuvent se présenter.

I. Miroirs concaves. — 1° Si l'objet est situé entre le foyer principal et le miroir, l'image vue derrière le miroir, sera grossie et droite (c'est-à-dire non renversée), quelle que soit la distance de l'œil. Soit O (*fig.* 1731) le centre du miroir, et AB l'objet. Considérons à part le point A , et soit AO son axe secondaire. Les rayons émanant de ce point et réfléchis par le miroir, iront former derrière lui une caustique virtuelle dont le sommet sera tourné vers le centre

(2461). Pour obtenir les rayons réfléchis qui entrent dans l'œil, il faudra mener, des différents points de la pupille, des tangentes à la surface caustique, et joindre au point A, les points de rencontre de ces tangentes avec le miroir. On obtient ainsi le faisceau réfléchi AiO. Comme la pupille est très-petite, les points de contact des différents rayons tangents qui entrent dans l'œil se confondent sensiblement en un même point A', où l'on voit l'image du point A. De même, l'image du point B se verra en B'; celle du point C en C', etc.

L'image sera généralement déformée, les points de contact A', C', B'..... n'étant pas à la même distance des sommets des caustiques correspondantes, et l'œil n'occupant pas la même disposition par rapport à chacune d'elles. Remarquons aussi, que ces points de contact dépendant de la position de l'œil, deux observateurs ne verront pas la même image. Si même on est assez près du miroir pour que la distance des deux yeux ne soit pas négligeable, chaque œil

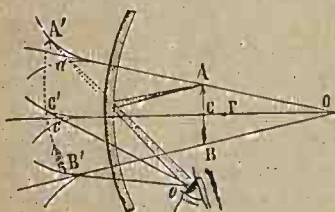


Fig. 1731.

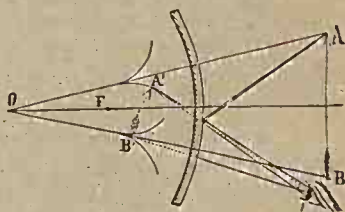


Fig. 1732.

recevra des rayons venant de points de contact différents, et l'on verra deux images. — Tous ces résultats se vérifient par l'expérience.

2° La figure 1730 représente la marche des rayons dans le cas où le point lumineux est au-delà du foyer principal. Pour voir directement l'image réelle, l'œil doit être placé plus loin que l'image, de manière à recevoir des pincesaux divergents. Cette image AB est réelle, en avant du miroir, renversée, et plus petite que l'objet s'il est au-delà du centre, et plus grande s'il est en deçà. On voit qu'elle ne sera pas, en général, à la même place que celle que l'on recevrait sur un écran, en a'b'.

II. Miroirs convexes. — Dans ce cas, l'image est toujours droite et plus petite que l'objet. La figure 1732 représente la construction à faire pour trouver la position de l'image. Comme celle-ci est très-petite, la situation de l'œil n'a qu'une faible influence sur le lieu qu'elle occupe.

Remarque. — Il se présente ici une question sujette à controverse : indépendamment du pinceau tangent en A' (fig. 1731), l'œil reçoit des rayons qui semblent émaner du point a de l'axe, et proviennent de la caustique linéaire formée par les rayons qui se réfléchissent sur les diverses circonférences perpendiculaires à OA (2458). L'œil reçoit donc deux pincesaux coniques dont les axes se confondent, l'un ayant son sommet en A', et l'autre en a, et la question est

de savoir auquel de ces deux points il rapportera la position de l'image du point A. Les uns, avec Newton, admettaient que l'image était vue au milieu de la distance $A'a$, les autres, qu'elle était vue au point a de l'axe. La distance $A'r$ étant très-petite, et la différence entre les degrés de divergence des rayons partis de A' et de a à peine sensibles, il est probable que l'œil rapporte la position de l'image à un point quelconque de la longueur $A'a$.

2473. Applications. — Les anciens connaissaient les miroirs sphériques, et les employaient comme *miroirs ardents* (II, 859). Ils avaient aussi observé les images vues dans les miroirs concaves, et il résulte de plusieurs passages des *Questions naturelles* de Sénèque (liv. I) qu'ils avaient remarqué les images réelles renversées formées en avant du miroir. D'après divers auteurs, on avait installé sur le phare d'Alexandrie de grands miroirs concaves, au moyen desquels on distinguait les navires à 100 lieues de distance, ce qui n'est pas impossible, sauf en ce qui concerne la distance, évidemment exagérée, l'image étant très-brillante, car chacun de ses points est formé par le concours des rayons réfléchis sur toute la surface du miroir.

— Pline nous apprend que les anciens, particulièrement à Sidon, savaient souffler le verre, puis le travailler au tour de manière à en faire des miroirs parfaits. — Ulloa a vu, en Amérique, un grand nombre de miroirs, plans d'un côté et sphériques de l'autre, travaillés

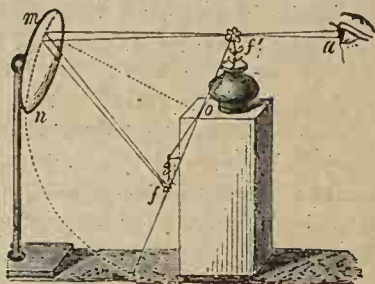


Fig. 1733.

avec une grande perfection par les anciens Péruviens, et faits de deux espèces de pierres très-dures, ou d'un certain alliage.

Aujourd'hui, on fait souvent usage de *miroirs concaves*, sous le nom d'*œil-de-bœuf*, pour voir son image grossie, en se plaçant entre le foyer principal et le miroir. — Porta a perfectionné sa chambre noire (2401) en recevant sur un miroir concave placé dans l'intérieur, les rayons émis par les objets extérieurs et entrant par une large ouverture. En inclinant un peu le miroir, il projetait les images renversées, sur un écran placé au-dessus de l'ouverture, à une distance convenable du miroir ; expérience facile à répéter.

Les paysagistes se servent de miroirs sphériques *convexes* pour obtenir l'image réduite du paysage qui leur sert de modèle. On dispose quelquefois, dans les jardins, des ballons de verre étamés en dedans, nommés *boules périscopiques* ou *panoramiques*, dans lesquelles les objets viennent se peindre sous des dimensions assez petites pour qu'on puisse en saisir l'ensemble. Si l'objet est très-rapproché, son image est singulièrement déformée. Par exemple, si l'on approche le bout des doigts, ils présentent la forme de massues, les points les plus éloignés étant beaucoup plus rapetissés que les autres (2472).

C'est à la lumière du jour réfléchi dans la direction de l'œil, et resserrée en

un mince faisceau, qu'est due cette tache brillante qui se voit sur toute surface convexe bien polie. L'écume, formée de petites bulles creuses, présente une multitude de points brillants qui, étant très-rapprochés, la font paraître blanche. Cependant, quand le liquide est coloré, l'écume participe à sa couleur, certains rayons réfléchis sur des bulles placées au-dessous des autres devant traverser l'enveloppe colorée qui forme celles-ci. Si l'écume est éclairée par de la lumière colorée, elle en présente la couleur.

Bouquet magique. — On fait souvent une expérience curieuse, au moyen de l'image aérienne qui se produit en avant d'un miroir concave (*fig.* 1733), quand l'objet est situé tout près du centre, *o*. On cache en *f* derrière un piédestal une statuette, une fleur, renversée et bien éclairée sur un fond noir. Cet objet vient faire une image réelle en *f'*, pour l'œil placé en *a*, de manière à faire croire à la présence d'un objet matériel. Il faut remarquer que la portion de sphère *mn* étant très-éloignée de l'axe *of*, la distance *f'o* ne peut être donnée par la formule des miroirs. Le point *f'* appartient à la partie *a* de la caustique de la figure 1720 (2461).

III. De quelques miroirs courbés non sphériques.

2174. Miroirs paraboliques. — Quand des rayons lumineux tombent sur la surface d'un miroir parabolique, parallèlement à son axe de révolution, ils donnent des rayons réfléchis, qui se rencontrent tous exactement au foyer géométrique du paraboloïde, quelle que soit la grandeur du miroir. Ce résultat, conséquence directe des propriétés de la parabole, s'explique ici comme dans le cas des rayons de chaleur (II, 855). Si les rayons tombent sur la surface concave du miroir, le foyer est réel; il est virtuel dans le cas contraire. Quand le point lumineux est au foyer du miroir, les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe. Il en serait de même si la surface convexe recevait des rayons convergents ayant leur point de concours au foyer. — On a tiré parti de cette

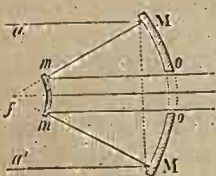


Fig. 1734.

propriété, pour rétrécir un faisceau parallèle, de manière à en augmenter l'intensité. Le faisceau, *aa'* (*fig.* 1734), est d'abord reçu parallèlement à l'axe par un premier miroir parabolique concave *MM*, et vient tomber en convergeant sur la surface convexe d'un second miroir *mm*, dont le foyer *f* coïncide avec celui du premier. Les rayons forment encore un faisceau parallèle, mais plus étroit, qui passe par une ouverture *oo* ménagée au sommet du premier miroir. Des miroirs sphériques donnent le même résultat, à la condition de n'avoir qu'une très-petite ouverture par rapport à leur rayon de courbure. Mais, comme dans la double réflexion il y a une grande perte de lumière, on se sert habituellement de lentilles de verre pour produire le même effet.

Si les miroirs paraboliques sont préférables aux miroirs sphériques quand on veut concentrer des rayons parallèles en un seul point, ils leur sont inférieurs quand il s'agit de rayons divergents. Alors l'aberration se produit, et plus marquée qu'avec les miroirs sphériques, surtout quand le point lumineux n'est pas situé sur l'axe de révolution. Cependant, un objet lumineux peut faire une image nette en avant d'un miroir parabolique, quand il en est très-éloigné et que ses différents points sont très-rapprochés de l'axe.

2175. Phares catoptriques. — L'application la plus importante des miroirs paraboliques est celle qu'en ont faite Teulère et Borda, en 1691, aux phares de réflexion. Une lampe à cheminée, à une ou plusieurs mèches concentriques, est placée au foyer du miroir, dont l'axe est horizontal, de manière que la lumière est réfléchiée en un faisceau cylindrique qui ne perd de son intensité que par l'absorption de l'air. Plusieurs miroirs semblables, disposés autour du même support, éclairent dans plusieurs directions. En faisant tourner le support sur lui-même, on fait parcourir tout l'horizon au faisceau lancé par un même miroir.

Les miroirs paraboliques ont une portée extraordinaire. Biot et Arago ont reconnu qu'un miroir de 0^m,81 d'ouverture lance de la lumière, visible avec une lunette à une distance de 40 lieues. Il est essentiel que tous les points de la flamme soient aussi près que possible du foyer mathématique, ce qui ressort des expériences suivantes, faites par Arago, Charles, et de Rossel. Deux miroirs de 0^m,80 d'ouverture, étaient installés sur la butte Montmartre, et l'un d'eux ayant à son foyer un bec d'Argant de 13^{mm},5 de diamètre brûlant 49 grammes d'huile par heure, se voyait de Montlhéry, à 7 lieues de distance, comme une étoile de première grandeur. L'autre miroir, muni d'un bec de diamètre double et brûlant le double d'huile, produisait beaucoup moins d'effet, et il fallait cacher avec un écran, environ le tiers de la surface du premier miroir, pour que les effets fussent égaux.

Malgré la puissance des miroirs paraboliques, la perte de 40 pour 100 environ de la lumière dans la réflexion, et l'altération rapide de leur surface métallique, ont fait préférer généralement pour les phares, les appareils de *réfraction*, dont nous parlerons plus tard.

2176. Miroirs elliptiques, hyperboliques. — On peut se demander quelle forme doit avoir la méridienne d'un miroir de révolution pour que les rayons réfléchis, venant d'un point de l'axe, se croisent exactement au même point. Il est facile de voir que si le miroir est *concave*, la méridienne devra être une ellipse tournant autour de son grand axe, et dont les foyers géométriques seront occupés par les foyers lumineux conjugués; car nous savons que la normale à l'ellipse divise en deux parties égales l'angle des rayons vecteurs. Du reste, il faudra un miroir particulier pour chaque distance, p , du point lumineux au miroir. La distance des foyers de l'ellipse méridienne sera $D = p - p'$. Le demi-grand axe de cette ellipse étant $p' + \frac{1}{2}D = \frac{1}{2}(p + p')$.

Si le miroir est convexe, sa surface devra former un hyperboloïde de révolution autour de l'axe transverse, dont le point lumineux et son foyer *virtuel*

occuperont les foyers géométriques. La distance de ces foyers sera $p + p'$, et le demi-axe traverse, $\frac{1}{2}(p - p')$.

Si les rayons lumineux sont parallèles à l'axe, il faudra faire $p = \infty$, et l'axe deviendra infini, pour le miroir elliptique comme pour le miroir hyperbolique, et l'on retrouvera le miroir *parabolique* (2474).

Les miroirs elliptiques et hyperboliques peuvent donner des images focales nettes quand les objets lumineux sont très-éloignés du miroir, et leurs différents points très-rapprochés de l'axe de révolution. Il y a alors une aberration de courbure, insensible quand l'ouverture du miroir est très-petite.

Condenseur de lumière. — M. L. d'Henry a eu l'idée ingénieuse d'employer les miroirs elliptiques pour condenser en un faisceau parallèle, la lumière lancée dans tous les sens par un centre lumineux. Ce centre s (fig. 1735) est placé à l'un des foyers géométriques d'un vase de révolution, dont la surface intérieure, en forme d'ellipsoïde, est douée d'un grand pouvoir réfléchissant. Un des sommets présente une ouverture fermée par une lentille, ab , qui reçoit

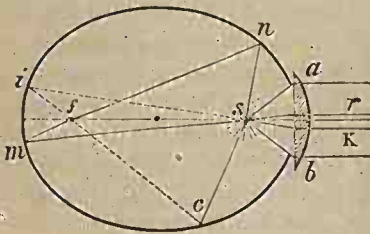


Fig. 1735.

et rend parallèles les rayons émis dans l'angle asb . Les rayons émis dans toutes les autres directions sont réfléchis, passent par le foyer f , éprouvent une seconde réflexion qui les renvoie au foyer s ,... et après deux ou un plus grand nombre de réflexions, qui les rapprochent de plus en plus de l'axe fs , sont dirigés dans l'angle asb et traversent la lentille qui les rend parallèles. La figure

montre la route suivie par les rayons $scisk$, et $snmsr$. Toute la lumière émise au point s est ainsi rassemblée dans le faisceau parallèle sortant de la lentille, sauf la portion qui est éteinte dans les réflexions successives.

2477. Miroirs cylindriques, coniques. — Supposons un miroir dont la surface soit un cylindre droit. L'image d'un corps placé en avant de ce miroir aura les mêmes dimensions que ce corps, dans le sens des arêtes. Mais ces dimensions seront altérées, dans le sens transversal. En effet, les rayons qui tombent sur une même arête se réfléchissent comme sur un miroir plan linéaire, et ceux qui tombent sur une section droite, comme sur une circonférence de grand cercle d'un miroir sphérique de même rayon que la base du cylindre. L'image sera donc rétrécie perpendiculairement aux arêtes si le miroir est convexe; et élargie s'il est concave, et si l'objet est placé à une distance moindre que la moitié du rayon de la base.

Dans un miroir *conique* convexe, l'image, conservant toujours sa grandeur dans le sens des arêtes, sera rétrécie dans le sens transversal, et d'autant plus que les rayons se réfléchiront plus près du sommet. De sorte que l'image prendra une forme pyramidale.

2178. Anamorphoses par réflexion. — On nomme *anamorphoses*, des figures tellement déformées, quoique suivant des règles déterminées, qu'on n'y voit que des traits bizarres et sans signification; tandis qu'elles présentent un dessin régulier quand on les regarde sous certaines conditions; par exemple quand elles sont vues par réflexion dans certains miroirs courbes, comme des miroirs cylindriques ou coniques.

1^o Miroirs cylindriques. — Supposons un miroir cylindrique convexe *c* (fig. 1736) posé par sa base sur un carton AB, sur lequel est tracé un dessin disposé d'un côté autour de cette base. L'œil étant placé en avant du miroir, chaque point du dessin va faire son image derrière la surface réfléchissante, et entre l'axe du cylindre et sa surface. Les images des différents



Fig. 1736.

points sont donc resserrées dans un espace qui ne dépasse pas le diamètre du cylindre, mais les traits du dessin sont étrangement déformés, surtout parce que, l'œil étant placé au-dessus de la surface du carton AB, les rayons partant d'un même point sont réfléchis sur le contour d'une section oblique, dont l'obliquité dépend de la position du point considéré, ce point et l'œil devant toujours être dans le plan d'incidence. Si maintenant on suppose que le carton contienne, non plus un dessin régulier, mais une *anamorphose* tracée suivant des règles convenables, on conçoit que les traits déformés par réflexion sur le miroir pourront former un dessin régulier. C'est ainsi que l'image vue dans le miroir *c* représente un personnage, que l'anamorphose tracée sur le carton AB, permet à peine de soupçonner.

2^o Miroirs coniques. — Le miroir conique *c* (fig. 1737) est posé au centre d'un carton sur lequel on a tracé un dessin disposé circulairement. Des rayons partant des différents points *a, b...*, du dessin, et entrant dans l'œil placé sur le prolongement de l'axe du cône, se réfléchissent suivant *a', b'...*, dans des directions dont le prolongement rencontre toujours la base du cône. De plus, les rayons venant des points les plus éloignés du centre doivent, pour aller à l'œil, se réfléchir sur les points les plus rapprochés du sommet *c*, et leurs images seront les plus rapprochées de l'axe du cône. On conçoit donc qu'une

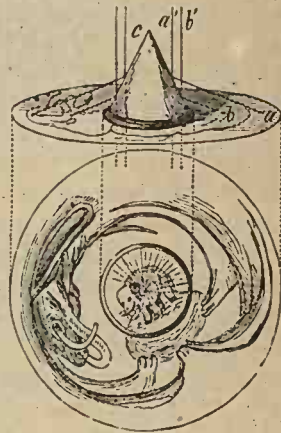


Fig. 1737.

anamorphose dessinée sur le carton, pourra fournir une image régulière, comme on en voit un exemple au bas de la figure, où l'on distingue un éléphant.

Pour construire l'anamorphose devant donner un dessin déterminé, après avoir tracé ce dessin dans un cercle représentant la base du cône, on mène un diamètre quelconque, et l'on reporte les points du dessin rencontrés par ce diamètre, sur la base d'un triangle représentant la section du cône par un plan qui passe par son axe et par le diamètre considéré triangle que l'on rabat dans le plan du dessin. Ayant ensuite marqué sur le prolongement de cet axe le point où devra être placé l'œil, on le joint aux différents points du dessin marqués sur le diamètre, ce qui donne les *rayons réfléchis* sur l'arête du cône, qui doivent faire voir ces points. Les *rayons incidents* correspondants se trouvent, au moyen des lois de la réflexion, et les points où ils rencontrent le diamètre prolongé, sont les points correspondants de l'anamorphose. On fait la même construction pour autant de diamètres que l'on veut, et l'on obtient ainsi des points assez rapprochés pour qu'il soit facile de les réunir par des traits continus. Il est à remarquer que les parties centrales du dessin sont transportées sur le bord de l'anamorphose, et les parties rapprochées du contour, vers l'intérieur de l'anamorphose.

CHAPITRE III

DIOPTRIQUE

Remus integer in tenui aquâ fracti speciem reddit. Poma per vitram adspicientibus multo majora sunt.

(SENEC. *Natural. quest.* liv. I, cap. III.)

§ 1. — DE LA RÉFRACTION SIMPLE ET DE SES LOIS

I. Réfraction dans les solides et les liquides.

2479. Définitions. — Quand un rayon de lumière passe *obliquement* d'un milieu homogène dans un autre milieu homogène de nature différente, ce rayon est dévié, et en même temps, se colore de diverses nuances. Le phénomène de la déviation est désigné sous le nom de *réfraction*, et la coloration, sous le nom de *dispersion*. Nous avons donc ici deux phénomènes distincts à considérer. L'étude du premier constitue la *dioptrique*, autrefois *anaclastique*, et l'étude du second fait partie de la *chromatique* ou science des couleurs, qui sera l'objet du chapitre suivant.

Il y a des corps *non homogènes*, particulièrement les cristaux non symétriques autour d'un point, dans lesquels le rayon pénètre en se divisant généralement en deux autres. Ce phénomène, désigné sous le nom de *double réfraction*, sera étudié dans un chapitre à part; nous ne nous occuperons ici que de la *réfraction simple*, relativement à laquelle nous allons d'abord poser quelques définitions.

On nomme *point d'incidence* ou *point d'immersion*, le point par lequel le rayon incident traverse la surface de séparation des deux milieux. Ce point se nomme *point d'émergence* ou *d'émergence*, quand on considère le rayon comme sortant du premier milieu pour pénétrer dans le second. Le rayon dévié dans le second milieu est le *rayon réfracté*, et l'angle qu'il fait avec la normale menée par le point d'incidence à la surface de séparation, se nomme *l'angle de réfraction*.

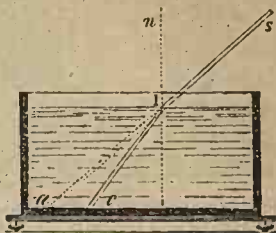


Fig. 1738.

Corps plus ou moins réfringents. — Quand l'angle de réfraction est moindre que l'angle d'incidence, on dit que le milieu dans lequel pénètre le rayon, est *plus réfringent* que le milieu d'où il vient. Dans le cas contraire, c'est ce dernier milieu qui est le plus réfringent. En général, de deux corps, le plus dense est le plus réfringent. Mais il y a des exceptions, principalement pour les corps dont les densités diffèrent peu. Ainsi, l'*alcool*, l'*essence de térébenthine*, qui sont moins denses que l'eau, sont plus réfringents qu'elle; l'*alun* et le *sulfate de protoxyde de fer* ont même densité, et le second est plus réfringent que le premier; l'*huile d'olive* et le *borax*, dont les densités sont à peu près comme 1 : 2, sont également réfringents, car un rayon n'est pas dévié en passant de l'une de ces substances dans l'autre.

2480. Expériences qui montrent la réfraction. — On fait entrer dans la chambre obscure un pinceau de rayons solaires que l'on fait tomber au fond d'un vase, en un point *a* que l'on marque (fig. 1738). On remplit ensuite le vase d'eau, et l'on voit que le faisceau aboutit à un point *c* plus rapproché de la normale *ln*. Il y a donc eu déviation. Si le vase est une caisse à parois de verre, et si l'eau est trouble et l'air rempli de poussières en suspension, on peut suivre la marche des faisceaux *incident* et *réfracté*, et voir le changement de direction qui se fait à la surface du liquide.

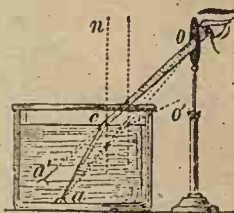


Fig. 1739.

Explication de quelques phénomènes. — Divers phénomènes peuvent être cités comme des preuves indirectes de la réfraction. 1° On met un corps *a* (fig. 1739) au fond d'un vase, et l'on place l'œil en *o*, de manière que le pinceau *ao* qui entre dans l'œil rasant le bord du vase, ce bord paraisse toucher

le corps. On verse ensuite de l'eau, et l'on voit alors le corps a relevé en a' , et écarté du bord. C'est que le pinceau ao qui entrait dans l'œil, s'écartant de la normale en entrant dans l'air, se dirige en o' au-dessous de l'œil; et un autre pinceau aco , s'écartant de la normale cn à sa sortie du liquide, entre dans l'organe, qui rapporte la position du point a , en a' sommet du pinceau conique que forme le pinceau émergent eo . — On peut aussi placer l'œil de manière que le corps a , d'abord caché par le bord du vase vide, soit vu après qu'on l'a rempli d'eau.

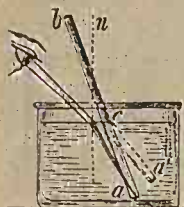


Fig. 1740.

2° Un bâton ba (fig. 1740) enfoncé dans l'eau, paraît brisé en s'éloignant de l'œil, au point e où il sort de ce liquide; son extrémité a étant vue en a' , et ses autres points, dans l'espace $a'e$.

2181. Cas de l'incidence normale. — Quand un rayon incident est normal à la surface de séparation de deux milieux, il n'est pas dévié; ce qui se conçoit facilement, car, quelle que soit la cause qui produit la réfraction, il n'y a pas de raison pour qu'un rayon normal soit

dévié plutôt d'un côté que de l'autre. Cependant certains physiciens, entre autres Vossius et Snellius, ont cru qu'il y avait réfraction dans ce cas, parce qu'un point placé au fond de l'eau paraît rapproché de l'œil qui le regarde dans la direction verticale. Mais cela tient à ce qu'il part du point considéré, a (fig. 1741), non pas un rayon unique, mais un faisceau conique, dont l'axe seul est normal à la surface du liquide. Or, les rayons obliques, s'écartant de la normale après avoir traversé la surface en ee' , deviennent plus divergents, et le cône qui entre dans l'œil a son sommet en o .



Fig. 1741.

2182. Lois de la réfraction. — Le phénomène de la réfraction était à peine connu des anciens; cependant l'expérience ci-dessus (fig. 1739) est décrite dans l'optique attribuée à Euclide, et Ptolémée en donne une assez bonne explication. Aristote remarque que les rames plongées dans l'eau paraissent brisées, et Archimède a écrit sur la déformation apparente d'un anneau plongé dans l'eau. Ptolémée connaissait la déviation des rayons des astres par l'atmosphère. Alhazen, qui a traité assez longuement de la réfraction, a cherché à l'expliquer par la décomposition du mouvement oblique du rayon incident, qui éprouverait une résistance nouvelle en

changeant de milieu. Il remarqua que les angles de réfraction ne sont pas proportionnels aux angles d'incidence, et il construisit des tables donnant ces angles dans l'eau et dans le verre, pour des incidences variant de 0° à 80° . Un semblable travail avait été fait par Ptolémée, et repris par Vitellion. Kepler, dans sa dioptrique, qui avait principalement pour objet l'explication des lunettes grossissantes, admet la proportionnalité des deux angles, jusqu'à l'incidence de 30° , ce qui est vrai approximativement, comme nous allons le voir. Enfin

angles d'incidence, et l'on trouve toujours le même rapport; ce qui vérifie la loi de Descartes. Quant à la première loi, elle résulte de ce que les rayons incident et réfracté passent par les ouvertures des diaphragmes, qui sont également distantes du plan du cercle vertical, et sont, par conséquent, dans un plan normal à la surface du liquide. — Pour avoir plus de précision, on peut mesurer les angles d'incidence et de réfraction au moyen des verniers u et v , adaptés aux alidades, et chercher les *sinus* de ces angles dans les tables trigonométriques.

On voit que l'appareil qui précède peut aussi servir à vérifier les lois de la réflexion; il suffit, pour cela, de porter l'alidade oe au-dessus de la surface réfléchissante du liquide, que l'on peut remplacer par un petit miroir plan, et de mesurer les angles d'incidence et de réflexion. De même, l'appareil décrit plus haut pour constater les lois de la réflexion (2426, *fig.* 1676) peut servir à celles de la réfraction. On remplace alors le miroir central par un vase demi-cylindrique io , et l'on porte le curseur e en e' , pour recevoir le rayon réfracté. Des règles divisées rr , pouvant glisser sur le diamètre vertical du cercle, donnent les *sinus* des angles d'incidence et de réfraction, quand on ne veut pas se servir des tables trigonométriques.

Les méthodes qui précèdent s'appliquent à une substance solide, en plaçant au centre du cercle, un demi-cylindre fait avec cette substance.

Nous ferons connaître plus tard des méthodes très-précises, au moyen desquelles on évalue le rapport entre les *sinus* d'incidence et de réfraction dans une substance donnée. Ces méthodes, conduisant toujours au même rapport, quel que soit l'angle d'incidence employé, on y trouve de nouvelles preuves des lois de la réfraction, basées sur des mesures très-précises.

2483. Indice ou rapport de réfraction. — Il résulte des lois de la réfraction que, si l'on désigne par i et r les angles d'incidence et de réfraction, on a $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, ou $\sin i = n \sin r$; n étant une constante pour les deux mêmes milieux. Si le rayon passe du vide dans un milieu transparent, ce rapport n se nomme l'*indice*, le *rapport* ou le *coefficient de réfraction absolu* de ce milieu. Le plus grand indice de réfraction est 3, appartenant au chromate de plomb. Celui de l'eau est 1,336, et celui du verre ordinaire 1,5 environ.

Quand le rayon de lumière passe d'un milieu pondérable dans un autre, le rapport des sinus se nomme l'*indice de réfraction relatif* des deux milieux.

2484. Loi de réciprocité. — Les rayons incident et réfracté étant construits, si l'on suppose que la lumière marche en sens contraire, c'est-à-dire si l'on prend le rayon réfracté pour rayon incident, le rayon incident primitif deviendra le nouveau rayon réfracté. Ce résultat est un cas particulier d'une loi générale d'optique qu'on peut énoncer ainsi : *un rayon de lumière qui traverse un système de corps transparents suit généralement le même chemin, quel que soit le sens dans lequel il se propage.* — Cela posé, quand on donne l'indice de réfraction relatif à deux milieux, on prend toujours pour numérateur du rapport le *sinus* du plus grand des deux angles formés avec la normale, à moins qu'on

n'avertisse du contraire. Les nombres qui représentent les indices de réfractions sont donc toujours plus grands que l'unité.

Conséquence. — Il résulte de la loi de Descartes que, si le plus grand des deux angles faits par un rayon lumineux avec la normale vient à augmenter, le plus petit augmentera d'une moindre quantité. En effet, d'abord, le plus grand *sinus* devra augmenter plus que le plus petit, pour que le rapport reste constant; en outre, les arcs qui mesurent les angles sont plus grands que leur *sinus*, et ils en diffèrent d'autant plus que ces sinus sont plus grands. L'arc le plus grand devra donc à *fortiori* plus augmenter que le plus petit.

2485. Angle limite. — Quand un rayon passe dans un milieu plus réfringent que celui d'où il vient, une partie seulement pénètre dans le second milieu; l'autre est réfléchiée par la surface de séparation. C'est pour cela que les corps transparents projettent une ombre, comme on peut le reconnaître avec une lame de verre. La proportion réfléchiée varie avec l'angle d'incidence (2430), et il passe toujours une partie des rayons incidents, quelle que soit leur obliquité. Mais, quand le second milieu est moins réfringent que le premier, il peut arriver

qu'aucune portion de lumière ne franchisse la surface de séparation; car, si l'on éloigne peu à peu de la normale le rayon incident, *so* (fig. 1743), l'angle de réfraction r augmentera, et il deviendra égal à 90° avant l'angle d'incidence. En effet, la relation $\sin r = n \sin i$ montre que, pour $r = 90^\circ$, on a $\sin i = 1 : n$, ce qui est toujours possible, puisque n est plus grand que l'unité (2484). Soit Lo

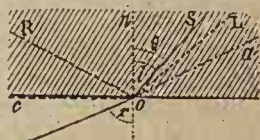


Fig. 1743.

l'angle dont le *sinus* est $1 : n$; le rayon Lo donnera un rayon réfracté oc couché sur la surface de séparation. L'angle Lo se nomme l'*angle limite*; c 'est le plus grand angle d'incidence donnant un rayon réfracté, l'angle de réfraction ne pouvant être plus grand que 90° . On voit que l'angle limite est d'autant plus grand que l'indice n est plus petit : pour l'eau, il est de $48^\circ 35'$; pour le verre, de 41° environ, moindre que la moitié d'un angle droit.

Réflexion totale. — On doit se demander ce que devient la lumière quand le rayon incident fait avec la normale un angle plus grand que l'angle limite. L'expérience montre qu'alors le rayon, ao , se réfléchit *en totalité* dans le premier milieu, en suivant les lois ordinaires de la réflexion. C'est là le phénomène de la *réflexion totale*, découvert par Kepler, et ainsi nommé parce que le rayon réfléchi en dedans est tout aussi intense que le rayon incident, tandis que, dans la réflexion sur les surfaces extérieures, il y a toujours une perte notable de lumière (2430).

2486. Vérifications expérimentales. — Au fond d'une caisse formée de glaces (fig. 1744) est une flamme s , qui se voit facilement quand l'œil est en o '. Mais, si l'on remplit la caisse d'eau, et si l'on étend un écran co de manière que l'angle fait par sa avec la normale en a soit égal à l'angle limite θ , on ne peut plus voir la flamme, tous les rayons qui rencontrent la partie découverte

de la surface de l'eau se réfléchissant en dedans. En plaçant l'œil en O , on verra, en effet, par *réflexion totale*, l'image s' de la flamme, comme dans un miroir. On apercevra aussi, dans la direction ao' , de la lumière provenant des rayons

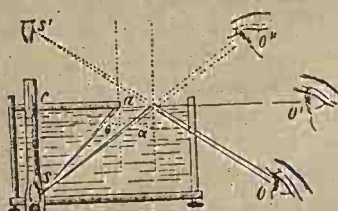


Fig. 1744.

couchés sur cette surface et donnés par les rayons incidents formant l'angle limite θ . On peut encore employer l'appareil

(fig. 1742), que M. Duboseq a perfectionné et approprié à une grande variété d'expériences. On fait arriver la lumière par-dessous, dans le vase cylindrique en amenant le miroir m en e , et l'on obtient un rayon sortant par la surface de l'eau, et en même temps un rayon faible réfléchi en dedans; si alors on écarte peu à peu l'alidade de la verticale, on voit tout à coup le rayon réfléchi devenir très-brillant, et le rayon sortant disparaître au même moment, après s'être rapproché de plus en plus du niveau de l'eau.

— Pour opérer sur un corps solide, on agrafe à la place du vase cylindrique une règle portant un demi-cylindre c (fig. 1745) ou un prisme triangulaire à angle droit, p , dont la face inférieure passe par le centre du cercle AA (fig. 1742), et l'on fait varier l'angle d'incidence de rayons lancés d'en haut par le miroir m .

Applications. — On adapte au volet d'une chambre noire un tube opaque (fig. 1746) fermé par une masse de verre aec , dont une face ae est perpendiculaire à l'axe du tube, et dont l'autre face ic forme avec cet axe un angle ice moindre que l'angle limite. Aucun rayon ne pénétrera dans la chambre, car les rayons incidents, sensiblement parallèles à l'axe du tube, entrent en ae sans être

déviés, et forment avec la normale en i un angle plus grand que l'angle limite; ils éprouveront donc la réflexion totale.

— On peut encore mettre à la place de cette masse de verre le prisme p (fig. 1745), en ayant soin de placer la face hypoténuse en avant et perpendiculaire à l'axe du tube.

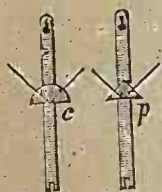


Fig. 1745.



Fig. 1746.

Les rayons éprouveront la réflexion totale sur chacune des deux autres faces, et seront renvoyés au dehors.

Il résulte de la réflexion totale, qu'un plongeur ayant l'œil en o (fig. 1747) ne recevra de l'extérieur, que les rayons qui entreront par la base du cône aob , dont l'angle au sommet est double de l'angle limite. En dehors de ce cône, il recevra des rayons réfléchis provenant de rayons incidents émis par des objets tels que n placés au fond de l'eau et ayant éprouvé la réflexion totale à la surface du liquide. On peut en faire l'expérience en plaçant l'œil en dessous et tout près d'une glace horizontale formant le fond d'un bassin rempli d'eau.

2-187. Conservation de l'intensité dans la réflexion totale. —

Bouguer, en comparant les quantités de lumière réfléchies sous diverses incidences à la seconde surface de lames transparentes, vit que l'intensité de la lumière réfléchie, invariable tant que le rayon incident était éloigné de la normale, diminuait brusquement à partir d'une certaine valeur suffisamment

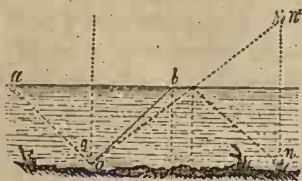


Fig. 1747.



Fig. 1748.

petite de l'angle d'incidence ; c'est qu'une partie de la lumière passait alors au dehors. Pour montrer combien est grande l'intensité de la lumière réfléchie en dedans de l'eau quand l'angle d'incidence dépasse l'angle limite, il la comparait à la quantité que réfléchit le mercure. Il versa de l'eau sur du mercure contenu dans un vase de verre (fig. 1748), et plaça en *a* un corps blanc, à égale distance des deux niveaux *n*, *n'* ; l'œil étant en *o*, il voyait par réflexion en *n* et *n'*, deux images *i* et *i'* du corps, et ces deux images paraissaient également brillantes.

Bouguer croyait que la réflexion en dedans éteignait environ un quart de la lumière incidente. Mais on prouve par l'expérience suivante que cette perte n'existe pas : On place horizontalement en avant d'une feuille de papier verticale *ab* (fig. 1749), une plaque carrée de verre *A* sur laquelle est appliquée une seconde plaque *C* qui n'en couvre que la moitié, comme on le voit au bas de la figure. Des rayons, *s'n'*, traversent la demi plaque suivant *n're'*, en se réfléchissant en dedans en *r*, et sortent en *e*, après avoir éprouvé deux réfractions, en *n'* et en *e'*. D'autres rayons, *sn*, traversent de part en part la plaque carrée *AA*, après avoir éprouvé les mêmes réfractions en *n* et *e*, et avoir parcouru la même épaisseur de verre $ne = n're'$. Les

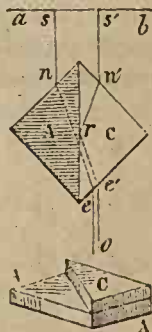


Fig. 1749.

deux parties *s*, *s'* de la feuille de papier vues ainsi par l'œil placé en *o*, paraissent exactement de même éclat ; les rayons partis de *s'* ne perdent donc pas de leur intensité en se réfléchissant en *r*.

Le même résultat a été aussi prouvé par des expériences très-précises d'Arago, comme nous le verrons plus tard. Les mots de *réflexion totale* sont donc bien l'expression exacte du phénomène.

2-188. Construction du rayon réfracté. — Étant donné un rayon incident

et l'indice de réfraction, on peut trouver la direction du rayon réfracté, par la construction suivante, que Huyghens a déduite de la théorie des ondulations. Soit am le rayon incident (fig. 1750). Décrivons une demi-circonférence, du point m comme centre, avec un rayon égal à $1 : n$, n étant l'indice de réfraction, et menons mb perpendiculaire à am . Inscrivons dans l'angle bmo une

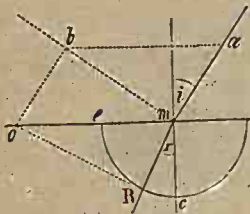


Fig. 1750.

droite ob parallèle à am et de longueur égale à l'unité, menons du point o une tangente oR , et joignons le point de contact R au point m , mR sera le rayon réfracté. En effet, les triangles rectangles bmo et omR donnent

$$bo, \text{ ou } 1 = om \sin omb = om \sin i, \text{ et}$$

$$mR, \text{ ou } \frac{1}{n} = om \sin moR = om \sin r.$$

Éliminant om , il vient $\sin i = n \sin r$; l'angle r est donc bien l'angle de réfraction, et mR le rayon réfracté.

Quand le rayon pénètre dans le milieu le plus réfringent, la construction est toujours possible, car le point o reste en dehors de la circonférence, dont le rayon ($1 : n$) est plus petit que l'unité, et il y a toujours un rayon réfracté. Quand le second milieu est le moins réfringent, l'indice de réfraction est plus petit que l'unité, si l'on continue à prendre i pour angle d'incidence. Alors le rayon em de la circonférence est égal à n et plus grand que l'unité; et, pour que le point o tombe hors de cette circonférence, il faut que om ou $1 : \sin i$ soit plus grand que n . Si l'on a $1 : \sin i = n$, le point o est en e , où se trouve en même temps le point de contact, et le rayon réfracté est dirigé suivant me . L'angle i est alors l'angle limite. Si l'on a $(1 : \sin i) < n$, le point o tombe dans l'intérieur de la circonférence, et il n'y a plus de rayon réfracté.

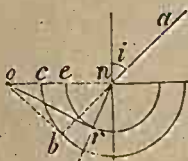


Fig. 1751.

La construction peut se faire d'une autre manière. Après avoir décrit la circonférence ne avec un rayon égal à $1 : n$, on en décrit une seconde nc avec un rayon égal à l'unité, et l'on mène une tangente ob à cette circonférence, par le point b où elle rencontre le rayon incident prolongé; ce qui donne le point o , d'où l'on tire la tangente or à la circonférence nc ; nr est le rayon réfracté, comme on peut le déduire de la considération des triangles rectangles orn , obn . — Si le rayon pénètre dans le milieu

le moins réfringent, le rayon de la circonférence ne est n , plus grand que l'unité, et il faut, pour que la construction soit possible, que le point o tombe en dehors de cette circonférence, c'est-à-dire que no , ou $(1 : \sin i)$, soit plus grand que n , ou $\sin i > (1 : n)$.

M. Gariel obtient nr en abaissant simplement sur cn , du point où ab rencontre la circonférence ne , une perpendiculaire qui coupe la circonférence nc , en un point par lequel passe le rayon réfracté.

2489. RÉFRACTION DIFFUSE. — Quand on regarde divers objets à travers un corps transparent, ces objets peuvent être vus hors de leur véritable place; mais on en distingue les contours, déformés ou non, chaque rayon, tout en subissant diverses déviations, conservant son individualité et restant séparé des autres. Il en résulte qu'on ne verrait pas un corps *absolument transparent*, et que, si sa forme était telle que les objets placés derrière lui ne parussent pas déformés, on pourrait ignorer sa présence.

Quand la surface du corps est dépolie, ou que sa masse est composée de parties très-divisées, de fibres agglomérées, comme l'albâtre, le papier, la corne, les rayons qui le traversent se mêlent et sortent dans toutes les directions en chaque point d'émergence. Ces points se comportent donc comme des points lumineux, et c'est la surface que l'on voit et non plus les objets placés derrière, et d'où émane la lumière transmise. Dans ce cas, le corps est dit *translucide*. Quand le corps est transparent avec sa surface dépolie, cette surface est couverte d'aspérités que les rayons lumineux rencontrent sous une multitude d'angles différents, de manière à donner, dans un espace insensible, des rayons réfractés de toutes directions, comme dans la réflexion diffuse (2428). — Il semble aussi que l'intensité des rayons sortant dans différentes directions est proportionnelle au *cosinus* de l'angle qu'ils font avec la normale (2411); car un globe en verre dépoli enveloppant un bec de gaz, ressemble de loin à un disque plat.

Quand le corps est composé de particules ou de fibres transparentes, les rayons qui passent à travers ces particules éprouvent des réfractions qui les dévient dans des directions très-variées dépendant des formes de ces particules et de leurs positions; ces déviations, répétées, donnent aux rayons qui sortent dans un espace très-petit des directions très-différentes. La mousse de bière, formée de bulles liquides transparentes, et qui n'est que *translucide*, nous présente une image de ce qui se passe dans les corps composés de parties séparées par une substance de nature différente, qui est ici l'air contenu dans les bulles.

Si l'on remplit les vides qui séparent les particules dont est formé un corps, par un liquide qui réfracte la lumière à peu près de la même manière, les rayons ne sont plus déviés irrégulièrement, et le corps devient *transparent*. C'est ce qui a lieu en partie pour le verre dépoli dont on mouille la surface, l'hydrophane imbibé d'eau, le papier huilé. Si ces corps, étant très-minces, sont appliqués sur les objets que l'on regarde à travers, on peut en distinguer assez bien les détails, comme lorsqu'on appuie une feuille de papier mince sur un dessin que l'on veut calquer. C'est qu'il ne sort de chaque point de la feuille translucide, pour entrer dans l'œil, que les rayons provenant du point juxtaposé du dessin, rayons qui sont sensiblement parallèles entre eux et n'éprouvent qu'une faible diffusion en traversant une aussi petite épaisseur.

Les nuages qui voilent le soleil, quand ils ne sont pas trop épais, envoient de la lumière diffuse qui éclaire dans toutes les directions, de manière à ce qu'il n'y a plus d'ombres marquées. C'est pour cela que l'on voit plus clair au fond d'un puits, par un ciel nébuleux que par un temps clair.

II. Réfraction atmosphérique. — Mirage.

2190. Réfraction atmosphérique. — Les gaz réfractent la lumière, mais faiblement. Ce phénomène se remarque surtout sur les rayons des astres, pénétrant dans l'atmosphère. Comme l'air augmente graduellement de densité à mesure qu'on se rapproche de la surface de la terre, ces rayons sont infléchis en ligne courbe, et les astres paraissent plus élevés au-dessus de l'horizon qu'ils ne le sont réellement. Considérons, par exemple, une étoile placée dans la direction S (fig. 1752) un peu au-dessous de l'horizon du point m de la surface de la terre, et qui, par conséquent, ne pourrait être vue de ce point s'il n'y avait pas réfraction. Supposons l'atmosphère partagée en couches concentriques infiniment minces de plus en plus denses à mesure qu'elles se rapprochent de la surface de la terre. Un rayon Sa , en pénétrant dans la première couche d'air, se rapprochera de la normale an''' , et prendra la direction ac ; en pénétrant en c



Fig. 1752.

dans la seconde couche, qui est plus dense que la première, il se rapprochera aussi de la normale cn''' , et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il parvienne au point m , après avoir décrit une ligne brisée qui se confond avec une courbe continue, parce que les couches d'air sont infiniment minces. L'observateur placé en m verra alors l'étoile en S' , dans la direction du dernier élément rm de la courbe. Cet astre paraîtra donc au-dessus de l'horizon, tandis que, en réalité, il se trouve un peu au-dessous. On a donné le nom de *solaire* à la courbe am : sa forme a beaucoup occupé les géomètres, depuis Lahire, Taylor et Bouguer, qui l'ont, les premiers, étudiée.

La déviation est, du reste, la même que si le rayon incident n'avait traversé que la couche la plus basse. En effet, soit n''', n'', n', n les indices de réfraction absolus des couches successives; r''', r'', r', r , les angles de réfraction dans chacune d'elles, i , l'angle d'incidence sur la couche supérieure; on aura,

$$\sin i = n''' \sin r''', \sin r''' = \frac{n''}{n'''} \sin r'', \sin r'' = \frac{n'}{n''} \sin r', \sin r' = \frac{n}{n'} \sin r.$$

En multipliant ces égalités membre à membre, il vient $\sin i = n \sin r$. L'angle r du rayon $S'm$ avec la verticale mz est donc la même que si le rayon pénétrait dans cette couche seule sous l'incidence i .

La *réfraction atmosphérique*, ainsi nommée par Biot, avait été d'abord désignée sous le nom de *réfraction astronomique* quand il s'agissait des rayons des astres, et de *réfraction terrestre* quand ces rayons portaient d'objets situés à la surface de la terre. La réfraction atmosphérique, nulle pour les rayons

verticaux, est d'autant plus prononcée pour les rayons obliques, qu'ils sont plus rapprochés de l'horizon, près duquel ils ont à traverser une couche d'air plus épaisse, plus dense et plus inclinée sur leur direction. C'est pour cela que les étoiles circompolaires paraissent plus rapprochées du pôle, à leur passage au méridien inférieur qu'à leur passage au méridien supérieur; que les constellations, la lune, le soleil paraissent aplatis dans le sens vertical, quand ils sont près de l'horizon, les rayons envoyés par les parties inférieures étant plus relevés que ceux qui viennent des parties supérieures¹. On a quelquefois observé des éclipses totales de lune pendant que le soleil paraissait au-dessus de l'horizon; par exemple, à Paris, le 19 juillet 1750. Les centres des deux astres et de la terre semblaient n'être pas en ligne droite, et ce fait avait beaucoup intrigué les astronomes. C'était la réfraction atmosphérique qui faisait paraître les deux astres en même temps au-dessus de l'horizon, au moment de l'éclipse. Un semblable phénomène s'est reproduit en 1866, et lors de l'éclipse totale de lune du 4 novembre 1873. — La lueur rougeâtre qui illumine le disque lunaire pendant qu'il est éclipsé, est due aux rayons solaires infléchis dans l'atmosphère de la terre, et pénétrant dans le cône d'ombre qu'elle projette. — C'est à la réfraction des rayons lumineux dans l'air irrégulièrement dilaté et en mouvement, qu'est dû le tremblement apparent des objets vus derrière une surface échauffée, comme celle d'un poêle, ou une plaine frappée par le soleil.

Les sommets des montagnes paraissent plus haut qu'ils ne sont réellement, les rayons qui arrivent à l'observateur placé dans la plaine étant infléchis en pénétrant obliquement dans les couches inférieures de l'atmosphère; et l'on cherche à tenir compte de cet effet dans les mesures géodésiques, dont il peut affecter les résultats, d'erreurs importantes. C'est pour cela qu'on préfère, le plus souvent, le baromètre, pour mesurer la hauteur des montagnes dont le sommet est accessible.

2491. Tables de réfraction. — La réfraction astronomique était connue des anciens. Archimède paraît l'avoir le premier considérée, et Ptolémée, puis Alhazen, reconnurent son influence sur la position des astres, position que Tycho-Brahé tenta de corriger. On a construit, depuis, des tables dites *astronomiques* ou de *réfractions*, où sont consignées les corrections à faire pour les différentes hauteurs apparentes au-dessus de l'horizon. Les premières ont été calculées par D. Cassini. La méthode qu'il dut employer consistait, d'après Montucla, à observer les hauteurs d'une étoile au-dessus de l'horizon, à différentes heures, et à les comparer aux hauteurs calculées, en partant de la régularité du mouvement diurne: La hauteur h du pôle étant elle-même influencée par la réfraction, on observe à quelle heure l'étoile se trouve à cette hauteur erronée; la différence avec la hauteur calculée de l'étoile donne la correction à faire subir à h , mais seulement

¹ Les constellations et les astres paraissent en même temps beaucoup plus grands près de l'horizon que près du zénith. Nous reviendrons plus tard sur cette illusion, en parlant du jugement de la grandeur des objets, lorsque nous étudierons la vision.

approximativement, la hauteur de l'étoile étant calculée au moyen de la hauteur du pôle, qui n'est pas exacte. On calcule ensuite les hauteurs de l'étoile plus exactement, en partant de cette hauteur du pôle corrigée, ce qui sert à lui faire subir une nouvelle correction, et ainsi de suite, en appliquant la méthode des corrections successives (I, 28).

Comme il est impossible de construire des tables de degré en degré, surtout au-dessus de 45° , où la déviation n'est que de $59''$, on emploie des formules d'interpolation pour les hauteurs intermédiaires à celles qu'on a observées directement; ou bien on cherche par le calcul, en faisant certaines suppositions vraisemblables sur la constitution de l'atmosphère, une relation entre les distances zénithales et les réfractions. C'est ce qu'a essayé de faire D. Cassini; il supposa que l'atmosphère forme une couche homogène dans laquelle le rayon, dévié à son entrée, marche en ligne droite, et donnant à cette couche la densité et l'épaisseur convenables pour satisfaire aux réfractions observées directement, il parvint à calculer une table qui représente d'une manière remarquable les résultats observés, mais seulement à partir de 20° de l'horizon. — Newton a aussi déduit de calculs mathématiques, une table de réfractions, et a trouvé que, pour les faibles distances zénithales, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux *tangentes* de ces distances. — Enfin, Bradley a énoncé cette loi générale, dont Lagrange a donné la démonstration mathématique, que, dans un même état de l'air, les réfractions sont proportionnelles aux *tangentes* des distances zénithales apparentes, diminuées d'un multiple de la réfraction elle-même. Le multiplicateur varie avec l'état de l'atmosphère au moment de l'observation; mais comme il affecte une quantité très-petite, on se contente d'adopter une valeur moyenne, qui est 3,5. — Pour donner une idée de la réfraction astronomique, nous extrayons quelques résultats des tables construites au moyen des formules de Laplace. Ces résultats se rapportent à un état moyen de l'atmosphère; ils varient un peu quand la température et la pression changent, mais ils sont indépendants de l'état hygrométrique, quand on observe à plus de 10 à 15° au-dessus de l'horizon. Les nombres contenus dans les colonnes des réfractions, sont à retrancher des distances zénithales observées, quand on veut faire la correction.

DISTANCES ZÉNITHALES apparentes.	RÉFRACTIONS	DISTANCES ZÉNITHALES apparentes.	RÉFRACTIONS	DISTANCES ZÉNITHALES apparentes.	RÉFRACTIONS
4°	1",0	30°	33",6	70°	2' 38",8
5	3,1	40	48,9	80	5 19,8
10	10,3	50	1' 9",3	85	9 54,3
20	21,2	60	1.40,6	90	33 46,3

On voit que la réfraction près de l'horizon étant de $33'$, et le diamètre

apparent du soleil et celui de la lune, de moins de 32', ces astres peuvent être visibles pendant qu'ils sont entièrement au-dessous de l'horizon.

A partir de 70 à 75°, les résultats ne peuvent être employés avec sûreté, à cause des variations irrégulières de la constitution des couches inférieures de l'atmosphère. Aussi, les astronomes évitent-ils autant que possible d'observer près de l'horizon. Cette irrégularité des couches d'air dans la direction de l'horizon est attestée par les déformations que présente parfois le soleil quand il est très-bas, ou les objets très-éclairés situés à l'horizon. On voit, dans la figure 1753, quelques formes bizarres du soleil près de se coucher, observées à Dunkerque par Biot et Mathieu.

2192. DU MIRAGE. — Le *mirage* est un phénomène atmosphérique qui fait apercevoir une image renversée des objets placés à la surface de la terre, comme s'il y avait une nappe d'eau entre ces objets et leur image. On l'observe surtout dans les plaines sablonneuses échauffées par le soleil. Il est fréquent dans l'Arabie et l'Égypte; le Koran compare au mirage (*serab*) tout ce qui est trompeur. On lit dans la philosophie Vedanta que tout ce qui est en dehors de



Fig. 1753.

Brahma n'est qu'illusion, comme le mirage dans le désert de Marou. Ce phénomène, connu dès la plus haute antiquité, est resté longtemps sans explication. M. Huddart paraît en avoir entrevu la cause; et Monge a donné une théorie complète de ce curieux météore, dont il fut souvent témoin pendant la campagne d'Égypte, en 1798. La basse Égypte forme une vaste plaine sensiblement horizontale, parsemée de petites éminences, sur lesquelles sont construits les villages pour être à l'abri des inondations du Nil. Au moment de la grande chaleur du jour, ces villages paraissaient de loin comme au milieu d'un lac, dans les eaux fantastiques duquel on voyait les images renversées des maisons et des arbres. Les contours de ces images étaient un peu incertains, présentant souvent des mouvements ondulatoires, comme s'ils étaient réfléchis dans une eau agitée. A mesure qu'on s'approchait, ce prétendu lac semblait fuir, l'apparence disparaissait, et les soldats, épuisés de fatigue et accablés de soif et de chaleur, éprouvaient une déception d'autant plus cruelle que l'illusion avait été plus complète. Ce même phénomène se produit aussi dans nos climats, et plus souvent qu'on ne le croit généralement.

Il est fréquent dans les plaines de la Crau, près des bouches du Rhône. Biot et Mathieu l'ont souvent observé, à Dunkerque, sur la plaine sablonneuse qui s'étend au bord de la mer, au pied du fort de Risban. Nous l'avons fréquemment

observé à Royan, sur la grève de la grande Conche. Souvent, il faut se baisser pour distinguer le mirage, et, comme il se produit loin de l'observateur, il est bon de l'observer au moyen d'une lunette.

2493. Théorie de Monge. — Supposons une plaine de sable à peu près horizontale, frappée par les rayons du soleil. Le sable s'échauffe rapidement, pendant que l'air traversé par les rayons solaires ne leur emprunte que peu de chaleur, à cause de son pouvoir diathermane. Mais la couche d'air qui touche le sable en reçoit de la chaleur *par contact* et se dilate. Elle tend alors à s'élever ; mais, comme la couche dilatée présente la même tendance dans une grande étendue, il ne se forme pas de courants ascendants, et l'air chaud ne peut que se mêler plus ou moins aux couches immédiatement au-dessus. Celles-ci tendent, au contraire, à descendre, de manière à donner naissance à de petits courants contraires formés d'air inégalement dilaté, et c'est ce qui fait que les objets que l'on voit à travers ces couches paraissent agités. Comme ces mêmes effets se

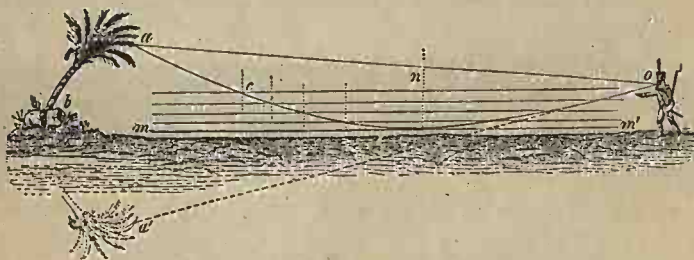


Fig. 1754.

reproduisent continuellement, il y a toujours près du sol des couches plus chaudes et plus dilatées que celles qui sont au-dessus, lesquelles, mêlées avec de l'air chaud qu'elles ont reçu, sont aussi plus chaudes que celles qui leur sont superposées, et ainsi de suite jusqu'à une certaine hauteur. Vers le milieu de la journée, la densité de l'air ira donc en augmentant à partir du sol jusqu'à une certaine hauteur, après laquelle on trouvera la distribution ordinaire des couches de l'air. Soit *a* (fig. 1754) un point d'un objet quelconque, et *o* la position de l'observateur. Un rayon *ao* cheminant à peu près en ligne droite dans une même couche d'air fera voir le point *a* ; mais, en même temps, un rayon *ac*, dirigé obliquement de haut en bas, s'écartera de plus en plus de la verticale, en passant successivement dans des couches de moins en moins réfringentes, et finira par rencontrer la surface de séparation *mm'* de deux d'entre elles, en faisant avec la normale *n* un angle égal à l'angle limite. Ce rayon éprouvera alors la réflexion totale, se relèvera en traversant des couches de plus en plus denses, et viendra enfin en *o* dans l'œil de l'observateur, qui verra en *a'* une image du point *a*. Il en sera de même des autres points de l'objet. Comme les rayons venant du ciel et réfléchissent de la même manière, ils produisent une image brillante en forme

de nappe horizontale, dont l'éclat empêche de voir le sol, et qui ressemble à un lac dans lequel se réfléchirait l'image de l'objet *ab*.

Comme l'angle limite est ici nécessairement très-grand, puisque son *sinus* est égal à $1 : n$, et que n , indice relatif de deux couches d'air consécutives, ne peut être que très-petit, le rayon *ac* doit être très-oblique; ce qui exige que l'observateur soit très-éloigné et l'objet peu élevé au-dessus du sol. C'est pour cela que la nappe d'eau apparente ne se voit que dans les pays de plaine, les rayons venant du ciel ne pouvant partir de très-bas que s'il n'y a pas de montagnes à l'horizon. Celles-ci ne pourraient envoyer que des rayons faibles, au milieu desquels l'image de l'objet ne pourrait pas se détacher par une teinte plus sombre. On voit aussi qu'il faut que l'air soit calme, et que le phénomène ne doit se montrer qu'après une certaine heure.

Lors de ses observations du mirage à Dunkerque, Biot a prouvé que les diverses courbes formées par les rayons qui vont dans l'œil, se coupent deux à deux dans la branche qui est du côté de l'objet, de manière à former une caus-

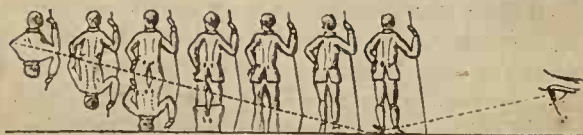


Fig. 1755.

tique ou *trajectoire limite* au-dessous de laquelle aucun objet ne peut être aperçu¹. C'est à partir de cette courbe limite que se fait le renversement; de manière qu'un homme qui s'éloignerait de l'observateur formerait, avec son image, les apparences représentées dans la figure 1755. L'apparence observée dépend donc de la position de l'œil. M. Gorsse s'en est assuré dans la plaine de la Crau. Étant monté sur la margelle d'un puits pendant un très-beau mirage, il vit entièrement une cabane, qui d'abord lui paraissait en partie plongée dans l'eau, et, quand il se baissait, il la voyait s'enfoncer dans la nappe liquide apparente.

Vérifications expérimentales. — Pour confirmer la théorie de Monge, on fait diverses expériences dans lesquelles on produit le mirage sur une petite échelle. Si l'on chauffe fortement et uniformément une caisse en tôle, en l'exposant au soleil ou en la remplissant de charbons ardents, on peut, en plaçant l'œil très-près de la surface, voir les images renversées de petits objets placés sur le bord opposé. — Un mur fortement échauffé par le soleil présente le même phénomène. M. Bigourdan a constaté, à Paris, que le soubassement de la Bourse, les murs des fortifications, manifestent le phénomène d'une manière remarquable quand on place l'œil assez près de la surface verticale échauffée, et qu'il se

¹ Mémoires de l'Institut, Académie des sciences, pour 1809.

trouve des objets à une petite distance de cette surface. Sur un terrain uni, comme une route, on peut aussi, en plaçant l'œil près du sol, voir l'image de pierres, de brins d'herbe, quand l'air est bien calme.

Wollaston, qui a aussi trouvé, à la même époque que Monge, l'explication du mirage, montrait par l'expérience suivante l'effet du décroissement continu de la densité des couches : On superpose avec précaution dans un vase de verre deux liquides capables de se combiner, comme l'alcool sur l'eau, l'eau sur l'acide sulfurique ou le sirop de sucre; les deux liquides se mélangent peu à peu à la surface de séparation, de manière que le passage de la densité de l'eau à celle de l'autre liquide se fait graduellement. On regarde ensuite des lettres à travers la couche mixte, et l'on voit, du côté du liquide le moins réfringent, leur image renversée.

2494. Mirage sur l'eau. — Le mirage se produit sur la mer, quand l'air plus froid que l'eau se trouve dans un calme parfait et s'échauffe à son contact. On voit alors les rivages, les navires éloignés, présenter leur image renversée plus ou moins distincte. La partie inférieure de trois images du soleil, dans la figure 1753, est due à un effet de mirage sur mer. On conçoit que, sur les eaux, le mirage se montre à des heures très-variables. On le voit souvent le matin, et nous en avons observé un cas bien caractérisé au mois d'octobre, vers 6 heures du matin, à l'embouchure de la Tamise. D'après MM. L. et Ch. Dufour, c'est aussi le matin que le mirage s'observe sur le lac de Genève, souvent il est pris pour un effet de réflexion sur la surface de l'eau; mais un semblable effet ne peut être qu'excessivement rare, la surface devant être d'un calme absolu, et la courbure de la terre rendant les images tellement déprimées qu'elles sont à peine reconnaissables. — Dans les régions polaires, sur la terre glacée ou sur la mer, le mirage se produit assez fréquemment, quand le soleil se montre avec quelque éclat, et échauffe la surface des eaux ou du sol. Scoresby a été témoin, dans les mers polaires, de nombreux effets de mirages dont plusieurs très-bizarres que nous allons citer.

2495. Mirage renversé, latéral. — Le mirage fait voir le plus souvent l'image au-dessous de l'objet; mais il peut arriver, quoique beaucoup plus rarement et principalement sur la mer, que l'image se forme en haut, auquel cas on a le *mirage inverse* ou *renversé*. M. Vince, de sa maison de Ramsgate, vit avec une lunette, en regardant du côté de Douvres, un navire qui se trouvait à l'horizon, reproduit en l'air et renversé, de manière que les extrémités des mâts de l'image et du navire se touchaient. Un jour, dans les mers du Groënland, le fils de Scoresby, séparé par une tempête, de la *Fama*, baleinier monté par son père, reconnut dans les airs l'image renversée et assez nette de ce navire. Scoresby vit aussi plusieurs fois, en l'air, deux images du même navire, l'une au-dessus de l'autre et renversées. Une fois, l'image la plus élevée était droite.

Pour que le mirage renversé se produise, il faut qu'il y ait à une certaine hauteur des couches d'air sensiblement horizontales, allant en diminuant de densité de bas en haut assez rapidement pour que les rayons lumineux soient

infléchis d'une manière prononcée. Ce n'est donc que dans des conditions atmosphériques exceptionnelles qu'il peut se produire.

Mirage latéral. — Il peut arriver près des côtes, ou dans les pays de montagnes, que l'air soit séparé jusqu'à une certaine hauteur, par un plan à peu près vertical, en deux parties, l'une échauffée par le soleil, l'autre dans l'ombre du rivage ou de quelque colline. Il peut se faire encore qu'une masse d'air ait reçu de la chaleur au contact du flanc d'une montagne, et l'air sera, dans une certaine étendue, partagé en couches à peu près verticales, et allant en décroissant de densité de la partie froide à la partie chaude. Si donc un observateur est placé dans le prolongement des couches de passage, il pourra voir, dans la partie chaude, l'image symétrique des objets situés dans la partie froide, à une grande distance du lieu qu'il occupe, comme s'il y avait un miroir vertical dans les couches de passage. Cette sorte de mirage se nomme *mirage latéral*; il est beaucoup plus rare que les autres, et dure peu.

MM. Soret et Jurine en ont observé un cas remarquable, sur le lac de Genève, près de la côte de Belle-Rive. Ils observaient avec une lunette, dans la direction *ob* (fig. 1756), une barque *b* située à 8 kilomètres, et s'avançant de leur côté. La barque prenant successivement les positions *c* et *d*, ils virent des images *c'* et *d'* parfaitement nettes, et même visibles à l'œil nu quand les

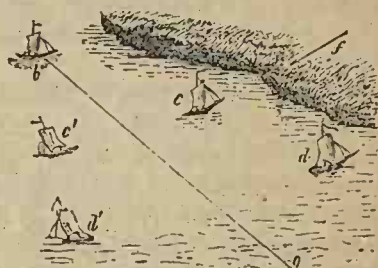


Fig. 1756.

voiles étaient éclairées par le soleil. L'air situé à gauche de la ligne *ob* recevait directement les rayons solaires dans la direction *f*, tandis que l'air situé à droite de cette ligne était resté dans l'ombre une partie de la matinée, et il devait y avoir, dans la direction *ob*, une surface à peu près verticale s'élevant à une certaine hauteur, et séparant l'air chaud de l'air froid.

On explique par le mirage, le phénomène de la *fata Morgana*, propre au détroit de Messine. Quand le soleil est à 45° environ de hauteur, en regardant la mer, des collines qui dominent Messine, on voit quelquefois, en l'air et à une grande distance, des pilastres, des arcades, des châteaux, des navires, plus ou moins déformés, droits, renversés, inclinés, et changeant de position et d'aspect d'un instant à l'autre. Ce phénomène, dont la magnificence paraît avoir été beaucoup exagérée par les voyageurs, se voit aussi de Naples, de Reggio, et de plusieurs autres points de la côte de Sicile. On peut l'expliquer par la déviation des rayons lumineux partant d'objets réels, et traversant des masses d'air de température différente juxta-posées accidentellement dans des positions très-diverses, et produisant l'effet de miroirs placés dans différentes directions. La mobilité des images vient de ce que ces masses d'air se déplacent et se mélangent peu à peu. Brydone, qui a été témoin du phénomène, en 1770, remarque qu'il se produit

après que l'air, fortement échauffé, a été agité par des vents violents qui l'ont ensuite abandonné dans un calme plat. On conçoit que les masses d'air très-inaégalement échauffées, à cause de la configuration des côtes du détroit, puissent être d'abord simplement juxtaposées, et donner lieu aux effets de réfraction les plus variés.

2196. Déplacements, suspensions. — Les objets terrestres placés près de l'horizon peuvent être, dans certaines circonstances, déplacés, quelquefois latéralement près des montagnes, mais le plus souvent dans le sens vertical, auquel cas ils paraissent plus ou moins élevés au-dessus de leur position réelle. L'objet peut être vu double, certains rayons arrivant à l'œil sans avoir été sensiblement déviés, tandis que d'autres décrivent à travers des couches de densité croissante une courbe assez prononcée pour que la tangente au point d'arrivée fasse un angle sensible avec le rayon direct. Ces phénomènes ont été souvent désignées sous le nom de *mirage*, mais ils se distinguent du mirage proprement dit en ce que l'image n'est pas renversée; ce qui indique l'absence de réflexion. Citons quelques exemples.

Biot et Arago, en Espagne, observant de la montagne de Desierto de las Palmas (royaume de Valence) une lumière placée à une distance de 161 kilomètres et à 420 mètres de hauteur, sur la montagne de Campwey, dans l'île d'Yviza, virent plusieurs fois cette lumière accompagnée de plusieurs images situées sur la même verticale, et se formant et disparaissant dans un ordre quelconque. Le lendemain matin, la mer était couverte de brouillard précipité pendant la nuit, indiquant que l'air avait été très-humide pendant l'apparition des images.

En 1858, M. Parès, étant à Aigues-Mortes, aperçut un soir des villages et des arbres au-dessus de dunes qui les cachent habituellement. — Le Dr Vince, étant à Ramsgate, à 24 mètres au-dessus de la mer, vit, le 6 août 1806, à 7 heures du soir, le château de Douvres très-distinctement jusqu'à sa base, comme s'il eût été transporté sur les collines qui le cachent ordinairement presque en entier. Douvres est à 20 kilomètres de Ramsgate, et un tiers de cette distance, du côté de Ramsgate, est occupé par la mer. — M. de Bréauté aperçut un jour, de Dieppe, les côtes d'Angleterre, quoiqu'elles soient cachées par la courbure de la mer. On a vu quelquefois, de la rive anglaise, les côtes de Calais et de Boulogne singulièrement rapprochées. Les marins ont été longtemps intrigués par l'apparition fantastique, entre l'île d'Aland et la côte suédoise, d'une île qui disparaissait quand on voulait en approcher. L'illusion était produite par un écueil situé à une petite profondeur, et qui paraissait élevé au-dessus de la mer par la courbure des rayons lumineux dans l'atmosphère.

M. Andraud vit, en 1852, d'une distance de 40 kilomètres, le clocher de Strasbourg illuminé un jour de fête publique. L'image, d'une grosseur colossale, paraissait n'être qu'à 2 kilomètres, et était assez nette pour qu'on pût distinguer les couleurs des différentes parties de l'illumination. — M. Blondat a vu, d'une maison de la rue de Fleurus, à Paris, le dôme de la Sorbonne et les

toits des maisons voisines, à une certaine hauteur dans l'air, en même temps qu'il voyait les objets réels. La distance verticale de l'image *suspendue*, au dôme réel était égale à deux fois la hauteur de ce dernier¹. Ce phénomène, désigné sous le nom de *suspension*, a été observé dans bien d'autres cas; on a vu des villes reproduites ainsi dans les airs d'une manière assez distincte pour qu'on pût en reconnaître les principaux édifices. Les exemples d'apparition de villes aériennes, d'armées et même de batailles au milieu des airs, que l'on trouve dans les récits du moyen âge, s'expliquent par des effets de *suspension*. En voici un cas assez récent : en septembre 1835, on vit plusieurs jours de suite, en Angleterre, vers 5 heures du soir, des corps de cavalerie défilér dans les airs au milieu d'un ciel qui semblait couvert de vapeurs assez épaisses. On distinguait parfaitement le cavalier et son cheval, et même l'allure de ce dernier².

§ 2. — RÉFRACTION DANS LES MILIEUX TERMINÉS PAR DES SURFACES PLANES

I. Rayons entrant par une surface plane, dans un milieu indéfini.

2497. Caustiques par réfraction. — Nous allons d'abord énoncer le principe général suivant, établi par Malus et analogue à celui qui se rapporte à la réflexion sur les surfaces courbes (2457). Quand des rayons émanant d'un point lumineux tombent sur la surface plane ou courbe qui sépare deux milieux transparents, il existe toujours sur cette surface deux systèmes de courbes, dites *lignes de réfraction*, telles que tous les rayons réfractés sur une même courbe forment une surface développable, en se coupant deux à deux. L'ensemble des *arêtes de rebroussement* des surfaces développables correspondant à un même système de courbes forme une surface *caustique de réfraction* ou *diacaustique*, et les intersections des deux *diacaustiques* forment des *lignes focales*, ou des *foyers* quand ce sont des points.

Cas des surfaces de révolution. — Dans le cas d'une surface de révolution sur l'axe de laquelle se trouve le point lumineux, l'un des systèmes de courbes est formé par les circonférences perpendiculaires à l'axe, chaque surface développable est un cône, et la caustique se réduit à une ligne droite qui est une portion de l'axe. L'autre système de courbes est formé par les méridiennes; les surfaces développables sont des plans, et l'arête de rebroussement formée par la rencontre deux à deux des rayons réfractés sur une même ligne de réfraction, est une courbe plane. En faisant tourner cette courbe autour de l'axe, on obtient la seconde surface caustique. Les points où elle rencontre l'axe sont alors des foyers.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 102, et XLI, p. 87.

² *Traité de météorologie*, par J.-G. Garnier, p. 404.

2498. Cas d'une surface plane. — Ce que nous venons de dire relativement à deux milieux séparés par une surface de révolution s'applique au cas où cette surface est plane. L'axe de révolution est alors représenté par la perpendiculaire abaissée du point lumineux sur la surface, et les lignes de réfraction perpendiculaires à l'axe, par des circonférences ayant leur centre au pied de cette perpendiculaire. Le second système de lignes est formé par des droites passant par ce pied. Il est évident que les rayons réfractés sur une de ces droites seront, en entrant dans un milieu *plus réfringent*, moins divergents que les rayons incidents; mais ils seront toujours divergents, parce que l'angle de réfraction augmente en même temps que l'angle d'incidence (2484). Ces rayons ne se rencontreront pas en un même point, comme dans le cas de la réflexion, et ils formeront une *courbe caustique*, en se rencontrant deux à deux.

2499. Forme de la caustique. — Soit un rayon incident sm (fig. 1757) pénétrant dans un milieu plus réfringent que celui d'où il vient, et mR le rayon réfracté. Appelons p la distance so ; i et r , les angles d'incidence et de réfraction; n l'indice de réfraction relatif des deux milieux, et cherchons la distance $or = p'$ de la surface au point r , où le rayon réfracté prolongé coupe la normale so .

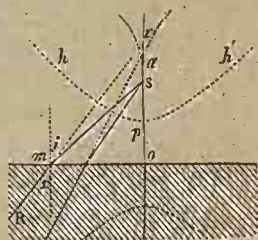


Fig. 1757.

Le triangle rectangle rmo donne $\overline{ro}^2 = p'^2 = \overline{mr}^2 - \overline{mo}^2$, et il faut déterminer mr et mo . Or, le triangle rmo donne $\overline{mr} = \frac{mo}{\sin r} = \frac{n \cdot mo}{\sin i}$. Substituant dans la valeur de p'^2 , il vient $p'^2 = \overline{mo}^2 \left(\frac{n^2 - \sin^2 i}{\sin^2 i} \right)$. La valeur de mo s'obtient au moyen du triangle mso , qui donne

$$p^2 = \overline{so}^2 = \overline{sm}^2 - \overline{mo}^2 = \frac{\overline{mo}^2}{\sin^2 i} - \overline{mo}^2, \quad \text{d'où} \quad \overline{mo}^2 = \frac{p^2 \sin^2 i}{1 - \sin^2 i}.$$

Portant cette valeur dans celle de p' , il vient enfin

$$p' = \pm p \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 i}{1 - \sin^2 i}}.$$

Comme les rayons sont toujours divergents, le point r est du même côté que s . et le foyer a est virtuel. Si donc nous convenons de prendre p' positif du côté où se formerait un foyer réel, c'est-à-dire du côté opposé à p , nous devons adopter la valeur négative du radical, l'autre valeur ne convenant pas à la solution physique de la question. Comme n est plus grand que l'unité, et $\sin i$ au plus égal à 1, p' est toujours réel. Le numérateur étant plus grand que le dénominateur, quand $\sin^2 i$ augmentera, la valeur du rapport sous radical augmen-

tement, et en partie à travers une lame de verre épaisse et oblique, on voit que les deux parties du trait ne sont pas sur le prolongement l'une de l'autre.

Pour calculer le déplacement latéral, on abaisse I_p (fig. 1760) perpendiculaire à RE prolongé, et le triangle EIp donne

$$\overline{I_p} = \overline{IE} \sin \overline{IEp} = \overline{IE} \sin (i - r) = \overline{IE} (\sin i \cos r - \cos i \sin r).$$

Remplaçant $\sin r$ et $\cos r$ par leurs valeurs en fonction de $\sin i$, tirées de la relation $\sin i = n \sin r$, il vient $I_p = \overline{IE} \frac{\sin i}{n} (\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i)$. Pour évaluer \overline{IE} , désignons par e l'épaisseur Iq . Le triangle IEq donne

$$\overline{IE} = \frac{e}{\cos r} = \frac{ne}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}. \text{ Substituant, il vient enfin}$$

$$I_p = e \sin i \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 i}{n^2 - \sin^2 i}} \right),$$

formule qui montre que le déplacement est proportionnel à l'épaisseur, et donne $I_p = 0$, pour $i = 0$, et $I_p = e$, pour $i = 90^\circ$. — Quand n est moindre que 1, c'est-à-dire quand le milieu traversé est moins réfringent que le milieu environnant, la valeur de I_p devient imaginaire quand on a $\sin i > n$; en effet, nous savons que $\sin i = n$ correspond alors à l'angle limite.

2503. Cas de plusieurs lames à faces parallèles. — Si le rayon traverse plusieurs lames à faces parallèles *ne se touchant pas*, il est facile de voir que le rayon émergent est encore parallèle au rayon incident, même si les lames ne sont pas parallèles entre elles, et que le déplacement latéral est égal à la somme algébrique des déplacements produits par chaque lame.

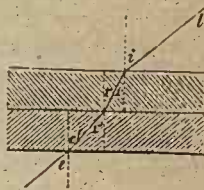


Fig. 1761.

Relation entre l'indice de réfraction relatif et les indices absolus.

— L'expérience montre que les résultats sont les mêmes quand les lames sont appliquées les unes sur les autres, sans interruption et sans interposition d'aucune espèce de substance; d'où l'on doit conclure que l'indice de réfraction relatif de deux substances contiguës est égal au rapport de leurs indices absolus. En effet, soit i, r, r', e (fig. 1761) les angles faits avec la normale, par le rayon qui traverse deux lames superposées. On aura, en appelant n, n' les indices absolus des deux milieux, $\sin i = n \sin r$; $\sin e = n' \sin r'$; et comme l'expérience montre que les rayons émergent et incident sont parallèles, on a $e = i$, et, par conséquent, $n \sin r = n' \sin r'$; d'où $\frac{\sin r'}{\sin r} = \frac{n}{n'}$. Or, le premier membre n'est autre chose que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction d'un rayon passant de l'une des lames dans l'autre; le rapport $n : n'$ des indices absolus des deux substances représente donc leur *indice relatif*, en mettant en numérateur le plus grand indice n qui correspond à l'angle le plus

petit r . Nous verrons que les théories des ondulations et de l'émission conduisent à ce même résultat.

Il résulte de là que, si un rayon traverse plusieurs lames parallèles, il fera avec la normale, dans la dernière, le même angle φ que s'il n'avait traversé que cette lame. En effet e étant l'angle d'émergence et v l'indice de la dernière lame, on a $\sin e = v \sin \varphi$; et comme $i = e$, $\sin i = v \sin \varphi$, comme si le rayon incident pénétrait directement dans la dernière lame.

2501. Réflexions multiples dans les miroirs de verre étamé. — Nous avons dit (2434) que les miroirs de glace donnent plusieurs images. Pour nous rendre compte de ce résultat, considérons un rayon incident an (fig. 1762) tombant sur la glace LL' étamée en dessous. Ce rayon se réfléchit d'abord en n sur la première surface, en donnant une image a' symétrique du point lumineux a ;

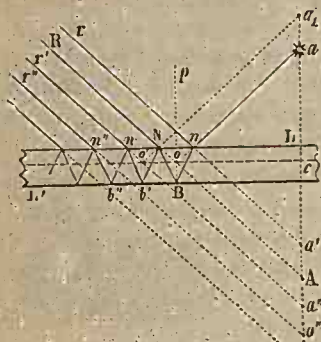


Fig. 1762.

mais il ne se réfléchit qu'en faible proportion; la plus grande partie pénètre dans la lame de verre et se réfléchit en dedans au point B , sur la surface étamée. Le rayon réfléchi, arrivé en N , émerge en partie, et prend la direction NR parallèle à nr , car tout est symétrique par rapport à la normale Bp . Ce rayon est dans le même cas que s'il se réfléchissait au point de rencontre o des rayons an et NR , sur une surface oc parallèle à Ln ; l'image formée par les rayons réfléchis en B est donc en A , point symétrique de a par rapport au plan oc . Le rayon réfléchi BN n'émerge pas entièrement, une partie se réfléchit en dedans suivant Nb' ;

se réfléchit de nouveau en b' et vient émerger en partie en n' , en donnant un rayon $n'r'$ qui est dans le même cas que s'il était réfléchi en o' , et provenait d'un rayon incident a_1N partant du point a_1 , symétrique du point A par rapport à la surface Ln . Il y aura donc une troisième image a'' symétrique de a_1 par rapport à co ; et ainsi de suite. — L'expérience se fait facilement avec une bougie dont on cache la flamme par un écran ne laissant passer la lumière que par une fente étroite; les images de la fente paraissent les unes derrière les autres, et l'on peut en distinguer jusqu'à six. La plus brillante est la seconde A ; les suivantes n'étant formées que par des rayons dont une partie seulement a été réfléchie en dedans à chaque émergence, sont de plus en plus faibles. La première est à peu près de même éclat que la troisième. Si la lame de verre a une teinte bleuâtre, la première image seule ne représente pas cette teinte, comme on devait s'y attendre. Les images sont d'autant plus séparées les unes des autres, qu'on les observe plus obliquement; on n'en distingue qu'une seule, quand on regarde suivant la normale qui passe par la flamme.

Quand on fait l'expérience avec les glaces les mieux polies, et quand la flamme

est à plusieurs mètres, on remarque des anomalies singulières, suivant le point d'incidence des rayons qui vont à l'œil. Les images sont tantôt très-distantes les unes des autres, tantôt superposées, ou même dans un ordre inverse. Il suffit quelquefois de déplacer l'œil latéralement, de manière à changer le point d'incidence sans modifier les angles d'incidence, pour obtenir ces diverses anomalies. Elles s'expliquent en considérant que le verre coulé en glace ne peut être homogène, d'où résultent pour certains rayons des déviations irrégulières. En outre, la surface n'est pas parfaitement plane, et nous avons vu, en parlant du sidérostas (2456), combien il est difficile de l'obtenir telle, même quand il s'agit de petites dimensions.

2505. DES PRISMES. — On nomme *prisme*, en optique, un corps transparent terminé par deux surfaces planes qui se coupent. Ce nom vient de ce que le corps devant être limité du côté opposé à l'arête d'intersection, on le termine ordinairement par une surface plane parallèle à cette arête, ce qui lui donne la forme du prisme triangulaire de la géométrie. En optique, quand on parle d'un prisme, on entend toujours un prisme triangulaire, à moins qu'on n'avertisse du contraire. On nomme *arête* ou *sommet* du prisme, l'intersection des deux faces que traverse le rayon lumineux; la troisième face, qui ne sert pas et qui pourrait être dépolie ou noircie, se nomme la *base* du prisme. On voit que ce mot n'a pas ici la même signification qu'en géométrie. La figure 1763 représente un prisme P monté sur un pied; il peut tourner sur lui-même et s'incliner plus ou moins, de manière à se prêter facilement aux expériences.



Fig. 1763.

2506. Effet du prisme sur la direction des rayons lumineux. — Un prisme dévie, du côté de sa base, les rayons qui le traversent. En effet, soit le rayon incident *si* (fig. 1764). Ce rayon pénétrant, suivant *ii'*, en se rapprochant de la normale, vient frapper la seconde face en *i'*; là, il éprouve en sortant une nouvelle réfraction, dans laquelle il s'écarte de la normale; de sorte que ces deux déviations successives le rabattent vers la base BC.

Ce résultat ne paraît pas aussi évident quand l'angle A du prisme étant petit, le rayon réfracté *ii'* (fig. 1765) passe au-dessous de la normale *ni'* à la seconde face AC. Alors le rayon émergent se relève en s'écartant de la normale en *i'*, et il faut prouver qu'il se relève moins que ne s'est abaissé le rayon réfracté *ii'*. En effet, si la face AC était en *A'B'* parallèle à AB, le rayon émergent serait *i'e'*, parallèle au rayon incident *di*. Si maintenant nous ramenons la face *A'B'*, en AC, la normale tournera d'une quantité égale à l'angle A, et l'angle que fait le rayon réfracté *ii'* avec la normale, aura diminué de A. Si le rapport de l'angle d'émergence à l'angle que fait le rayon *ii'* avec la normale en *i'*, ne changeait pas, le rayon émergent resterait dirigé suivant *i'e'*. Mais comme l'angle diminue plus rapidement dans le milieu le plus réfringent que dans le moins réfringent (2484), le rayon émergent s'abaissera en *i'e* au-dessous de *i'e'*.

La déviation par le prisme se vérifie par l'expérience, en faisant passer un pinceau de rayons solaires à travers un prisme. On peut aussi regarder un point à travers le prisme; ce point paraît relevé vers le sommet, d'où l'on conclut que les rayons sont déviés vers la base. En effet, soit s un point lumineux (fig. 1766); le pinceau de rayons qui entre dans l'œil est $saco$, et le point s paraît relevé en s' sur le prolongement de la partie co . Comme le pinceau est très-fin, les rayons se croisent sensiblement en un même point s' , qui forme un foyer virtuel.

Nous supposons, dans ce qui précède, que le prisme est plongé dans un milieu, comme l'air, moins réfringent que lui. Si le milieu environnant était plus réfringent, les résultats seraient inverses, c'est-à-dire que le rayon serait dévié vers le sommet, comme on peut le reconnaître par les mêmes raisonnements que ci-dessus. On réalise un prisme moins dense que le milieu environnant, par exemple, en le construisant au moyen de lames de verre, le remplissant d'air et le plongeant dans l'eau.

2507. Conditions d'émergence. — L'angle d'incidence restant constant, l'angle d'émergence augmente évidemment en même temps que l'angle du prisme.

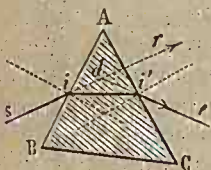


Fig. 1764.

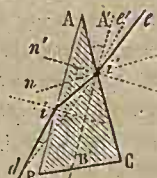


Fig. 1765.

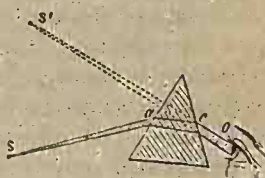


Fig. 1766

Il est facile de voir aussi que, le prisme restant le même, l'angle intérieur à la sortie augmente à mesure que le rayon incident se relève vers le sommet. Si donc nous supposons le prisme indéfini du côté de sa base, l'angle intérieur finira toujours par devenir égal à l'angle limite. Nous allons chercher l'angle que fera alors le rayon incident avec la normale.

Soit $nis = x$ (fig. 1767) cet angle, pour lequel l'angle $i\theta n$ est égal à l'angle limite θ , on a $\sin x = n \sin \theta$. Pour obtenir r en fonction de l'angle a et de l'indice de réfraction, remarquons que l'angle $i\theta$ des deux normales étant égal à a , le triangle $i\theta n$ donne $i\theta n = r = \theta - a$, et l'équation devient $\sin x = n \sin (\theta - a) = n (\sin \theta \cos a - \cos \theta \sin a)$; et, comme on a $\sin \theta = 1 : n$ (2485), d'où $\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - 1}$, il vient

$$\sin x = \cos a - \sin a \sqrt{n^2 - 1};$$

$\sin x$ est pris positivement dans l'angle niA , et négativement dans nib .

Discussion. — Si a augmente, $\cos a$ diminue, et $\sin a$ augmente; donc, $\sin x$ diminue, et par conséquent x , puisqu'il est moindre que 90° . Si l'on

suppose $a = 0$, on a $\sin x = 0$, en remplaçant $\sin a$ par $\sin 0 = 1 : n$, et $\cos a$ par $\cos 0 = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - 1}$. Le rayon limite est donc la normale ni , et les rayons incidents compris dans l'angle nib donnent seuls des rayons émergents. Ce résultat peut se voir directement, car le rayon si (fig. 1768) entre sans être dévié, et l'angle $ii'b$ des deux normales est égal à 0.

Si l'on fait $A > 0$, $\sin x$ devient négatif; le rayon limite est donc compris dans l'angle nib (fig. 1767). Si enfin on fait $A = 2\theta$, la formule devient $\sin x = \cos 2\theta - \sin 2\theta \sqrt{n^2 - 1}$. Or, $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta = \frac{2}{n^2} \sqrt{n^2 - 1}$, et $\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = \frac{n^2 - 1}{n^2} - \frac{1}{n^2} = \frac{n^2 - 2}{n^2}$; d'où $\sin x = -1$. Le rayon limite fait donc un angle droit avec la normale, du côté nib , il est donc couché en ib sur la face du prisme, et il n'y a que ce rayon qui puisse émerger. C'est ce qu'on peut voir directement, car, l'angle A étant égal à 2θ (fig. 1769), on a $oii' + oi'i = i'on = 2\theta$; et, les angles oii' , $oi'i$ ne pouvant être plus

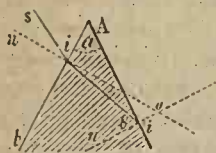


Fig. 1767.

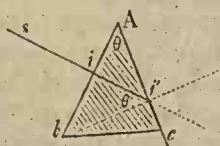


Fig. 1768.



Fig. 1769.

grands que l'angle limite, chacun d'eux est égal à 0. Les rayons incident et émergent ne peuvent donc être que bi et $i'c$.

Si l'on avait $A > 2\theta$, aucun rayon ne pourrait émerger, et, si la base du prisme était dépolie et noircie et s'il était placé transversalement dans l'ouverture d'un volet de manière à la fermer, il ne laisserait pénétrer aucun rayon de lumière. — Tous ces résultats peuvent se vérifier au moyen des prismes à angle variable que nous décrirons plus loin (2510). Dans le cas d'un prisme de verre, il suffit que l'angle soit de 84° pour qu'aucun rayon ne puisse émerger; un prisme d'eau devrait avoir un angle de 98° .

2508. Plan d'incidence oblique aux arêtes. — Dans ce qui précède, nous avons supposé le plan d'incidence perpendiculaire aux arêtes du prisme, auquel cas les rayons incident, réfracté et émergent, restent dans le plan d'une section droite. Considérons maintenant le cas des rayons incidents de direction quelconque, et cherchons quels sont ceux qui donneront des rayons émergents. Soit Adb (fig. 1770) la section droite qui passe par le point d'incidence; décrivons autour de la normale ni à la face d'entrée Ad , un cône clb dont l'angle au sommet oib soit égal à 2 fois l'angle limite θ . Tous les rayons qui, entrant par la face Ad , pénétreront dans le prisme, seront contenus dans ce cône, l'angle de réfraction dans le milieu le plus réfringent ne pouvant être plus grand que

l'angle limite. Abaissons Io' normal à Ao , et construisons le cône fIe , ayant aussi 2θ pour angle au sommet. Tout rayon réfracté entrant par le point I devra, pour émerger, être contenu dans ce dernier cône; car, tout rayon pris en dehors serait avec la normale, parallèle à Io' , un angle plus grand que l'angle limite. Il résulte de là que les rayons pouvant émerger, devant être contenus à la fois dans les cônes clb , fIe , perceront la face Ab dans la partie ce commune à ces deux cônes.

Comme tout est symétrique par rapport à la section droite Adb , ec partage par la moitié cette partie commune, qui est d'autant plus grande que ec est plus long. Pour évaluer ec , ou cle , remarquons que l'angle des deux normales, $o'Io$, étant égal à l'angle a du prisme, on a

$$o'Io = a = o'Ie + eIo - cle = 2\theta - cle, \text{ d'où } cle = 2\theta - a.$$

Si $a = 0$, l'angle $o'Io$ est aussi égal à 0 , et les arêtes Ie et Io des cônes se confondent avec les normales, qui font aussi entre elles l'angle θ . Parmi les rayons contenus dans la section droite, nIo est alors le dernier qui émerge, puisqu'il fait avec la normale à Ab un angle égal à θ ; ce que nous savions déjà. Si $a = 2\theta$, on a aussi $o'Io = 2\theta$; les deux cônes sont tangents suivant une arête, qui représente l'unique rayon qui peut émerger. Ce rayon fait l'angle θ avec la normale à Ad ; il provient donc d'un rayon incident couché sur Ad dans la section droite. Si a est plus grand que 2θ , les cônes ne se rencontrent pas, et il n'y a plus de rayon émergent.

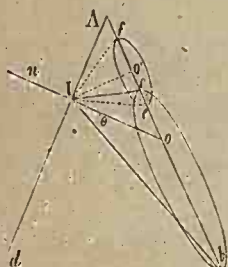


Fig. 1770.

2509. ANGLE DE DÉVIATION. — On nomme *angle de déviation*, l'angle $I'oR$ (fig. 1771) que fait le rayon émergent avec le prolongement du rayon incident. Dans la figure 1764, c'est l'angle rde . On voit que la déviation représente la quantité angulaire dont a tourné le rayon incident pour passer de la direction dr à la direction de .

Pour trouver la valeur de l'angle de déviation, D , appelons r, r' les angles faits par le rayon réfracté IE (fig. 1771) avec les normales aux deux faces, et a l'angle du prisme; le triangle IoE donne

$$I'oE \text{ ou } D = oIE + oEI = i - r + e - r';$$

et comme on a $ian = a = r + r'$, la valeur de D devient

$$D = i + e - a. \quad [1]$$

Dans le cas de la figure 1765, on aurait $D = i - e - a$.

Quand l'angle du prisme étant très-petit, le rayon passe à peu près perpendiculairement au plan bissecteur de cet angle, les angles faits avec les deux

normales sont eux-mêmes très-petits, on peut les prendre pour leurs sinus, et écrire $i = nr$, $e = nr'$; d'où $i + e = n(r + r') = na$; et la valeur de D devient

$$D = (n - 1)a. \quad [2]$$

formule fréquemment employée, qui montre que la déviation est alors sensiblement proportionnelle à l'angle du prisme.

2510. Prismes à angle variable. — Il est facile de voir que la déviation, pour une même incidence, doit augmenter avec l'angle du prisme. Cet angle augmentant de α (fig. 1771), et la face AB venant en AB' , l'angle r' augmente de la même quantité, puisque l'on a $r + r' = a$, et que r ne varie pas; donc, l'angle d'émergence devra augmenter d'une quantité plus grande que α , pour que le rapport des sinus reste constant (2484). Donc, quoique la normale à AB se déplace aussi de α , ce qui tend à relever le rayon émergent, ce rayon conservera toujours une partie de l'abaissement qu'il doit à l'accroissement α , et la déviation sera augmentée.

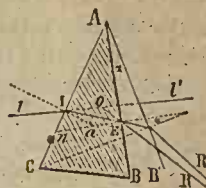


Fig. 1771.

Ce résultat se vérifie au moyen du prisme à angle variable (fig. 1772). Deux plaques parallèles aa' , bb' sont réunies par un fond horizontal oo' . Deux glaces oc , $o'c'$ peuvent glisser à frottement entre les deux plaques, en tournant autour des charnières oo' . On verse de l'eau dans l'intérieur de l'appareil, de manière à former un prisme liquide dont on peut faire varier l'angle, qui se mesure sur des divisions tracées aux extrémités de la plaque bb' , arrondies en arc de cercle.

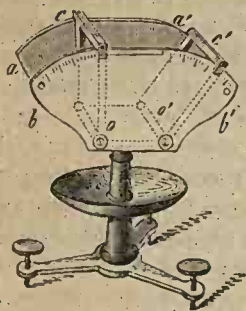


Fig. 1772.

La figure 1773 représente un prisme de verre à angle variable, imaginé par Boscovich : une échancrure cylindrique est pratiquée dans le prisme ABC parallèlement à ses arêtes, et contient un demi-cylindre cod de même substance que



Fig. 1773.

le prisme. Ce demi-cylindre peut tourner autour de son axe, de manière que la face cd forme successivement différents angles avec la face AC . Un rayon ie , en passant en o , n'éprouve pas de déviation, puisque les deux milieux qui se suivent sont également réfringents. Il est donc dans le même cas que s'il traversait un prisme formé d'une seule pièce, et ayant un angle égal à daC .

En traitant de l'*achromatisme*, nous aurons à décrire, sous le nom de diasporamètres, d'autres prismes à angle variable, dont l'angle se mesure avec une grande précision.

2511. Minimum de déviation. — Newton a reconnu que la déviation d'un rayon qui traverse un prisme prend une valeur *minimum* quand l'angle d'incidence est égal à l'angle d'émergence, ou, ce qui revient au même, quand le rayon réfracté dans le prisme est également incliné sur ses deux faces. Prouvons d'abord qu'il existe toujours une incidence pour laquelle il en est ainsi. Soit le rayon incident normal nI (fig. 1774), écartons-le peu à peu du sommet A ; l'angle r que fait le rayon réfracté avec la normale au point d'incidence ira en augmentant à partir de 0° , tandis que l'angle r' que fait ce rayon avec la normale à la face d'émergence ira en diminuant, puisque l'on a $r + r' = a$. Il arrivera donc un moment où ces deux angles seront égaux, et alors l'angle d'incidence sera égal à l'angle d'émergence.

Cela posé, les rayons incident et émergent II et ER , qui font des angles égaux avec la normale, font entre eux un angle de déviation *minimum*. En effet, supposons que le rayon incident vienne en $I'I$, la valeur de r diminuera, et r' augmentera de la même quantité; e augmentera donc aussi et deviendra plus grand que i . Mais on a $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin e}{\sin r'}$; $\sin e$ et $\sin r'$ étant plus grands que $\sin i$ et $\sin r$, il doit y avoir plus de différence entre $\sin e$ et $\sin r'$ qu'entre $\sin i$ et $\sin r$,

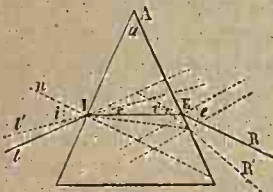


Fig. 1774.

et, à plus forte raison, entre e et r' qu'entre i et r , les arcs l'emportant d'autant plus sur leurs sinus qu'ils sont plus grands. Donc, e sera augmenté plus que i n'est diminué. La déviation, qui est égale à $i + e - a$ (2509), sera donc aussi augmentée. — Si le rayon incident venait au-dessous de II , on verrait de même que l'accroissement de i l'emporterait sur la diminution de e , et il y aurait encore augmentation de la déviation. Il y a donc *minimum* quand $i = e$.

2512. Trouver la condition pour qu'il y ait minimum. — On peut aborder la question autrement et se proposer de trouver la condition pour que la déviation soit *minimum*. M. E. Barry a donné pour cela une méthode élémentaire, d'où est imitée celle qui suit. Nous avons d'abord

$$D = i + e - a, \quad r + r' = a, \quad \sin i = n \sin r, \quad \sin e = n \sin r'.$$

Retranchant les deux dernières égalités membre à membre, il vient, en supposant $i > e$,

$$\sin i - \sin e = n (\sin r - \sin r'), \quad \text{ou}$$

$$\cos \frac{1}{2} (i + e) \sin \frac{1}{2} (i - e) = n \cos \frac{1}{2} (r + r') \sin \frac{1}{2} (r - r').$$

Remplaçant $i + e$ et $r + r'$ par leurs valeurs ci-dessus, on tire

$$\cos \frac{1}{2} (a + D) = n \cos \frac{1}{2} a \frac{\sin \frac{1}{2} (r - r')}{\sin \frac{1}{2} (i - e)}. \quad [1]$$

D sera *minimum* quand $\cos \frac{1}{2}(a + D)$ sera *maximum*, $\frac{1}{2}(a + D) = \frac{1}{2}(i + e)$ étant moindre que 90° . Il suffit donc de chercher la condition pour que le rapport des sinus du second membre soit *maximum*. Or, $\cos \frac{1}{2}a$ est évidemment plus grand que $\cos \frac{1}{2}(a + D)$; il faut donc, pour que l'égalité subsiste, que le rapport des sinus soit plus petit que l'unité, n étant plus grand que 1. Ce rapport atteindra donc sa valeur *maximum* quand il sera égal à 1, c'est-à-dire quand on aura $i = e$ et $r = r'$; $\cos \frac{1}{2}(a + D)$ sera alors *maximum*, et par conséquent D *minimum*. On aura alors, d'après la formule [1] (2509)

$$\sin \frac{a + D}{2} = n \sin \frac{a}{2}.$$

formule au moyen de laquelle on calculera la déviation *minimum* en fonction de l'indice de réfraction et de l'angle du prisme.

2513. Vérifications expérimentales. — Après avoir marqué le point où un pinceau de rayons solaires rencontre le mur de la chambre obscure on place dans le trajet de ce pinceau un prisme, qu'on fait tourner, toujours dans le même sens, autour d'un axe parallèle à ses arêtes. On voit le point de rencontre du faisceau dévié sur le mur se rapprocher peu à peu du point marqué, s'arrêter un instant; puis recommencer à s'en éloigner. La position du prisme pour laquelle la déviation est *minimum* se nomme *position Newtonienne*.

Pour vérifier que, lors du *minimum*, les pinceaux incident et émergent sont également inclinés sur les deux faces du prisme, on peut employer le goniomètre de Babinet (2447). On fixe un prisme *isocèle* sur le support central, de manière que la base opposée à l'arête de sommet soit exactement perpendiculaire à l'alidade; puis, mettant l'œil à la lunette mobile, on regarde à travers le prisme le réticule du collimateur. Faisant ensuite tourner peu à peu le prisme au moyen de l'alidade, on déplace la lunette mobile, de manière à maintenir toujours la coïncidence entre les fils des deux réticules, et l'on cherche par tâtonnement la position pour laquelle la lunette s'écarte le moins de la direction du collimateur. Quand il en est ainsi, la déviation est *minimum*, car elle augmente par de petits déplacements de l'alidade dans un sens ou dans l'autre. On trouve que l'alidade est alors également distante des deux lunettes; d'où l'on conclut que le rayon réfracté dans le prisme est perpendiculaire à l'alidade, et par conséquent parallèle à la face qui sert de base, et est inclinée de la même manière sur les deux autres faces, le prisme étant *isocèle*.

On voit que le goniomètre de Babinet peut servir à mesurer la déviation *minimum*. Quand on veut simplement obtenir cette mesure, on n'a plus besoin de placer la face qui sert de base perpendiculairement à l'alidade, et le prisme peut n'être pas *isocèle*.

Remarquons en terminant, que, si le prisme était formé d'une substance moins réfringente que le milieu ambiant, le rayon, qui serait dévié vers le sommet (2506), éprouverait un *maximum* de déviation, au lieu d'un *minimum*, quand les angles d'incidence et d'émergence seraient égaux. On le verrait par

les mêmes raisonnements que pour le *minimum*, en remarquant que r et r' seraient alors plus grands que i et e .

2514. CHAMBRES CLAIRES. — La *chambre claire*, ou *camera lucida*, nous offre une application des propriétés des prismes et du phénomène de la réflexion totale. Elle permet de dessiner les objets, en suivant sur le papier, le contour de leur image donnée par l'instrument. La *chambre noire* servant au même usage, on a nommé, par opposition, *chambre claire*, l'instrument dont nous allons nous occuper, les images se formant dans un espace éclairé.

Une chambre claire très-simple consiste en une glace sans tain, inclinée à 45° . En regardant verticalement, à travers cette glace, on voit une feuille de papier placée au-dessous, en même temps qu'on reçoit dans l'œil les rayons réfléchis provenant de la lumière émise par les objets éloignés, et formant une image virtuelle qui se projette sur le papier. Mais comme le dessinateur doit être placé du côté opposé à ces objets pour ne pas intercepter les rayons qui en viennent, il voit l'image *renversée*, ce qui est incommode pour dessiner. Wollaston obtient l'image droite en employant deux réflexions, et il évite la perte de lumière en employant la réflexion totale.

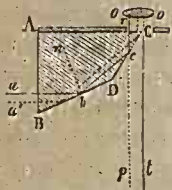


Fig. 1775.

Chambre claire de Wollaston. — Cet instrument consiste en un prisme horizontal quadrangulaire $ABDC$ (fig. 1775), présentant un angle droit A et un angle très-obtus D . La face AB , à peu près verticale, est tournée du côté des objets à dessiner, de manière que les rayons entrants sont à peine déviés. Ces rayons éprouvent ensuite sur les faces BD et DC des réflexions totales et sortent à

peu près normalement près du bord de la face AC . L'œil qui reçoit ces rayons voit alors l'image des objets, dans le prolongement p des rayons émergents. L'œil doit être placé très-près de l'angle C , de manière que la pupille oo dépasse un peu cette face, et reçoive des rayons directs, tels que t , venant du papier. On pourra donc suivre le contour de l'image, avec la pointe d'un crayon. L'observateur, placé du côté C , n'intercepte pas les rayons incidents, et voit l'image droite; les rayons tels que a' qui émanent des parties inférieures des objets, sortant plus près de l'angle C que ceux, tels que a , qui viennent des parties supérieures. — On donne à l'image et au papier à peu près le même éclat en cherchant à présenter aux rayons directs et aux rayons réfléchis, qui ne passent pas par les mêmes points, une partie plus ou moins grande de l'ouverture de la pupille.

Il est facile de trouver la valeur à donner à l'angle D , pour qu'il y ait réflexion totale en b et c . L'angle abn devant être plus grand que l'angle limite, il en est de même de l'angle B qui lui est égal, puisque ab est perpendiculaire à AB . Il suffit donc que l'angle B soit plus grand que 42° , angle limite du verre. On fait les angles B et C de $67^\circ 30'$, l'angle D est alors de 135° , et le rayon cr sort verticalement.

2515. Chambre claire d'Amici. — Il faut une certaine habitude pour placer l'œil convenablement sur le bord du prisme de Wollaston, malgré la précaution que l'on prend d'appliquer sur la face AC une plaque de cuivre percée d'un trou par lequel on doit regarder. La chambre claire d'Amici (fig. 1776) est d'un usage plus commode; mais l'image est plus faible, une des réflexions se faisant à la première surface d'une lame transparente. Un prisme isocèle horizontal ABC s'appuie par une arête sur une lame de verre à faces bien parallèles faisant un angle de 45° avec la face BC. L'œil placé en *o* peut voir à travers cette lame, dans la direction *op*, la pointe du crayon avec lequel on dessine, et en même temps il reçoit dans la même direction le rayon *ainero* venant d'un point de l'objet, et réfléchi en *n*, puis en *r* sur la face supérieure de la lame de verre. Comme les rayons qui viennent du crayon et ceux qui émanent de l'objet, entrent dans la pupille par le même point, il n'y a plus de difficulté à placer l'œil. La lame de verre et le prisme sont enveloppés d'une feuille de métal qui laisse à découvert la face AB par laquelle entrent les rayons qui viennent des objets, et la face LL, par laquelle on voit le papier sur lequel on dessine. En *o* est une petite ouverture, à laquelle on applique l'œil.

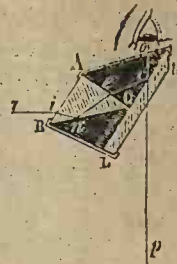


Fig. 1776.

Disposition de l'appareil. — La figure 1777 représente la disposition de la chambre claire. Le prisme P est soutenu par une tige *t* composée de trois parties rentrant les unes dans les autres comme les tuyaux d'une lunette, et à l'extrémité de laquelle il peut tourner dans tous les sens. La tige *t* est attachée par une charnière à une pince à vis V que l'on fixe au bord de la table. Un levier, articulé avec un anneau à vis de pression *r*, permet d'arrêter la tige dans une position fixe.



Fig. 1777.

On commence par régler la distance du prisme au papier, de manière à obtenir un dessin de la grandeur que l'on désire; les dimensions de l'objet et du dessin étant en raison inverse de leurs distances au prisme. Mais, quand ces distances ne sont pas égales, les pinceaux coniques qui entrent dans l'œil, venant de l'objet et de la pointe du crayon, ne sont pas également divergents; et l'on ne peut voir nettement en même temps l'image et le crayon. On remédie à cet inconvénient en disposant dans le trajet d'un de ces pinceaux, des verres lenticulaires, *c*, en nombre convenable pour lui donner le même degré de divergence qu'à l'autre.

L'éclat de l'image et celui du papier ne doivent pas trop différer. Si l'image est faible, on projette sur le papier l'ombre d'un écran, on emploie des papiers gris, ou bien on amène dans le trajet des rayons qui en proviennent un ou

plusieurs verres bleus, *b*, qui en affaiblissent l'éclat. Ces verres peuvent aussi être amenés devant le prisme pour amortir l'éclat des rayons qui viennent de l'objet, quand l'image est trop brillante. Il faut, du reste, une assez grande habitude pour se servir facilement de l'instrument, ainsi que de toutes les chambres claires, dont il existe plusieurs autres espèces; mais, comme elles s'appliquent particulièrement aux microscopes, nous les décrirons quand nous traiterons de ces instruments.

§ 3. — MILIEUX TERMINÉS PAR DES SURFACES COURBES. — LENTILLES

I. Rayons entrant par une surface sphérique dans un milieu indéfini.

2516. Partie de surface sphérique à très-petite ouverture. — Soit *mA* (*fig.* 1778) une surface sphérique séparant deux milieux contigus, et supposons que le milieu qui est du côté concave de la surface soit le plus réfringent. Soit *s* un point lumineux pris dans le milieu le moins réfringent. Supposons que l'arc *mA*, ou l'angle d'ouverture que cet arc mesure, soit infiniment petit, et joignons le point *s* au centre *o*. La ligne *so* se nomme l'axe relatif au point *s*. Un rayon incident, *sm*, se réfractera suivant *mf*, en se rapprochant de la normale, et viendra, en général, couper l'axe *so* en un point *f*, dont nous allons chercher la distance au point *A*.

Abaissons sur les rayons incident et réfracté les perpendiculaires *oP*, *oO*, et considérons *Am* comme une ligne droite; les triangles rectangles *sAm*, *soP*, semblables comme ayant l'angle *s* commun, donnent *so* : *sm* = *oP* : *Am*, ou *p* + *R* : *p* = *oP* : *Am*, en posant *sm* = *sA* = *p*, et *om* = *R*. Les triangles semblables *foO*, *fAm* donnent de même *fo* : *fA* = *oO* : *Am*, ou *p'* - *R* : *p'* = *oO* : *Am*, en posant *fA* = *fm* = *p'*. Divisant les deux proportions terme à terme, il vient $\frac{p+R}{p'-R} : \frac{p}{p'} = \frac{oP}{oO} : 1$. Or, *oP* et *oO* sont les sinus des angles d'incidence *Pmo* et de réfraction *Omo*, dans la circonférence de rayon *mo*; leur rapport est donc égal à l'indice de réfraction *n*. On a donc $\frac{p+R}{p'-R} = \frac{p \cdot n}{p'}$. En faisant disparaître les dénominateurs, et divisant tous les termes par *pp'R*, il vient enfin

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{R}. \quad [1]$$

Cette formule peut aussi se trouver par la méthode que nous avons employée pour les miroirs (2463) : dans le triangle *mos*, on a l'angle extérieur *Pmo* = *i* = *s* + α ; et, dans le triangle *mof*, α = *r* + *f*. Comme les angles *s*, α et *f* sont infiniment petits, on peut les remplacer par leur sinus; et l'on a

$$\sin i = \sin s + \sin \alpha; \quad \sin \alpha = \sin r + \sin f; \quad \text{et de plus } \sin i = n \sin r.$$

Éliminant $\sin i$ et $\sin r$, et remplaçant $\sin s$, $\sin \alpha$ et $\sin f$ par leur valeur $m\Lambda : p$, $m\Lambda : R$ et $m\Lambda : p'$, on retrouve la formule [1].

Aberration de sphéricité. — La valeur de p' tirée de la formule [1] étant indépendante de l'angle d'incidence considéré, on voit que tous les rayons réfractés vont couper l'axe so en un même point ou *foyer f*. Ce résultat n'est qu'approximatif quand l'arc $m\Lambda$, au lieu d'être infiniment petit, est seulement très-petit. Les rayons incidents les plus éloignés de l'axe donnent alors des rayons réfractés qui coupent cet axe plus près de Λ , et il se forme une surface caustique présentant un sommet tourné vers le centre. Ce résultat constitue l'*aberration de sphéricité*.

Ce qui précède s'applique à une portion très-petite voisine du sommet, d'une surface de révolution quelconque dont l'axe passerait par le point lumineux. R est alors le rayon de la sphère osculatrice au point Λ .

2517. Discussion. — Si nous posons $\frac{nR}{n-1} = a$, la formule [1] devient

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n}{a}; \quad \text{d'où} \quad p' = \frac{anp}{np - a} = \frac{an}{n - \frac{a}{p}}. \quad [2]$$

1° Supposons que la surface soit convexe du côté du point lumineux, et que celui-ci soit situé dans le milieu le moins réfringent. Si les rayons incidents sont parallèles, on a $p = \infty$, et il vient $p' = a$. Le foyer F se nomme alors *foyer principal*, et sa distance

à la surface sphérique est $a = \frac{nR}{n-1}$,

ce qui peut se voir directement. En effet, dans ce cas, l'angle d'incidence est égal à l'angle $mo\Lambda$, et l'on a $mo\Lambda = i = r + m\Lambda A$, ou, en

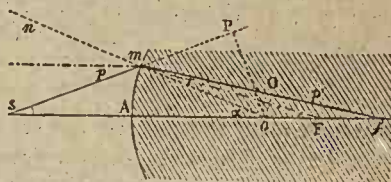


Fig. 1778.

prenant les *sinus* pour les angles, $\sin i = \frac{1}{n} \sin i + \sin m\Lambda A$. Remplaçant

$\sin i$ ou $\sin mo\Lambda$, et $\sin m\Lambda A$ par leurs valeurs $\frac{m\Lambda}{R}$ et $\frac{m\Lambda}{p'}$, on tire

$$p' = \frac{nR}{n-1}.$$

Si le point s se rapproche, p diminuant, la valeur [2] de p' augmente; ce qui peut se voir sur la figure; car, à mesure que le point s se rapproche, l'angle smn augmentant, il doit en être de même de l'angle omf ; le rayon réfracté se relève donc et va couper l'axe à une plus grande distance. Quand on a $a : p = n$, d'où $p = a : n$, p' est infini; les rayons réfractés sont donc parallèles à so . Si p diminue encore, la valeur de p' devient négative; ce qui veut dire que les rayons réfractés ne se rencontrent plus effectivement; leurs prolongements

forment alors un foyer virtuel placé du côté de s , et qui se rapproche du point A en même temps que le point lumineux. Enfin, quand on a $p = 0$, on a aussi $p' = 0$.

Si les rayons incidents sont convergents, il faut faire p négatif, et l'on voit que le foyer est toujours réel, et que p' diminue et devient nul avec p .

2^o Si la surface est *concave*, il faut changer le signe de R , et par conséquent celui de a , et l'on a alors $p' = \frac{-anp}{np+a}$; quantité toujours négative tant que p reste positif, et dont la valeur absolue diminue et devient nulle en même temps que p . Le foyer est donc toujours virtuel. — Si p est négatif, c'est-à-dire si les rayons incidents sont convergents, p' est positif, et le foyer est réel quand on a $p < (a : n)$.

3^o Si la surface était plane, il faudrait poser $R = \infty$, et par conséquent $a = \infty$, et l'on aurait $p' = -np$, comme nous l'avons déjà vu (2499). Si $p = \infty$, on a aussi $p' = \infty$; les rayons restent donc parallèles.

4^o Si nous faisons $n = -1$, la formule devient $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{-2}{R}$, ou $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$ suivant que la surface est convexe ou concave. On retrouve donc les formules des miroirs sphériques, comme on devait s'y attendre.

5^o Nous avons encore à considérer le cas où le milieu dans lequel pénètrent les rayons, est moins réfringent que celui d'où ils partent; alors il faut supposer $n < 1$. La formule [1] donne, en supposant R positif, c'est-à-dire la surface convexe, $p' = \frac{-nR}{(1-n) + \frac{R}{p}}$. Pour $p = \infty$, on a $p' = -\frac{nR}{1-n}$,

valeur négative; le foyer principal est donc virtuel. Si p diminue, la valeur absolue de p' diminue aussi, pour devenir nulle en même temps que p . Si la surface est concave du côté du point lumineux, il faut faire R négatif; la valeur de p' devient $p' = \frac{nR}{(1-n) - \frac{R}{p}}$, et l'on voit qu'elle est positive, et que le

foyer est réel, jusqu'à ce qu'on ait $p = \frac{R}{1-n}$, auquel cas on a $p' = \infty$.

Pour des valeurs plus petites de p , le foyer est virtuel. — Il est à remarquer que ces derniers résultats sont les mêmes que lorsque les rayons sont convergents et viennent du milieu le moins réfringent. Cela devait être, puisque les rayons suivent toujours la même route, quel que soit le sens de leur propagation (2484); seulement, il faut observer que la concavité et la convexité doivent toujours être considérées par rapport au point de concours des rayons incidents, que ce point soit réel ou virtuel. Du reste, tout cela peut se voir en construisant le rayon réfracté.

2518. Vérifications expérimentales. — Tous les résultats qui précèdent peuvent se vérifier par l'expérience, au moyen d'une cuve rectangulaire ABCD

(fig. 1779), dont trois faces latérales sont formées de glaces. Au milieu de la face AB, qui est opaque, on visse successivement des cylindres, *ab*, fermés par une lame de verre sphérique convexe ou concave à faces bien parallèles. On remplit la cuve d'eau, puis on fait tomber sur la surface courbe *ab*, des rayons parallèles, divergents, ou convergents, et l'on observe leur marche dans le liquide, soit au moyen d'un écran en verre dépoli *e*, soit en troublant l'eau, de manière à distinguer directement la marche des rayons. Comme la déviation est assez faible, il est bon de relever d'abord, sur l'écran *e*, le diamètre de la section du faisceau à différentes distances de AB, quand il n'y a pas d'eau, pour le comparer ensuite à celui qu'on observe aux mêmes distances, quand la cuve est remplie. Les distances se mesurent sur la règle AD, et le diamètre du faisceau, sur une échelle diamétrale tracée sur l'écran.

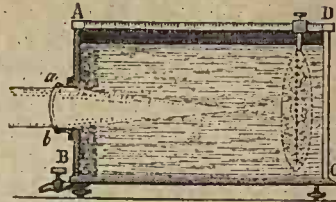


Fig. 1779.

2519. Objets vus dans un milieu terminé par une surface sphérique. — Supposons d'abord que la surface soit convexe; alors chaque point de l'objet *ac*, placé dans le milieu (fig. 1780), forme sur l'axe qui lui correspond, un foyer virtuel situé entre ce point et la surface. Ce foyer est le sommet, tourné vers le centre, d'une caustique de révolution. Soient *oa* et *oc* les axes passant par les extrémités *a* et *c* de l'objet; si nous menons, des bords de la pupille, des rayons tangents à la surface caustique *a'*, nous aurons le pinceau réfracté qui entre dans l'œil; et en joignant au point *a* l'intersection *n* de ce pinceau avec la surface, nous aurons le pinceau *an* qui fait voir en *a'* l'image du point *a*. On construirait de même le pinceau réfracté qui fait voir en *c'* l'image du point *c*. Les extrémités de l'image étant tout près des axes *oa*, *oc*, et l'objet *ac* étant plus près de l'angle qu'ils forment, l'image sera grossie et rapprochée. Elle sera en même temps déformée; les points de contact *a'*, *c'*... n'étant pas, sur chaque caustique, à la même distance du sommet. De plus, la position des points *a'*, *c'*... dépendant de celle de l'œil, il pourra arriver qu'on voie deux images, avec les deux yeux, si leur éloignement n'est pas négligeable par rapport à leur distance à *a'c'*. — Ces résultats s'observent souvent dans ces globes de verre où l'on conserve des poissons vivants; on voit ces animaux plus ou moins grossis et déformés, suivant leur distance à la surface.



Fig. 1780.

On montrerait tout aussi facilement que, si la surface était concave, les objets plongés paraîtraient plus petits, droits et rapprochés.

2520. Surfaces de séparation qui donnent un foyer exact. — Il est naturel de se demander quelle forme devrait avoir la surface de séparation de

deux milieux, pour que les rayons réfractés se réunissent exactement au même point. Descartes prouve, dans sa dioptrique, que, dans le cas des rayons parallèles entrant dans le milieu le plus réfringent, on obtient un foyer exact quand la surface est celle d'un ellipsoïde de révolution autour d'un axe parallèle aux rayons, et dont le rapport entre le grand axe et la distance des foyers égale l'indice de réfraction. En effet, soit un ellipsoïde tel qu'un rayon réfracté mf provenant d'un rayon incident am (fig. 1781) passe par un des foyers f . L'angle fmc est égal à l'angle de réfraction $cmf = r$, la normale divisant en deux parties égales l'angle des rayons vecteurs; et les triangles fmf' et $mf'c$ donnent $mf' : mf = f'c : fc$, d'où $mf' + mf = f'c + fc = mf' : f'e$, ou $AB : ff' = \sin e : \sin r = n$.

Il est facile de voir que tout cela s'applique au cas d'une surface concave; seulement, le foyer est alors virtuel.

Nous avons supposé que les rayons parallèles entraient dans le milieu le plus réfringent; si, au contraire, ils entrent dans le moins réfringent, la surface de séparation doit être un hyperboloïde de révolution autour d'un axe transverse

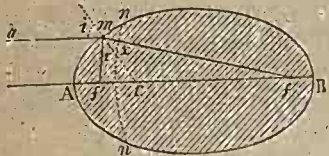


Fig. 1781.

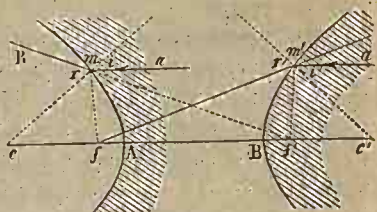


Fig. 1782.

parallèle aux rayons incidents. Considérons la branche mA (fig. 1782) de l'hyperbole génératrice, et cherchons la condition pour que tous les rayons réfractés prolongés se coupent au foyer f' . Soit am un rayon incident, mc la normale, et mR le rayon réfracté, qui, prolongé, passe par le foyer f' . La normale à l'hyperbole divisant l'angle Rmf des rayons vecteurs en deux parties égales, le triangle $mf'c$ donne $mf' : cf = \sin i : \sin r = n : 1$; et le triangle cmf , $f'm : cf' = \sin i : \sin r = n : 1$. En combinant ces deux proportions, on en tire $n : 1 = mf' - mf : cf' - cf$, ou $\overline{AB} : \overline{ff'} = n$, comme dans le cas de l'ellipsoïde. — Cela s'applique encore quand les rayons tombent sur une surface hyperboloïde concave; mais alors le foyer est réel. La partie de droite de la figure correspond à ce cas; les lettres sont les mêmes qu'à gauche, mais avec des accents.

Si les rayons, au lieu d'être parallèles, partent d'un point situé à une distance finie, Descartes démontre que, pour obtenir un foyer exact, il faut que la méridienne de la surface de révolution, sur l'axe de laquelle se trouve le point lumineux, ait une forme telle que le rapport entre la différence des distances du point lumineux au point d'incidence et au sommet de la méridienne, et la diffé-

rence des distances du foyer aux mêmes points, soit constant et égal à l'indice n . L'équation de la courbe, en prenant l'axe de révolution pour axe des abscisses et le point lumineux pour origine, est $\sqrt{x^2 + y^2} = c + n \sqrt{(x - p - p') + y^2}$, qui est du 4^e degré. c est une constante, et p, p' les distances du point lumineux et du foyer au sommet.

II. Milieux terminés par deux surfaces sphériques. — Lentilles.

2521. Lentilles. — Une *lentille*, en optique, est un corps transparent terminé par deux surfaces sphériques. Quand les deux surfaces ne se rencontrent pas, elles sont réunies par une surface cylindrique qui ne joue aucun rôle dans les expériences. Plus généralement, on entend par *lentille* un corps transparent terminé par deux surfaces de révolution quelconques, dont les axes coïncident; mais, à moins qu'on n'avertisse du contraire, on suppose toujours les surfaces sphériques. Une de ces surfaces peut être plane, le plan pouvant être considéré comme la surface d'une sphère dont le rayon est infini.

L'axe d'une lentille est la ligne droite qui passe par les centres des deux

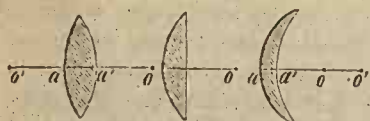


Fig. 1783.

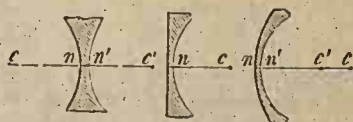


Fig. 1784.

surfaces sphériques qui la terminent. Quand une des faces est plane, l'axe est la perpendiculaire abaissée du centre de la face courbe, sur la face plane.

Différentes sortes de lentilles. — On divise les lentilles en *lentilles convergentes* et *lentilles divergentes*. Les premières ont la propriété de rapprocher les uns des autres, ou de faire converger, les rayons qui les traversent; on les reconnaît en ce qu'elles sont plus épaisses au milieu que près du contour. Les secondes font, au contraire, diverger les rayons lumineux, et sont plus minces au milieu que sur les bords.

Il y a trois espèces de lentilles *convergentes* (fig. 1783) : 1^o la lentille *biconvexe*, dont les deux faces sont convexes; les centres o', o des surfaces sphériques a', a , sont du côté opposé à ces surfaces; 2^o la lentille *plan-convexe*, dont une des faces est plane; le centre unique o est du côté opposé à la face courbe; 3^o le *ménisque convergent*, dont une des faces est concave et possède un rayon de courbure $a'o'$ plus grand que celui de la surface convexe; le centre o' de la face concave est le plus éloigné de la lentille.

Il y a aussi trois espèces de lentilles *divergentes* (fig. 1784) : 1^o la lentille *bi-concave*; les centres sont du côté des faces qui leur correspondent; 2^o la

lentille *plan-concave*; le centre de la face courbe est du même côté qu'elle; 3^o le *ménisque divergent*; le rayon $n'e'$ de la face concave est le plus petit.

Ouverture. — On nomme souvent *ouverture* d'une lentille l'angle sous-tendu par un de ses diamètres, et ayant son sommet au centre de la face qui possède le plus petit rayon de courbure. Nous verrons plus loin (2524) une autre définition de l'*ouverture*.

2522. Propriétés générales des lentilles. — Pour concevoir comment

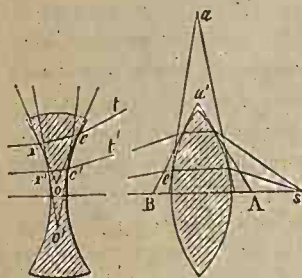


Fig. 1785.

les lentilles plus épaisses au milieu que sur les bords peuvent rendre convergents les rayons émanant d'un point s pris sur l'axe (fig. 1785), remarquons qu'un rayon, se , qui traverse une semblable lentille, est dans le même cas que s'il traversait un prisme limité par les deux plans tangents aux points d'incidence et d'émergence, prisme dont le sommet a serait tourné du côté opposé à l'axe de la lentille. Le rayon émergent sera donc dévié vers cet axe.

Dans le cas des lentilles plus minces au milieu, les deux plans tangents forment un prisme *cor*, $e'o'r'$, dont la base est opposée à l'axe; les rayons émergents t, t' , déviés de manière à s'écarter de cet axe, sont donc rendus plus divergents.

2523. Formule des lentilles très-minces et à très-petite ouverture.

— L'expérience montre que les rayons qui, partant d'un point situé sur l'axe, traversent une semblable lentille, convergente ou divergente, se réunissent sensiblement, eux ou leur prolongement, en un foyer placé sur l'axe. Si l'épais-

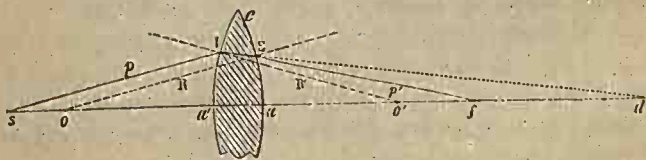


Fig. 1786.

seur et l'ouverture de la lentille sont infiniment petites, les rayons divergents se réunissent exactement en un même point. — Pour le démontrer, considérons la lentille $aa'c$ (fig. 1786), supposée convergente pour fixer les idées, et dont les faces ont leur centre en o et o' . Soit s un point lumineux situé sur l'axe oo' , et i un rayon incident. Ce rayon éprouvera une première réfraction en I , et prendra la direction IEd , qui coupe l'axe en d ; et l'on aura, en appelant i l'angle d'incidence et prenant les angles pour leur sinus, $i = n \cdot d/o'$. Mais, i étant extérieur au triangle $sl'o'$, on a $i = s + o'$; on a de même, dans le

triangle $o'Id$, $dIo' = o' - d$. Remplaçant i et dIo' par ces valeurs, l'équation devient $s + o' = n(o' - d)$; d'où $n \cdot d = o'(n - 1) - s$.

A la seconde réfraction en E, le rayon IE est dévié suivant Ef, et, en appelant e l'angle d'émergence, qui est plus grand que l'angle IEo, on aura $e = n \cdot IEo$; or, dans les triangles Efo, Eod, on a $e = o + f$, $IEo = o + d$; d'où $o + f = n(o + d)$, et $n \cdot d = f - (n - 1)o$. En égalant les deux valeurs de $n \cdot d$, il vient

$$(n - 1)(o + o') = s + f. \quad [1]$$

En regardant les arcs Ea, Ia', comme des droites de même longueur, et prenant les angles pour leurs sinus, appelant pp' les distances sI, fE, considérées comme égales à sa' , fa , et négligeant l'épaisseur aa' , on a

$$o = \frac{Ea}{R}, \quad o' = \frac{Ia'}{R'}, \quad s = \frac{Ia'}{p}, \quad f = \frac{Ea}{p'}.$$

En portant ces valeurs dans [1], et faisant disparaître les quantités Ea, Ia', considérées comme égales, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = \frac{(n - 1)(R + R')}{RR'}, \quad [2]$$

formule qui montre que p' ne dépend que des quantités constantes p , R, R' et n . Tous les rayons émergents iront donc couper l'axe oo' en un même point f , qui se nomme le foyer du point s . Réciproquement, si le point lumineux était en f , le foyer se formerait en s ; c'est pourquoi les points s et f se nomment collectivement *foyers conjugués*.

2524. Foyer principal. — Si les rayons incidents sont parallèles à l'axe, p est *infini*, et la valeur de p' , que nous représenterons par a , devient

$$a = \frac{RR'}{(n - 1)(R + R')},$$

ce que l'on peut trouver directement. Le point de concours des rayons est alors le *foyer principal*, et sa distance a à la lentille, la *distance focale principale*. Cette distance se nomme aussi *foyer*; c'est dans ce sens qu'on dit qu'une lentille a un long ou un court foyer. On voit que, la valeur $\frac{1}{a} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$ diminuant quand R et R' augmentent, la valeur de a varie dans le même sens que R et R'. Les lentilles dont le foyer est long sont donc celles dont les surfaces ont une courbure peu prononcée, ou dont l'épaisseur varie peu du milieu au contour. On voit aussi que, à égalité de courbure des faces, la distance focale diminue quand l'indice de réfraction augmente.

Discussion. — L'expression de a varie suivant la forme de la lentille. Si celle-ci est *convergente* et bi-convexe, et si les deux rayons de courbure sont égaux,

on a $a = \frac{R}{2(n-1)}$. Si l'une des faces, a' , est plane, il faut faire $R' = \infty$, et il vient $a = \frac{R}{(n-1)}$, valeur double de la précédente; ce qui montre que les deux moitiés d'une lentille à faces égales concourent également à la déviation des rayons lumineux. Si la lentille est un ménisque convergent, il faut changer le signe de R' , supposé plus grand que R ; et l'on a $a = \frac{-RR'}{(n-1)(R-R')}$; valeur positive, $R - R'$ étant négatif.

Dans le cas des lentilles *divergentes*, a est toujours négatif, car il faut changer les signes de R et de R' , excepté dans le cas du ménisque divergent, où l'on ne change que celui de R' , supposé plus petit que R . Les valeurs particulières de a sont alors, pour la lentille bi-concave à faces égales, $a = \frac{-R}{2(n-1)}$;

pour la lentille plan-concave, $a = \frac{-R}{(n-1)}$; et, pour le ménisque divergent,

$$a = \frac{-RR'}{(n-1)(R-R')}.$$

Si, R' étant négatif, on avait $R = R'$, on trouverait $a = \infty$; et les rayons seraient dans le même cas que s'ils traversaient un milieu terminé par deux faces parallèles, et d'épaisseur négligeable.

Nouvelle définition de l'ouverture. — Une fois le foyer principal connu, on peut définir l'ouverture d'une lentille, l'angle sous-tendu par un diamètre et ayant son sommet au foyer principal. Cette définition diffère notablement de celle que nous avons donnée plus haut (2521), car elle dépend de l'indice de réfraction.

2525. Discussion de la formule des lentilles. — Si l'on remplace le second membre par sa valeur en fonction de a , la formule devient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}; \quad \text{d'où} \quad p' = \frac{ap}{p-a} = \frac{a}{1 - \frac{a}{p}}.$$

On voit que p' varie dans le même sens que a , et qu'il est, par conséquent, d'autant plus petit, pour une même valeur de p , que les courbures de la lentille sont plus prononcées. On voit aussi que la formule est identique avec celle des miroirs sphériques; seulement, a dépend ici de trois quantités: les deux rayons de courbure, et l'indice de réfraction n . La discussion se fera donc de la même manière, et conduira à des résultats analogues (2465).

Ainsi, dans le cas des lentilles *convergentes*, on verrait que le point lumineux étant à l'infini, puis se rapprochant peu à peu, le foyer réel, d'abord à une distance a de la lentille, s'en éloigne de plus en plus et semble fuir le point lumineux. Quand on a $p = 2a$, on a $p' = 2a$, le point lumineux et son foyer conjugué sont donc à la même distance de la lentille; et quand $p = a$, p' devient infini. Si p diminue encore, p' devient négatif; le foyer est virtuel, et il se

rapproche de la lentille et se confond avec elle en même temps que le point lumineux. Le foyer réel ou virtuel peut donc occuper successivement tous les points de l'axe, à l'exception de ceux qui sont compris entre le foyer principal et la lentille. — Si les rayons incidents sont convergents, il faut faire p négatif; le foyer est toujours réel, et p' varie depuis a jusqu'à zéro, pendant que p diminue depuis l'infini négatif jusqu'à zéro.

Si la lentille est *divergente*, il faut faire a négatif (2524), et la formule montre que le foyer est *toujours virtuel* et ne peut être situé qu'entre le foyer principal et la lentille. — Si les rayons sont convergents, on fait p négatif, et l'on voit que le foyer est réel quand p est moindre que a . — Enfin, si l'on suppose les faces de la lentille parallèles, il faut faire $a = \infty$ (2524), et l'on a $p = -p'$, comme dans le cas où les rayons traversent un milieu terminé par deux surfaces planes parallèles, et dont l'épaisseur serait négligeable.

2526. Vérifications par l'expérience. — On peut vérifier la plupart de ces résultats par l'expérience, au moyen d'une bougie, dans la chambre obscure. Comme nous le verrons bientôt (2532), il se forme au foyer, quand il est réel, une image, qui sert à reconnaître sa position au moyen d'un écran.

Pour se rendre compte des variations relatives des distances p et p' , on construira graphiquement les valeurs de p et p' , comme pour les miroirs sphériques (2466), et l'on trouvera qu'elles sont représentées par les abscisses et les ordonnées de l'hyperbole équilatère de la figure 1787, dont les asymptotes sont à des distances des axes des coordonnées égales à a . La branche mm' correspond à la lentille convergente recevant des rayons divergents; la partie on' de l'autre branche, au cas où p est moindre que a , et la partie on , au cas où les rayons sont convergents. Il ne faut pas oublier que la valeur de a dépend ici de trois quantités, qui sont R , R' et n .

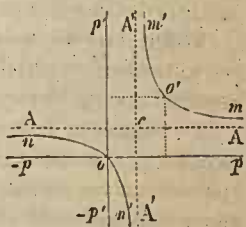


Fig. 1787.

2527. Réunion de plusieurs lentilles. — Considérons plusieurs lentilles quelconques placées les unes à la suite des autres, de manière que leurs axes coïncident, et assez rapprochées pour que les rayons lumineux les traversent toutes avant de rencontrer l'axe commun, et cherchons le foyer des rayons partis d'un point de l'axe et ayant traversé ce système. Soit $d, d', d'' \dots$ les distances qui séparent deux à deux les lentilles, dont on néglige toujours l'épaisseur, et $a, a', a'' \dots$ leurs distances focales principales : positives si les lentilles sont convergentes, et négatives si elles sont divergentes. La position du foyer formé par la première lentille seule est donnée par la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$. Les rayons émergents tomberont sur la suivante, en convergeant en un point situé à une distance $p' - d$ de cette dernière, si la première est convergente; ou en divergeant d'un point situé à une distance $d + p'$, si le foyer formé par la

première lentille est virtuel; et l'on aura $\pm \frac{1}{p' \pm d} + \frac{1}{p''} = \frac{1}{a'}$. Si les rayons tombent en convergeant sur la troisième lentille, on aura de même pour celle-ci $\pm \frac{1}{p'' \pm a'} + \frac{1}{p'''} = \frac{1}{a''}$, et ainsi de suite; et pour la n^e lentille,

$$\pm \frac{1}{p_{n-1} \pm d_{n-2}} + \frac{1}{p_n} = \frac{1}{a_{n-1}}.$$

En éliminant p', p'', \dots, p_{n-1} entre ces équations, qui sont au nombre de n , on obtiendrait une seule équation, dans laquelle il n'entrerait que p, p_n , et $a, a', a'', \dots, a_{n-1}$; $d, d', d'', \dots, d_{n-1}$, et de laquelle on tirerait la valeur de p_n , c'est-à-dire la distance du foyer à la dernière lentille.

Si les lentilles, dont l'épaisseur est toujours supposée négligeable, sont en contact, d, d', d'', \dots sont nuls, et l'élimination se fait facilement en ajoutant ou retranchant membre à membre les égalités successives, et il vient

$\frac{1}{p} + \frac{1}{p_n} = \frac{1}{a} \pm \dots \pm \frac{1}{a_{n-1}}$. L'unité divisée par le second membre représente la distance à la dernière lentille, du foyer principal du système.

2528. Cas de deux lentilles convergentes. — Nous allons considérer en particulier le système de deux lentilles convergentes écartées l'une de l'autre, système souvent employé dans les instruments d'optique.

1° Supposons le point lumineux situé à une distance, p , de la première lentille, plus grande que sa distance focale a , et la seconde lentille écartée de la première d'une quantité d plus petite que la distance p' à laquelle se ferait le foyer conjugué si la première était seule. Les rayons qui émergent de cette première lentille tombent en convergeant sur la seconde, on a

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}, \text{ et } \frac{-1}{p' - d} + \frac{1}{p''} = \frac{1}{a'}; \text{ d'où } p'' = \frac{a'}{1 + \frac{a'}{p' - d}}.$$

Si p , et par suite p' , sont constants, et d moindre que p' , on voit que p'' diminue quand d augmente. Le foyer se rapproche donc de la seconde lentille quand on l'écarte de la première. Si les rayons incidents sont parallèles à l'axe, il faut remplacer p' par a , et p'' sera la distance du foyer principal du système à la seconde lentille. Les deux lentilles forment donc un système à foyer variable, dans lequel le foyer se rapproche ou s'éloigne de la dernière, quand on l'éloigne ou qu'on la rapproche de la première.

2° Si le point lumineux est plus rapproché de la première lentille que son foyer principal, p' est négatif, et les rayons tombent sur la seconde lentille, comme s'ils venaient du foyer virtuel de la première, qui est situé à une distance de la seconde égale à $p' + d$; on aura donc pour celle-ci :

$$\frac{1}{p' + d} + \frac{1}{p''} = \frac{1}{a'}; \text{ d'où } p'' = \frac{a'}{1 - \frac{a'}{p' + d}}.$$

On voit que p'' augmente quand d diminue. Le foyer conjugué s'éloigne donc quand on rapproche les lentilles. La valeur de p'' devient infinie quand on a $a' = p' + d$; c'est qu'alors le foyer virtuel d'où semblent émaner les rayons qui tombent sur la seconde lentille, coïncide avec le foyer principal de celle-ci, si l'on a $a' > (p' + d)$, p'' est négatif, et le foyer du système est virtuel.

2529. CAS OU LE POINT LUMINEUX EST SITUÉ A CÔTÉ DE L'AXE. — Nous avons supposé jusqu'à présent que le point lumineux était situé sur l'axe de la lentille. Considérons maintenant le cas où il est situé hors de cet axe, et supposons qu'il en soit très-peu éloigné par rapport à sa distance à la lentille; ce qui a généralement lieu dans les instruments d'optique.

Nous allons d'abord démontrer que, parmi les rayons qui partent d'un point lumineux situé hors de l'axe, il y en a toujours un qui traverse la lentille sans éprouver de déviation. Menons à la face a (fig. 1788), un plan tangent en un point n très-peu éloigné de l'axe oo' ; dans ce cas, il sera toujours possible de mener un autre plan, tangent à la face a' et parallèle au premier. Car, si nous abaissons du centre o' une perpendiculaire $o'n'$ sur ce premier plan, un plan tangent au point n' lui sera parallèle. Joignons les points n, n' ; un rayon incident, qui donnerait un rayon réfracté traversant la lentille suivant nn' , donnerait un rayon émergent parallèle au rayon incident, puisqu'il serait dans le même cas que s'il traversait un milieu terminé par deux plans parallèles. Or, un semblable rayon existe toujours, et sa direction est donnée par la relation $\sin i = n \sin r$, r étant l'angle onc .

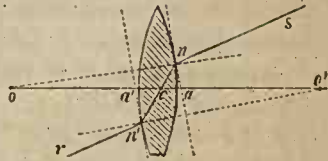


Fig. 1788.

Centre optique. — Nous allons maintenant montrer que le point c où le rayon réfracté coupe l'axe, est le même pour tous les rayons réfractés venant de rayons incident et émergent parallèles deux à deux; d'où il faudra conclure qu'il existe pour chaque point lumineux peu éloigné de l'axe, un rayon incident qui émerge sans déviation; car, en faisant tourner nn' autour du point c , on finira par trouver un angle de réfraction correspondant à un rayon incident passant par le point donné. Cherchons donc la position du point c , ou sa distance à la face an . Les triangles semblables, $nco, n'co'$, donnent, R et R' étant les rayons de courbure des deux faces,

$$\overline{oc} : \overline{o'c} = \overline{on} : \overline{o'n'} = R : R';$$

$$\text{d'où } \overline{on} - \overline{oc} = \overline{o'c} = R : R', \text{ ou } \overline{ac} : \overline{ca'} = R : R'.$$

Le point c partage donc l'épaisseur e de la lentille en parties proportionnelles aux rayons de courbure de ses faces. On tire de là

$$\overline{ac} + \overline{ca'} : \overline{ac} = R + R' : R; \text{ d'où } \overline{ac} = \frac{Re}{R + R'},$$

valeur qui ne dépend que des quantités constantes R , R' , e . Le point c , où tous les rayons qui traversent la lentille sans éprouver de déviation coupent l'axe, se nomme *centre optique* de cette lentille.

Discussion. — Prenons ca positif quand il est compté à gauche du point a . Si l'on a $R = R'$, le centre optique c se trouve au milieu de l'épaisseur de la lentille, car alors $ac = \frac{1}{2}e$. Si la lentille est plan-convexe, on a $R = \infty$, et il vient $ac = e$; le centre optique est donc situé sur la face courbe; ce qu'il est facile de voir directement. En effet, quel que soit le point d'immersion sur la face plane Aa (fig. 1789), le point d'émergence devra être en c , seul point où un plan tangent soit parallèle à Aa . — Dans le cas du ménisque convergent, R est négatif et plus grand que R' . La valeur de ca (fig. 1788) devient alors $\frac{Re}{R - R'}$; quantité positive et plus grande que e . Le centre optique se trouve donc hors de la lentille, du côté de la face convexe; ce que l'on peut voir directement, en remarquant que les points de contact des plans tangents parallèles, sont du même côté de l'axe, et que celui de la surface concave en est plus éloigné que l'autre; n , n' (fig. 1789).

Si la lentille est *divergente* et bi-concave, il faut changer les signes de R et R' ; ce qui ne modifie pas le signe de ca ; le centre optique est donc toujours dans l'intérieur de la lentille, et au milieu si l'on a $R = R'$.

Dans le cas de la lentille plan-concave, on a

$R = \infty$, et $ca = e$; le centre optique se trouve donc sur la face courbe. Enfin, dans le cas du ménisque divergent, il faut faire R seulement négatif, et le supposer plus petit que R' ; la face a est concave, et la valeur $ac = \frac{-Re}{R' - R}$

est négative et plus grande que e ; le centre optique est donc hors de la lentille du côté de la face au plus petit rayon, qui est ici la face concave. Cela peut se voir directement; car les points de contact des plans tangents parallèles sont du même côté de l'axe, et celui de la face concave est le plus rapproché de cet axe; comme on le voit en Da (fig. 1789).

2530. Foyers conjugués sur les axes secondaires. — Un rayon qui traverse une lentille en passant par son centre optique, n'éprouve pas de déviation, mais seulement un déplacement latéral, qui est négligeable comme l'épaisseur de la lentille. On peut donc regarder ce rayon comme formant une ligne droite. Cette droite se nomme *l'axe secondaire* du point lumineux qui a fourni le rayon.

Cela posé, nous allons montrer qu'un point lumineux situé hors de l'axe principal, donne un foyer conjugué sur son axe secondaire, pourvu que ce dernier fasse un très-petit angle avec l'axe de la lentille. En effet, soit s (fig. 1790) le point lumineux, scf son axe secondaire, et sm un rayon incident que nous

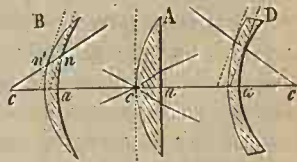


Fig. 1789.

supposons dans le plan *sea*. Ce rayon donne un rayon émergent *mf* coupant l'axe secondaire en *f*, et il faut faire voir que la distance *fe* est indépendante du rayon incident particulier *sm*. Les rayons *sm* et *mf* coupent l'axe principal en *a* et *F*; et l'angle *sea* étant très-petit, nous pouvons poser $sm = sc = p$, et $mf = cf = p'$.

Si, de plus, nous posons $ae = P$ et $cF = P'$, nous aurons $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$, les points *a* et *F* étant des foyers conjugués situés sur l'axe principal. Le triangle *amF* coupé par la sécante *sf*, donne

$$sa \times cF \times mf = sm \times Ff \times ca, \quad [1]$$

d'après le théorème des transversales, qui dit que la sécante détermine sur les côtés du triangle des segments qui sont tels que le produit de trois d'entre eux

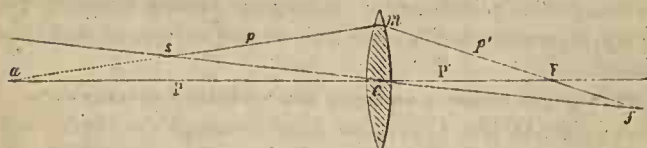


Fig. 1790.

n'ayant pas d'extrémité commune, est égal au produit des trois autres. L'égalité [1] revient à $(P - p) \cdot P' \cdot p' = p (p' - P') \cdot P$. Effectuant les opérations, et divisant par le produit $pp'PP'$, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{P} + \frac{1}{P'} = \frac{1}{a}. \quad [2]$$

La valeur de *p'* est donc la même pour tous les rayons incidents, et la distance focale principale qui correspond aux rayons parallèles à *sc*, est *a*, comme pour les rayons parallèles à l'axe *ae*. Tous les foyers formés par les rayons parallèles, de différente direction, seront donc sur un même arc de cercle décrit du point *c* comme centre avec un rayon égal à $a = \frac{BR'}{(n-1)(R+R')}$, et tout ce que nous avons dit sur la position relative des foyers conjugués situés sur l'axe principal, peut s'appliquer au cas où ils sont situés sur un axe secondaire faisant un très-petit angle avec ce dernier.

2531. Construction du foyer conjugué. — Pour construire le foyer conjugué d'un point lumineux *s* (fig. 1791), après avoir mené par le centre optique *c*, l'axe secondaire *sc*, on mène un rayon *sl* parallèle à l'axe principal, rayon qui donne le réfracté *lF* passant par le foyer principal *F*. Si *sl* est plus grand que *cf*, c'est-à-dire si le point *s* est plus éloigné de la lentille que son foyer principal, le côté *cf* du trapèze *sFce* est plus petit que *sl*, et le rayon *lF* va couper l'axe secondaire *sc* en un point *f* qui est le foyer conjugué du point *s*. Si

s était plus près de la lentille que son foyer principal, FI serait plus petit que eF , le rayon réfracté ne pourrait rencontrer l'axe se du côté F , et son prolongement seul pourrait le couper à gauche de s , en un point qui serait un foyer *virtuel*. — La même construction pourrait s'appliquer à une lentille divergente, seulement

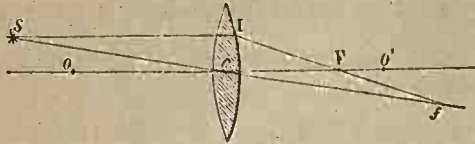


Fig. 1791.

il faudrait prendre le foyer principal, F , du côté où se trouve le point lumineux.

— S'il s'agissait enfin du point lumineux placé sur l'axe principal, il faudrait mener un axe secondaire quelconque, marquer le

foyer principal sur cet axe et mener un rayon qui lui fût parallèle.

Dans le cas de deux lentilles, pour trouver l'axe secondaire sur lequel se forme l'image d'un point lumineux, on construit d'abord, le foyer réel ou virtuel formé par la première lentille seule, puis on joint ce foyer au centre optique de la seconde.

2532. Images formées au foyer des lentilles convergentes. — Considérons un objet AC (fig. 1792) placé à une distance d'une lentille convergente, plus grande que son foyer principal. Tous les rayons partant du point A et traversant la lentille, vont converger en un point a de l'axe secondaire Aoa , point dont on trouve la position par le moyen ci-dessus (2531). De même, le point C fera son foyer ou son image en c , sur l'axe secondaire Coc , et ainsi des autres

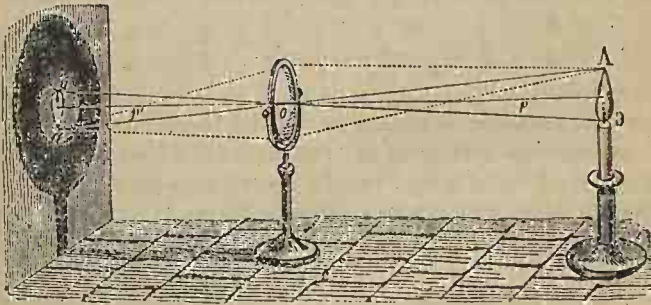


Fig. 1792.

points de l'objet. On aura donc, sur un écran placé en ac , une image *renversée* de l'objet AC . Si l'on fait l'expérience dans la chambre obscure, au moyen d'une bougie, on remarque que l'image se trouve au milieu d'un espace circulaire obscur, qui n'est autre chose que l'ombre de la lentille sur l'écran; car les rayons qui la traversent étant tous déviés vers les différents foyers qu'ils forment, l'écran ne reçoit de lumière dans l'intérieur de l'ombre géométrique qu'aux divers points

de cette image. Le reste de l'écran est faiblement éclairé par les rayons directs venant de la bougie.

Remarque. — Si l'objet avait tous ses points sur une surface sphérique ayant son centre au centre optique, les images de ces points seraient situées sur une autre surface sphérique ayant le même centre; car les distances des images sont les mêmes pour les points situés à égale distance de la lentille (2530). Mais si l'objet est dans un plan parallèle au contour de la lentille, les points voisins de l'axe principal se trouvant plus près du centre optique que les autres, feront leur foyer à une plus grande distance; de sorte que l'écran devrait avoir une surface plus concave que celle d'une sphère ayant son centre de courbure au centre optique, pour se trouver au foyer de tous les points. Mais, si l'objet est très-petit ou très-éloigné, cet effet est insensible, et l'image est nette sur un écran plan, les distances des foyers différant alors très-peu (2526).

Grandeur de l'image. — Il est à remarquer que les diamètres apparents de l'objet et de son image, pris du centre optique de la lentille, sont égaux. Quant au rapport entre les grandeurs de l'image et de l'objet, il est égal au

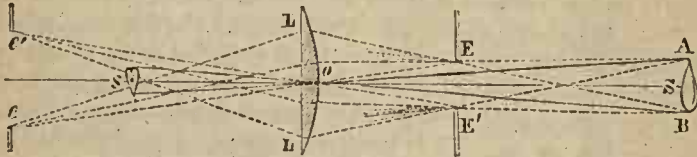


Fig. 1793.

rapport de leurs distances p, p' à la lentille, car les triangles semblables AoC et aoc (fig. 1792) donnent $AC : ac \equiv p : p'$. Le dernier terme se déduit de la formule des lentilles, en supposant connue la distance focale principale a . L'objet est égal à son image quand on a $p \equiv 2a$, car alors on a aussi $p' \equiv 2a$ (2525). Pour une même valeur de p , l'image est d'autant plus grande que p' est plus grand, par conséquent que a est plus petit, et par suite que les rayons de courbure des faces sont plus petits (2524).

2533. Image d'une ouverture traversée par un faisceau lumineux.

— Considérons un corps lumineux AB (fig. 1793) placé en face d'une lentille, LL , à une distance plus grande que sa distance focale principale F , et supposons un écran percé d'une ouverture EE' interposé entre ce corps et la lentille. Si la source AB était un simple point S , ce point donnerait un foyer conjugué s placé à une distance os dépendant de la distance So , et la présence de l'écran EE' ne ferait que modifier l'intensité de ce foyer. Mais, si la source présente des dimensions finies, on aura : 1° en s , une image renversée du corps lumineux, plus ou moins brillante suivant que l'écran laissera passer plus ou moins de rayons; 2° à une distance plus grande, une image de l'ouverture EE' , d'autant plus éloignée que la distance Eo , toujours plus grande que F , sera plus petite. Pour

expliquer cette image de l'ouverture, considérons le point E pris sur son contour; en ce point se croisent des rayons venant de tous les points de la source, de manière que ce point E se comporte comme un point lumineux formé par le mélange des rayons qui partent de tous les points de AB , et donnant un foyer conjugué en e . On en dirait autant du point E' et de tous les points du contour, de sorte que l'on aura en $l'l$ une image de ce contour illuminée dans son intérieur et entourée d'un espace obscur. Ces résultats s'observent facilement au moyen de la flamme d'une bougie ou au moyen des rayons solaires, qui donnent en s une petite image dont le diamètre apparent, vu de o , est égal à celui du soleil, qui est de $31'$ environ, et, à une distance plus grande, une image de l'ouverture de l'écran. — Un fil tendu, un corps opaque donneraient de même l'image nette de leur contour, à une distance déterminée plus grande que celle où se fait l'image solaire.

2534. Détermination de la distance focale principale. — Si la lentille est convergente, on fait tomber les rayons solaires sur sa surface parallèlement à son axe, et l'on cherche, avec un écran, la section la plus petite du cône émergent. L'écran se trouve alors au foyer principal.

— En l'absence du soleil, on se sert d'une bougie, et l'on cherche à quelle distance de la lentille il faut la placer pour que son image se forme à cette même distance, qui représente alors le double de la distance focale cherchée (2525).

M. Silbermann a imaginé un appareil, nommé *focomètre*, destiné à faire rapidement cette opération. Sur une règle horizontale divisée sont deux curseurs placés à égale distance de chaque côté de la lentille, et soutenant deux tubes égaux. Ces tubes portent, à l'extrémité opposée à la lentille, une plaque percée d'un trou, à l'un desquels on applique l'œil, l'autre étant éclairé par une flamme. Les extrémités tournées vers la lentille sont à moitié fermées par des demi-disques en verre dépoli placés l'un en haut, l'autre en bas, et dont le bord diamétral est divisé en millimètres; un pignon et des crémaillères permettent de rapprocher ou d'éloigner de quantités égales, les tubes de la lentille. On cherche à quelle distance il doivent être amenés pour que les divisions diamétrales du demi-disque placé près de l'œil coïncident avec celles de l'image du demi-disque éclairé par la lampe. La distance des demi-disques est alors égale à quatre fois la distance focale.

Quand la lentille est *divergente*, on applique sur l'une de ses faces une bande de papier noir, en ménageant deux petits trous a, b (fig. 1794), situés à la même distance de l'axe sur un même grand cercle. Faisant ensuite tomber les rayons solaires sur cette face, parallèlement à l'axe, on reçoit sur un écran $a'b'$, perpendiculaire à cet axe, les pinceaux émergents $aa' bb'$. On mesure la distance $a'b'$ et la distance $c'e$. On a alors $a'b' : ab = c'F : cF = c'e + cF : cF$, d'où l'on tire la valeur de cF . — On peut aussi déterminer la position du foyer

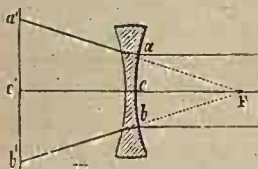


Fig. 1794.

principal au moyen de son expression (2524) en fonction des rayons de courbure et de l'indice de réfraction. Nous verrons comment on mesure l'indice. Quant aux rayons de courbure, on les détermine au moyen d'un *sphéromètre* à deux pieds, comme nous l'avons expliqué antérieurement (I, 22).

2535. Aberration de sphéricité des lentilles. — Halley est le premier qui ait appliqué l'algèbre à l'étude des propriétés des lentilles, en 1693. Ditton, en 1705, fit la même chose pour les miroirs sphériques; et, depuis, divers mathématiciens, Wolf, Costes, Euler, Lagrange, Möbius... ont publié des recherches sur le même sujet. Nous avons vu avec quelle simplicité et quelle élégance on peut représenter les résultats, quand on suppose la lentille très-mince et son ouverture très-petite. Mais ces conditions, surtout la première, sont rarement réalisées. Biot¹, Gauss², M. Petzval, M. Leboucher³, ont traité la question d'une manière générale, chacun à son point de vue. Nous ne pouvons, sans sortir de notre cadre, exposer ces recherches mathématiques; nous allons seulement faire connaître les résultats généraux auxquels elles ont conduit.

Caustiques formées par les lentilles.

— Quand des rayons, partant d'un point situé sur l'axe principal ou sur un axe secondaire peu incliné sur ce dernier, traversent une lentille convergente épaisse et à grande ouverture, les rayons qui émergent près des bords sont plus déviés qu'il ne faut pour se rencontrer au foyer formé par ceux qui passent près de l'axe. Il résulte de là que, si les rayons émer-

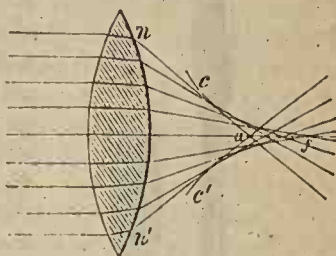


Fig. 1795

gent en divergeant, ceux qui passent près des bords vont couper *virtuellement* l'axe plus loin de la lentille que les autres. Si, au contraire, les rayons sont convergents, ceux qui émergent près des bords rencontrent l'axe plus près de la lentille (*fig.* 1795); de sorte que les rayons compris dans un même plan passant par l'axe, se coupent deux à deux, en formant une courbe caustique, *cf*, convexe vers cet axe. Ce défaut de concours au même point, des rayons émergents constitue l'*aberration de sphéricité* des lentilles. Il en résulte que si l'on cherche avec un écran, le foyer du point lumineux, on le verra entouré d'une auréole formée par les rayons qui se croisent à différents points de l'axe. S'il s'agit d'un objet lumineux, comme la flamme d'une bougie, l'image focale paraîtra, de même, entourée d'une auréole, qui en troublera la netteté, comme on le voit (*fig.* 1792). Pour prouver que cette auréole est due aux rayons qui traversent loin de l'axe, il suffit de les intercepter au moyen d'un écran

¹ *Traité élémentaire d'astronomie physique*, t. I.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIII, p. 259.

³ *De la formation des caustiques dans les milieux réfringents*, Caen, 1850.

annulaire; aussitôt l'auréole disparaît, et l'image est plus nette. Si, au contraire, on intercepte les rayons qui tombent près de l'axe, l'image devient confuse, et il faut rapprocher l'écran pour la voir nettement.

La forme de la caustique se distingue assez facilement dans l'air troublé par de la poussière ou de la fumée, quand on fait passer les rayons solaires à travers une lentille convergente à grande ouverture. La caustique est très-effilée à son sommet, ce qui fait qu'une image projetée sur un écran présente à peu près la même netteté quoi qu'on déplace un peu cet écran; ce qui constitue ce qu'on nomme la *profondeur du foyer*, et ce qui explique pourquoi l'image d'un objet éloigné peut paraître également nette dans toutes ses parties quoique les divers points de cet objet ne soient pas à la même distance de la lentille.

Herschell, pour comparer les directions des rayons qui traversent une grande lentille à différentes distances de l'axe, la recouvre d'une feuille de papier noir, dans laquelle sont ménagés de petits trous également espacés sur une même méridienne. Si l'on présente la lentille aux rayons solaires, on voit les faisceaux qui traversent les trous former sur un écran très-rapproché des taches lumineuses également espacées. Mais si l'on écarte peu à peu l'écran, les taches les plus éloignées de l'axe se resserrent plus que les autres, puis se réunissent successivement deux à deux, pour changer ensuite de place l'une par rapport à l'autre. Le point où se fait la rencontre de deux faisceaux voisins appartient à la caustique.

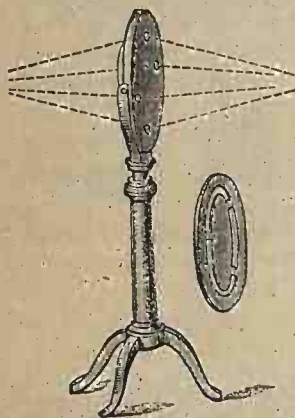


Fig. 1796.

M. Duboscq a disposé une lentille planconvexe (fig. 1796) pour répéter ces expériences; sur la face plane est appliquée une plaque

de laiton noircie présentant plusieurs ouvertures que l'on peut fermer et ouvrir à volonté, ou des ouvertures circulaires concentriques.

2536. Évaluation de l'aberration. — On distingue l'*aberration transversale*, produite par la lumière jetée autour de l'image du point lumineux, par les rayons se croisant plus près de la lentille, et qui se mesure par le diamètre de l'auréole qui entoure le foyer formé par les rayons centraux; et l'*aberration longitudinale*, qui consiste en ce que les rayons qui émergent par des circonférences perpendiculaires à l'axe ayant des diamètres différents, font leurs foyers en différents points de l'axe. Celle-ci se mesure par la distance des foyers formés par les rayons centraux et par les rayons passant près des bords de la lentille. Le cercle de moindre aberration, où la lumière est le plus resserrée, n'est pas au sommet de la caustique, mais en un point plus rapproché de la lentille, les rayons centraux étant moins nombreux que les autres.

Pour que l'aberration d'une lentille soit insensible, son ouverture ne doit pas

dépasser 10 à 12°. Si donc on veut donner à cette lentille un grand diamètre, il faudra que ses courbures soient peu prononcées, et par conséquent qu'elle ait un très-long foyer. Les lentilles très-convergentes, pour être dépourvues d'aberration sensible, devront, par une semblable raison, n'avoir qu'un très-petit diamètre, autrement, les rayons de courbure étant très-courts, l'ouverture ne serait pas très-petite.

On a reconnu, par les méthodes que nous venons d'indiquer, ainsi que par le calcul, que l'aberration varie suivant la manière dont sont tournées les faces de la lentille; elle est la plus faible quand la face la plus courbe est traversée par les rayons les moins inclinés sur l'axe, de manière que ces rayons soient moins couchés sur cette face que s'ils étaient plus inclinés. Quand il s'agit de rayons parallèles et d'une lentille bi-convexe en verre ayant un indice égal à 1,5, l'aberration est la plus faible quand les rayons de courbure sont entre eux comme 1 : 6. Si des rayons parallèles traversent la face dont le rayon est 1, l'aberration longitudinale est 1,07 de l'épaisseur, et elle devient 3,45 quand l'autre face est tournée vers les rayons parallèles. — Quand l'indice est 1,686, comme pour le cristal ou *flint-glass*, l'aberration est très-faible quand, la lentille ayant une face plane, cette face est traversée par les rayons les plus inclinés; aussi, les lentilles plan-convexes sont-elles fréquemment employées dans les instruments d'optique.

Les ménisques donnent les meilleurs résultats, parce que l'aberration produite à l'une des faces est en partie détruite par celle qui se fait en sens contraire à l'autre face. L'expérience prouve que l'aberration est la plus faible avec un ménisque de verre, quand les rayons de courbure sont dans le rapport de 3 à 8, la face la plus courbe étant toujours tournée du côté des rayons les moins inclinés sur l'axe.

On forme un système très-convergent, sans aberration sensible et avec une ouverture assez grande, en associant deux lentilles convergentes séparées par un certain espace. Ordinairement, on réunit deux lentilles plan-convexes, dont on tourne la face courbe du côté des rayons les moins inclinés. L'expérience montre que l'aberration est beaucoup plus faible que celle d'une seule lentille de même diamètre et de même foyer que le système. Le calcul prouve qu'on peut toujours, avec deux lentilles convergentes dont les courbures et la distance sont convenables, obtenir un foyer exact pour les rayons partant d'un point donné pris sur l'axe principal.

Lentilles aplanétiques. — On nomme ainsi les lentilles complètement dépourvues d'aberration de sphéricité. On peut former une lentille aplanétique en prenant pour face d'émergence la surface de révolution qui donne un foyer exact dans un milieu indéfini (2520); par exemple, la portion *nAn* de l'ellipsoïde (*fig.* 1781), et pour face d'émergence, une surface sphérique *nm* décrite du foyer *f* comme centre avec un rayon tel que cette surface coupe la première. Le foyer exact formé dans le milieu indéfini sera aussi le foyer de la lentille ainsi formée, puisque les rayons sortant de la lentille normalement à la surface

sphérique n'éprouvent pas de déviation en émergeant. La lentille nAn serait donc *aplanétique* pour les rayons parallèles à son axe.

2537. Champ d'une lentille. — On appelle *champ* d'une lentille l'espace angulaire dans lequel sont contenus tous les axes secondaires sur lesquels il se forme des images nettes. On remarque, en effet, que les points lumineux qui s'écartent trop de l'axe principal ne donnent que des images confuses. Les ménisques convergents, dont la face concave est tournée du côté de l'objet, ont un champ beaucoup plus grand que les autres lentilles de même diamètre et de même foyer. De plus, quand l'image est reçue sur un écran plan, perpendiculaire à l'axe principal, les foyers des points les plus écartés de cet axe tendent à se former sur l'écran, quoique sa surface ne soit pas partout également éloignée du centre optique; les distances focales, dans ces sortes de lentilles, croissent en même temps que l'obliquité des axes. Wollaston avait adopté, pour le rapport le plus favorable entre les rayons de courbure des deux faces, celui de 2 à 1; mais Cauchiois a trouvé que ce rapport doit être de 8 à 5.

III. Instruments relatifs aux images réelles projetées par les lentilles.

2538. Chambre noire composée. — Les images qui se forment au foyer des lentilles convergentes ont reçu des applications dans plusieurs instruments d'optique. J.-B. Porta, après avoir inventé la chambre noire simple (2401), y

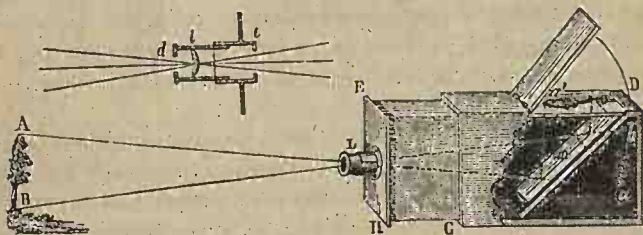


Fig. 1797.

produisit des images brillantes et nettes au moyen d'un miroir sphérique concave (2473). Plus tard, il adapta à l'ouverture une lentille convergente, et obtint des résultats qui le frappèrent d'admiration, et dont il garda longtemps le secret. L'instrument ainsi construit se nomme *chambre noire composée* ou *camera obscura*. L'image formée au foyer de la lentille est renversée, et d'autant plus éclatante qu'il y a plus de rayons concentrés en chaque point, c'est-à-dire que le diamètre de la lentille est plus grand. L'écran blanc sur lequel on reçoit cette image doit être placé à une distance déterminée, qui dépend de celle de l'objet; il en résulte que les points situés à différentes distances de la lentille ne peuvent se peindre avec la même netteté. Cependant, quand ces objets sont tous très-éloignés,

comme de grandes différences de distances n'en apportent alors que de très-faibles dans la position de l'image (2526), toutes les parties paraissent également nettes. On peut augmenter le champ de l'appareil en employant un ménisque convergent dont la face concave est tournée vers les objets (2537).

Chambre noire à tiroir. — Le renversement de l'image formée dans la chambre noire peut être évité par divers moyens. La figure 1797 représente une chambre noire portable, dite à tiroir, dont se servent les paysagistes. En *L* est la lentille, nommée *objectif*, parce qu'elle est tournée vers les objets dont on veut former l'image ; on en voit la coupe en *l*. Un diaphragme *d* arrête les rayons tombant trop près du bord, pour éviter l'aberration de sphéricité. Cette lentille est adaptée à un tube qui peut glisser dans un autre fixé à la caisse HD. Cette caisse est noircie en dedans, pour empêcher les réflexions sur les parois, et la

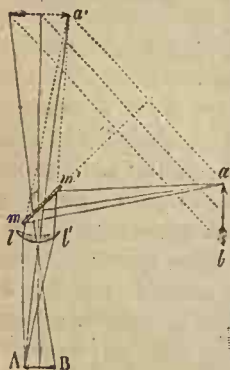


Fig. 1798.



Fig. 1799.

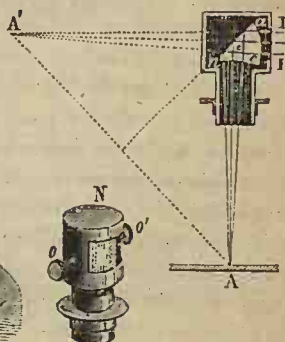


Fig. 1800.

lumière n'y peut pénétrer qu'à travers la lentille. Un miroir plan *m*, incliné à 45° , réfléchit, sur une lame de verre horizontale *a'v*, les rayons qui ont traversé l'objectif. Si l'on enlevait ce miroir, les images se formeraient en *ba*, mais les rayons qui convergeraient en *a* sont réfléchis et viennent converger sur la lame de verre *a'v*, en un point *a'* symétrique du point *a*. De même, l'image qui se formerait en *b* se forme en *v*, et ainsi des autres. On voit que l'image *ba* étant renversée, celle qui se formera en *a'v* sera droite pour un observateur placé derrière le miroir *m*. Cet observateur doit être enveloppé d'une draperie noire qui empêche la lumière extérieure de tomber sur la surface *a'v*. Pour régler la distance de l'écran à la lentille, d'après l'éloignement des objets, ce qui s'appelle mettre l'instrument *au point*, on fait glisser la partie EC de la boîte, dans la partie CD, et l'on termine en enfonçant plus ou moins le tube mobile L dans le tube fixé à la caisse.

Si l'on ne veut pas que l'image soit trop petite, il faut que la lentille ait un long foyer, et, par conséquent, que la caisse HD soit très-longue, ce qui la

rendrait embarrassante. Nollet a imaginé une disposition qui permet d'obtenir, avec un appareil portatif, des images suffisamment grandes. Trois pieds (fig. 1799), pouvant se plier en deux pour le transport, soutiennent une tablette T, sur laquelle on place une feuille de papier. L'objectif est représenté à part en ll' (fig. 1798); il est ajusté dans un tube vertical pouvant glisser, pour la mise au point, dans un disque horizontal en bois, auquel sont articulés les trois pieds. Un miroir plan mm' incliné à 45° , renvoie suivant la verticale, les rayons sensiblement horizontaux qui viennent des objets éloignés, de manière que l'image vient se peindre en AB, comme si les rayons partaient des points, tels que a' , symétriques de ceux de l'objet ab par rapport au plan du miroir mm' . On peut, en faisant tourner le miroir autour d'un axe vertical, projeter successivement en T (fig. 1799) l'image des objets distribués tout autour de l'appareil. Un rideau noir empêche la lumière extérieure de se répandre sur la feuille de papier.

La réflexion sur un miroir incliné présente plusieurs inconvénients. Les miroirs de glace donnant plusieurs images, on doit employer un miroir de métal, qui réfléchit peu de lumière et s'altère facilement. On a levé la difficulté en employant la réflexion totale intérieure, sur la face hypothénuse d'un prisme isocèle à angle droit, dont une des petites faces est horizontale et l'autre verticale.

Prisme-ménisque. — M. Ch. Chevallier a employé un prisme, qui sert à la fois de lentille et de réflecteur, dont on voit la section droite en anc (fig. 1800); la surface antérieure tournée vers les objets est de forme sphérique convexe. Si le milieu était indéfini derrière cette surface, des rayons I, I partant d'un point lumineux feraient leur foyer en A' . Mais les rayons qui convergent vers A' se réfléchissent totalement en dedans sur an , et se réunissent en A, point symétrique de A' par rapport au plan an . On donne une légère courbure concave à la face d'émergence nc , pour que les rayons convergents, sortant dans une direction normale à cette face, n'éprouvent pas de nouvelle déviation. On voit en N l'ensemble du prisme et de sa garniture métallique; il peut se mouvoir autour d'un axe horizontal oo' , de manière à se tourner, entre certaines limites, vers les objets dont on veut obtenir l'image. Le tube qui termine verticalement la garniture, peut glisser dans un anneau fixe, pour la mise au point. L'appareil de la figure 1799 est représenté muni du prisme-ménisque.

Nous verrons comment on est parvenu à fixer les images de la chambre noire. Les plus fins détails, et, par conséquent, les moindres défauts de l'image, se reproduisant avec une fidélité admirable, il faut que cette image soit d'une extrême netteté. Il a donc fallu perfectionner les objectifs. Nous reviendrons sur ce sujet, quand nous traiterons de la *photographie*.

2539. Mégascopie. — Le mégascopie sert à faire des copies amplifiées de statuettes, bas-reliefs, tableaux. C'est une espèce de chambre noire de grandes dimensions, dans laquelle entre le dessinateur. On détermine la distance de l'objet à la lentille de manière à obtenir une image de grandeur voulue, dont il n'y a plus qu'à suivre les contours avec un crayon. Voici comment on procède :

L'objet *a* (fig. 1801) est placé en dehors du volet d'une chambre obscure, et peut glisser sur de petits rails *rr*, de manière qu'on peut, en tirant des cordons dont l'extrémité est dans la chambre, faire varier la distance de cet objet à la lentille *t* ajustée à l'ouverture du volet. L'image renversée va se peindre sur un écran translucide *e*, derrière lequel on peut la dessiner, sans intercepter les rayons lumineux.

L'image étant amplifiée, la lumière qui la forme est répartie sur une grande surface, ce qui en affaiblit l'éclat; il faut donc, pour que cette image soit suffisamment distincte, que l'objet soit fortement éclairé. C'est ce qu'on obtient en renvoyant les rayons solaires sur les parties tournées du côté de la lentille, au moyen d'un miroir plan *m*, que l'on dirige en tirant

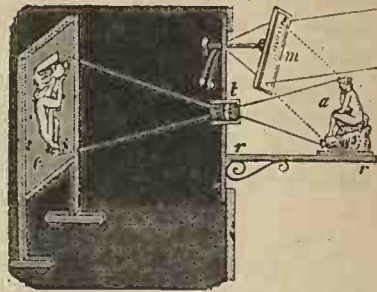


Fig. 1801.

des cordons et en faisant tourner sur lui-même le support horizontal auquel il est articulé. De plus, pour que chaque foyer reçoive beaucoup de rayons, on donne un grand diamètre à l'objectif, 10^{cm} environ. Le tube qui le porte est assez long pour intercepter la lumière des nuées, et des diaphragmes limitent le champ, pour éviter l'aberration de sphéricité, et l'on emploie deux lentilles donnant le même foyer qu'une seule plus convergente (2536). Le système des deux lentilles permet aussi de faire varier la distance de l'image, sans déplacer l'objet, en les rapprochant ou les éloignant l'une de l'autre (2528). Enfin, ces lentilles sont *achromatiques*, c'est-à-dire disposées suivant certaines règles, de manière à ne pas produire les couleurs qui accompagnent ordinairement la réfraction.

L'invention du mégascope date de la fin du siècle dernier; il a été notablement perfectionné par Charles. Cet appareil a rendu de grands services aux arts, à l'industrie, à l'histoire

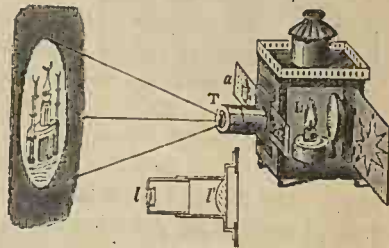


Fig. 1802.

naturelle; mais on ne l'emploie plus guère depuis la découverte de la photographie.

2540. Lanterne magique. — La lanterne magique (fig. 1802) est une espèce de mégascope destiné à projeter l'image amplifiée d'un dessin éclairé par une lampe *L* à réflecteur sphérique, renfermée dans une caisse ou lanterne complètement fermée. Les dessins sont peints avec des couleurs translucides sur une lame de verre *a* que l'on fait glisser entre la lampe et un système de deux lentilles convergentes ajustées dans le tube *T*, et dont on voit la coupe en *l*, *l'*.

L'une, *V*, dite *demi-boule*, est plan-convexe, l'autre, plus petite, *l*, se nomme l'objectif. On renverse le dessin pour que son image soit droite. Comme ce dessin est très-près de la demi-boule, si l'on en rapproche l'objectif, il faut éloigner l'instrument de l'écran, pour que l'image continue à s'y peindre nettement; en même temps, cette image grandit. Comme le dessin n'est pas très-fortement éclairé, on ne peut guère dépasser un grossissement de 20 à 25 fois en diamètre.

Modifications et applications de la lanterne magique. — La lanterne magique a été inventée par le P. Kircher dans le seizième siècle; il paraît cependant que Roger Bacon, vers 1260, connaissait quelque chose d'analogue. On a beaucoup modifié cet ingénieux appareil. On construit aujourd'hui, sous le nom

de *lampascope*, des lanternes magiques qui se posent sur une lampe ordinaire, dont la cheminée de verre passe par une ouverture inférieure de la lanterne; celle-ci est ainsi éclairée par la flamme de la lampe placée au centre du réflecteur sphérique. — Cette disposition étant peu stable, M. Molteni pose la lanterne sur une caisse, qui peut contenir tout l'appareil quand on ne s'en sert pas, et dans laquelle on place la lampe, qui traverse la paroi supérieure de la caisse.

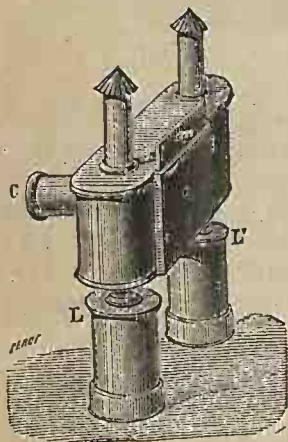


Fig. 1803.

Dissolving-Views. — On nomme ainsi une application curieuse de la lanterne magique, qui consiste à faire succéder sur un même écran, à une image dont l'éclat diminue graduellement, une autre image dont l'éclat, d'abord très-faible, augmente peu à peu. Pour cela, on a deux lanternes magiques identiques, placées de manière à projeter leurs images sur un même écran translucide, que le spectateur regarde du côté opposé.

Les peintures, représentant des monuments, des sites..., sont éclairées par la lumière Drummond (II, 1299). L'oxygène et l'hydrogène arrivent par des tubes séparés, au bec, qui les projette enflammés sur le crayon de chaux. On ferme peu à peu le robinet par lequel arrive l'oxygène, quand on veut diminuer l'éclat d'une image, pendant qu'on augmente l'éclat de l'autre en ouvrant son robinet à oxygène. — On procède aussi au moyen d'écrans, qui avancent peu à peu devant un des objectifs pendant qu'on découvre l'autre.

Lampadorama. — Cet instrument (*fig. 1803*) projette sur un écran, non plus l'image de peintures préparées sur des lames de verre, mais les images de dessins quelconques, d'objets opaques, éclairés par deux lampes ordinaires *L*, *L'*. Le dessin est placé en *m* en face de l'objectif *c*, qui en donne une image renversée, que l'on projette sur un écran. On peut ainsi, au moyen de dessins scien-

tifiques, de tableaux à mouvements ou à transformations, vulgariser une foule de connaissances relatives à la physique, à la mécanique, à l'astronomie, aux arts, etc. La lanterne magique, qui n'avait d'abord servi qu'à amuser, est devenue ainsi un moyen d'enseignement.

2541. Fantasmagorie. — Les illusions de la fantasmagorie sont produites au moyen d'un appareil nommé *fantascope*, analogue à la lanterne magique. Le fantascope consiste en une caisse AB (fig. 1804) exactement fermée, contenant une lampe à réflecteur, et portant un tuyau T, dans lequel sont disposés une demi-boule fixe et un objectif mobile. Les peintures translucides se détachent sur un fond opaque, de manière que l'écran ne reçoit pas de lumière en dehors de l'image. L'appareil est placé dans une chambre, séparée de celle qu'occupent les spectateurs par un écran translucide, ordinairement en percale, sur lequel on projette les images. Les spectateurs, plongés dans une obscurité complète, n'ont aucun moyen de juger de la distance de ces images; d'où il résulte que, si l'on fait en sorte que celles-ci grandissent rapidement, les spectateurs s'imaginent qu'elles se précipitent sur eux; si, au contraire, elles diminuent de grandeur, elles leur semblent s'éloigner. Pour produire ces effets, il suffit d'éloigner plus ou moins l'appareil de l'écran, en ayant soin de faire varier en même temps la distance des deux lentilles, de manière que l'image se fasse toujours exactement sur l'écran. Pour cela, la lanterne est fixée sur un chariot, dont une des roues porte une poulie R qui communique son mouvement, au moyen d'une corde sans fin, à un excentrique R' sur lequel s'appuie l'extrémité du levier l. Ce levier fait mouvoir l'objectif, de manière à le rapprocher de la demi-boule quand l'appareil roule en s'éloignant de l'écran, et réciproquement. L'excentrique est taillé de façon que le système des lentilles donne toujours l'image focale sur l'écran. — Pour rendre l'illusion plus complète, deux diaphragmes, représentés à part en aa, et articulés en o comme des branches de ciseaux, interceptent une partie d'autant plus grande des faisceaux lumineux, que l'objectif est plus éloigné de la demi-boule, de manière que l'image diminue d'éclat en même temps que de grandeur. Les diaphragmes a, a se rapprochent ou s'écartent par le mouvement même de l'objectif: deux cordons sont attachés à leurs extrémités libres a, a; aux points d'attache sont articulées de petites bielles liées par leur partie supérieure aux extrémités d'un double ressort rr. Les deux cordons passent librement par un trou o pratiqué dans le cadre qui supporte l'objectif, et vont s'attacher en un même point fixe, près de la demi-boule. Quand l'objectif s'écarte de cette dernière, les cordons se tendent, les branches du ressort rr s'abaissent, et les diaphragmes se resserrent; quand l'objectif se rapproche, le ressort se redresse et les diaphragmes s'écartent.

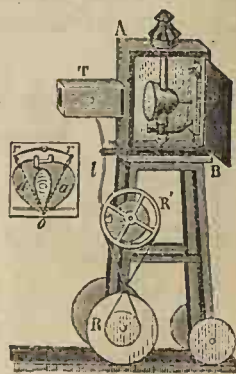


Fig. 1804.

La fantasmagorie a été introduite en France en 1798, par Robert ou Roberston. Le soin qu'il prenait d'écarter toute lumière étrangère, et d'éviter le bruit dans la manœuvre de l'appareil, dont les roues étaient garnies d'étoffe; la perfection des peintures, représentant le plus souvent des sujets effrayants, tout concourait à l'illusion. Souvent les apparitions étaient accompagnées de bruits étranges, imitant le tonnerre, la pluie, le cri d'animaux nocturnes..... Les représentations de Roberston eurent un grand retentissement, et les physiciens furent longtemps à découvrir la cause des illusions produites. On a prétendu que les prêtres de l'antiquité se servaient d'artifices analogues à ceux de la fantasmagorie, pour éprouver les initiés aux mystères d'Isis et de Cérès, et pour produire divers prestiges. La découverte d'une espèce de lanterne magique dans les ruines d'Herculanum et celle d'une lentille de verre trouvée par l'icoroni dans un très-ancien tombeau romain semblent confirmer cette opinion.

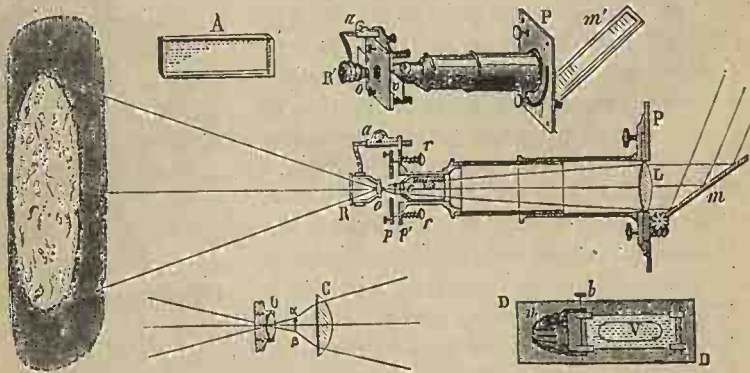


Fig. 1805.

2542. Microscope solaire. — Le microscope solaire, inventé vers 1743, par Leiberkuyn, est destiné à projeter, avec un énorme grossissement, les images d'objets extrêmement petits. Il se distingue des autres mégascopes par la manière dont on éclaire l'objet. L'image étant fortement grossie, il faut, pour qu'elle ne soit pas trop obscure, que cet objet soit vivement éclairé; ce qu'on obtient en concentrant sur lui les rayons du soleil au moyen de lentilles. La figure 1805 représente en Rm une coupe de l'instrument, et en R'm' une vue générale, avec les mêmes lettres. Les rayons solaires, renvoyés horizontalement sur une lentille L, par le miroir plan m' d'un porte-lumière (2449), traversent la lentille L, et sont reçus par une seconde lentille c, que l'on peut déplacer au moyen d'un pignon denté, de manière à amener sur l'objet l'image très-petite et très-éclatante du soleil, qui forme ce qu'on nomme un *focus*. L'objet est fixé sur une lame de verre v maintenue entre deux plaques trouées p, p', que des ressorts rr serrent l'une contre l'autre. Les rayons lancés par l'objet très-

éclairé, traversent une lentille à court foyer o nommée *objectif*, qui forme, à une grande distance, une image renversée, et d'autant plus grossie que l'objet est plus près du foyer de l'objectif. Cette image se peint au milieu d'un champ circulaire lumineux, qui n'est autre chose que l'image du focus solaire formée par l'objectif. Cet objectif est représenté à part en O sous sa grandeur réelle; C est la lentille qui concentre sur l'objet $\alpha\beta$, l'image solaire d'autant plus brillante qu'elle est plus petite. Une crémaillère et un pignon denté a, a , permettent de déplacer l'objectif jusqu'à ce que l'image se fasse sur l'écran, image qui, du reste, n'est très-nette qu'autant que l'objectif est *achromatique*.

On voit que l'objet est éclairé par derrière, mais les corps très-petits étant ordinairement translucides, cela n'a pas d'inconvénient. *Æpinus* a disposé l'instrument de manière à éclairer les objets par devant; l'image focale du soleil est projetée sur leur partie antérieure, par un petit miroir plan incliné convenablement; l'objectif se trouve alors, ainsi que l'objet, au-dessous de l'axe de la partie de l'appareil qui forme le focus.

Pour mesurer le grossissement, on remplace l'objet par une lame de verre, sur laquelle est gravée une division en centièmes de millimètres. Les traits se peignent sur l'écran; on mesure leur distance, et on la compare à celle de deux traits de la lame de verre. Si, par exemple, la distance de deux traits de l'image est de 100 millimètres, le grossissement sera de 10,000 en diamètre. On peut visser en o différents objectifs, pour obtenir divers grossissements sans déplacer l'écran.

Le microscope solaire est souvent employé pour montrer à une nombreuse assemblée les détails de l'organisation de très-petits animaux, la structure des tissus des plantes, les animaux infusoires; on dépose une goutte du liquide qui les contient sur une lame de verre qu'on glisse entre les plaques p, p' , ou dans une auge très-étroite en verre A . Quand on veut observer les infusoires d'une eau stagnante, on fait passer une grande quantité de ce liquide à travers un filtre de papier; la goutte prise ensuite sur ce filtre en contient un grand nombre. — Une expérience très-intéressante est celle de la cristallisation d'un sel, particulièrement du *sel ammoniac*; on met une goutte de la dissolution sur une lame de verre qu'on engage entre les deux lames p, p' . L'évaporation est activée par la chaleur qui règne au focus, et l'on voit bientôt se former des points sombres, d'où partent, comme des fusées, des bandes délicatement découpées en feuilles de fougère, s'allongeant à vue d'œil, et s'entre-croisant dans tous les sens de manière à couvrir rapidement tout le champ. — La circulation du sang dans la patte d'une grenouille, dans la queue d'un têtard, est aussi très-curieuse à observer. On voit en DD (*fig.* 1805) le petit appareil au moyen duquel on retient le têtard: la partie antérieure du corps est emprisonnée sous une calotte n , articulée en b avec une lame de verre V .

La chaleur du focus présente souvent des inconvénients. On l'amortit au moyen de certains verres colorés en vert, peu diathermanes, ou au moyen d'une couche d'eau, ou mieux d'une dissolution d'alun, contenue dans une auge

étroite A, que l'on place entre l'objet et la lentille c. — Quand les objets à observer sont par trop petits, M. Duboscq fixe sur une lame de verre, au moyen de la photographie, leur image modérément grossie par le microscope solaire, et ce dessin est ensuite porté dans le même appareil, qui en donne une image amplifiée. Le grossissement de l'image, par rapport à l'objet lui-même, est alors égal au produit des deux grossissements successifs.

2543. Microscopes oxy-hydrique, photo-électrique. — M. Galy-Cazalat, en éclairant l'objet au moyen de la lumière Drummond (II, 1299), a créé le microscope à gaz, qui ne diffère du microscope solaire que par ce mode d'éclairage. Le cylindre de chaux, qui reçoit la chaleur du mélange gazeux, est

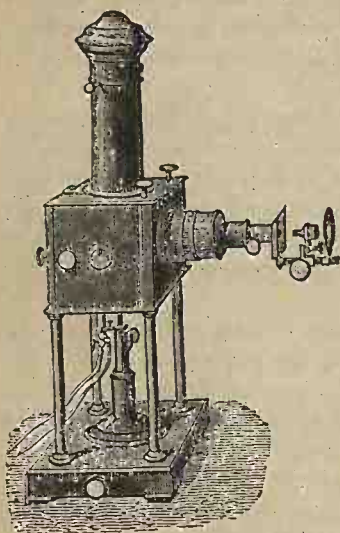


Fig. 1807.

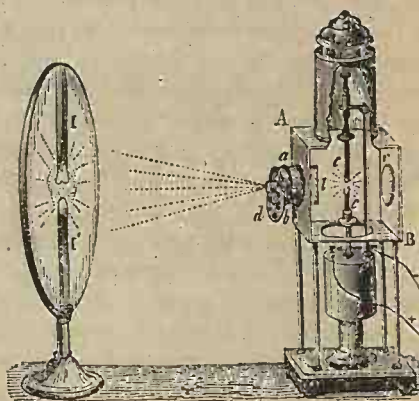


Fig. 1806.

renfermé dans une caisse ou lanterne entièrement fermée. Les deux gaz sont contenus dans des sacs en caoutchouc, et ne se mêlent qu'à l'orifice de sortie. Les rayons divergents qui partent de la chaux, sont rendus convergents par une lentille, et forment un *focus* extrêmement brillant.

Donné et Foucault ont imaginé d'éclairer l'objet par la lumière électrique (III, 2347). L'appareil est disposé comme le précédent, seulement, le foyer lumineux est produit par un courant électrique passant entre les deux charbons d'un régulateur. La figure 1806 représente la caisse ou lanterne AB; elle est munie d'une lentille plan-convexe *l*, qui rassemble les rayons lumineux en un faisceau parallèle. Un réflecteur en verre argenté *r*, renvoie sur la lentille ceux de ces rayons qui sont lancés du côté opposé. Le corps du microscope solaire se visse en *ab*.

On voit (*fig. 1807*) le microscope adapté à une lanterne combinée par M. J. Duboscq. Des ouvertures fermées par des glaces argentées permettent de distinguer nettement, à travers la couche d'argent, le foyer lumineux, sans en être ébloui. La lanterne s'ouvre par derrière, et le mouvement de la porte fait écarter des diaphragmes qui ferment la caisse en dessous, de manière qu'on puisse introduire ou retirer la lampe électrique ou la lampe Drummond.

Parmi les applications du microscope photo-électrique, nous devons citer celle qui en a été faite pendant le siège de Paris, en 1870-71, pour transcrire les dépêches microscopiques apportées par les pigeons (*I, 481*). La figure 1808 représente l'aspect d'une salle de transcription. La lanterne photo-électrique disposée par M. J. Duboscq projetait, par-dessus la tête des copistes, l'image



Fig. 1808.

grossie de nombreuses dépêches fixées par la photographie sur une pellicule de collodion, de manière qu'on en pouvait prendre facilement copie.

2543. Lanterne de projection. — L'appareil (*fig. 1806*) et (*fig. 1807*) nommé *lanterne photo-électrique*, ou *oxy-hydrigue*, suivant que le foyer est formé par la lumière électrique ou par la lumière Drummond, est fréquemment employé dans les cours d'optique, en l'absence des rayons solaires. La lentille *l* (*fig. 1806*) peut se mouvoir de manière à donner à volonté, par de petits déplacements, des rayons parallèles, divergents, ou convergents. On adapte à l'ouverture *ab*, des diaphragmes présentant des ouvertures appropriées à chaque genre d'expérience.

Une des expériences les plus curieuses, consiste à projeter sur un écran

l'image même des charbons I, I', en plaçant convenablement la lentille *l*, couvrant le réflecteur *r* d'un écran, et interceptant, au moyen d'un diaphragme, les rayons qui passent trop près des bords de la lentille. L'image est alors très-nette, et l'on peut voir la forme que prennent les extrémités des charbons; celui qui apporte l'électricité positive s'usant en s'amincissant, l'autre, en se creusant en forme de coupe. On distingue le transport des particules sous forme de poussière lumineuse se précipitant du pôle positif au pôle négatif. Si l'on creuse dans

le charbon positif une petite cavité dans laquelle on place successivement divers métaux, on observe le transport de leurs particules, qui donnent à l'arc voltaïque différentes couleurs. On remarque enfin, au moment où l'on ferme le circuit, que la lumière se manifeste d'abord au pôle négatif (III, 1957).

Quand on emploie l'électricité, on peut, au lieu d'un régulateur coûteux, employer dans les cours, la lampe à main (*fig. 1809*) combinée par M. Boudréaux et construite par M. Ducretet. Le charbon supérieur *C'* s'appuie légèrement sur le charbon inférieur plus gros *C*, quand on desserre la vis *B''*. Le charbon supérieur est guidé par un anneau *b* évasé en dessus et contenant un peu de mercure, qui ne peut s'échapper par les joints, trop étroits, et qui lui apporte l'électricité négative par *P'Rb*. Les boutons *B, B'* servent à régler la direction du charbon *C'*; les pignons à crémaillère *P, P'* permettent de changer la distance des supports des charbons; et le pignon *P''*, de déplacer verticalement tout l'appareil, pour mettre le foyer lumineux à la hauteur voulue.

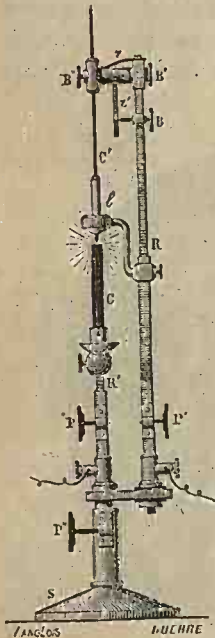


Fig. 1809.

2544. Appareil de projection pour les objets horizontaux. — Les appareils ci-dessus ne peuvent se prêter à la projection des images d'objets ne pouvant quitter la position horizontale. Pour ceux-ci,

M. J. Duboscq a imaginé, en 1866, un appareil de projection spécial, dont on voit une coupe verticale (*fig. 1810*) et une vue d'ensemble (*fig. 1811*). Le faisceau parallèle sortant de la lanterne est réfléchi de bas en haut par un miroir plan, *M*, incliné à 45°, est resserré par la lentille *L* nommée *condenseur*, traverse l'objectif *L'*, et est réfléchi totalement sur la face *P* d'un prisme rectangulaire qui projette sur un écran vertical l'image d'objets posés horizontalement sur une tablette évidée fixée au-dessus de *ML*. L'objectif *L'* peut être déplacé verticalement avec le prisme, pour la mise au point. — Au moyen de cet appareil, on peut montrer, par projection, la rotation d'un liquide par un aimant, le spectre magnétique sur une lame de verre, les mouvements de l'aiguille de déclinaison, certaines expériences d'ampère sur l'électro-dynamique, etc. On voit en 7TC

(fig. 1810) un rhéomètre tout en verre imaginé par M. Duboscq, dont on projette l'image, de manière à montrer sur une grande échelle les plus petites déviations dans les diverses expériences où l'on a à manifester le passage des courants.

Nous parlerons plus tard des images vues à travers les diverses lentilles, quand nous traiterons de leur application aux instruments qui viennent en aide à notre vue. Il nous reste, pour le moment, à parler de l'emploi des lentilles convergentes dans la construction des phares.

2545. PHARES DIOPTRIQUES. — Fresnel, en 1823, a fait faire un immense

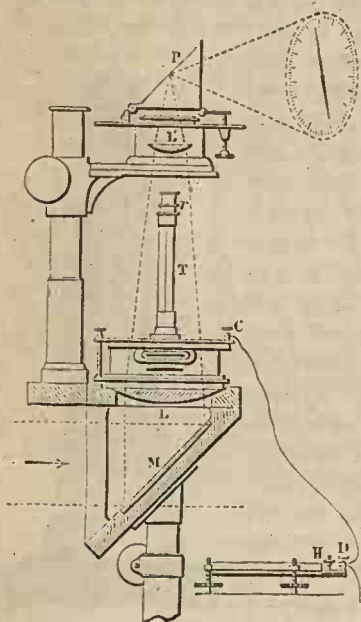


Fig. 1810.

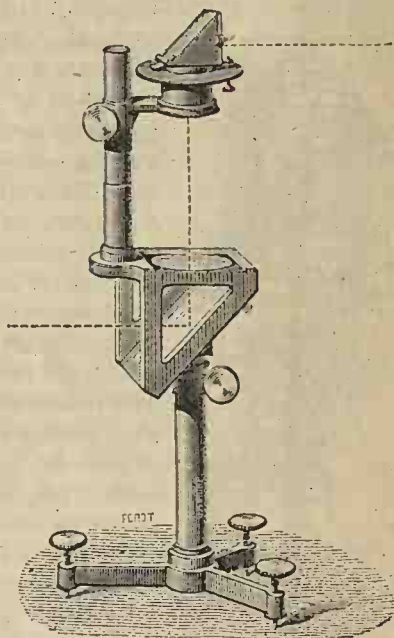


Fig. 1811.

progrès à l'éclairage des phares, en substituant aux miroirs paraboliques, dont nous avons vu les divers inconvénients (2475), des systèmes de lentilles rendant parallèles les rayons provenant d'un seul centre lumineux. La première difficulté était d'obtenir de grandes lentilles dépourvues d'aberration de sphéricité, et assez minces pour ne pas absorber sensiblement de lumière. Fresnel est parvenu à remplir ces conditions, au moyen des *lentilles à échelons* ou *lentilles poly-zonales* (II, 873). La courbure de la section de chacun des anneaux de verre qui composent ces lentilles est telle qu'il n'y ait pas d'aberration de sphéricité; c'est dire que les surfaces de ces anneaux n'appartiennent pas à des sphères concentriques.

Feux tournants. — La figure 1812 représente un *feu tournant* de premier ordre. Des panneaux *ll*, formés de portions rectangulaires de lentilles à échelons, sont disposés verticalement autour du centre lumineux, de manière à former une caisse prismatique dont l'axe passe par le foyer principal de chaque lentille, foyer où l'on place la source de lumière. On peut ainsi, avec une seule flamme, lancer des faisceaux parallèles dans autant de directions que l'on veut, tandis qu'avec les miroirs paraboliques il faut autant de flammes que de faisceaux.

Indépendamment de cette partie de l'appareil, qui constitue le système dioptrique, il y a un système réflecteur destiné à renvoyer horizontalement les rayons

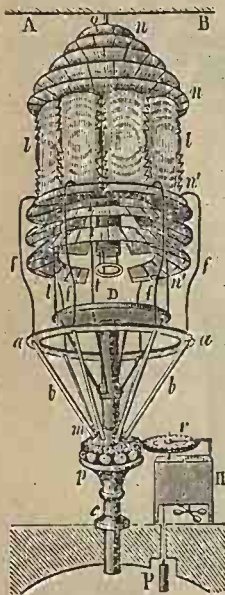


Fig. 1812.

dirigés trop haut ou trop bas pour tomber sur les lentilles. Ces rayons sont réfléchis par deux séries de couronnes de miroirs en verre étamé, *mm*, *n'n'*, échelonnées en jalousies, et soutenues par des tringles *t, t*, portées par un plateau *D* fixé à la colonne *De*. Chaque couronne est composée d'un grand nombre de pièces, dont les sections faites par des plans passant par l'axe de l'appareil, présentent la courbure d'une parabole à axe horizontal ayant son foyer au centre lumineux; de manière que tous les rayons tombant sur une même section sont réfléchis horizontalement.

Le système de lentilles est soutenu par des tringles *f, f*, *f, f*, extérieures aux couronnes

inférieures, et fixées au cercle *aa*, porté par des consoles *b, b*. Celles-ci sont fixées à un manchon *m* qui enveloppe l'arbre *De* et s'appuie sur des galets qui lui permettent de tourner facilement en roulant sur une petite plate-forme *p*. A sa partie supérieure, le système lenticulaire est maintenu par un tourbillon *o* qui traverse la barre fixe *AB*, et ce système tourne régulièrement sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie *II*. Alors, les divers faisceaux parallèles balayent l'horizon, et passent les uns après les autres par un même point, en y produisant une vive lumière ou un *éclat*, suivi d'une obscurité relative ou *eclipse* quand le point considéré ne reçoit que la lumière envoyée par le système réflecteur fixe. Le nombre d'éclats par minute, qui n'est pas le même pour les différents phares d'une même côte, sert à les distinguer les uns des autres.



Fig. 1813.

Tout cet appareil est renfermé dans une cage L (fig. 1813), garnie de glaces, épaisses de 8 à 10^{mm}, pour résister aux vents les plus violents, et aussi au choc des oiseaux de mer qui parfois se précipitent vers la lumière.

Les miroirs étamés s'altérant assez rapidement, on a eu l'idée de les remplacer par des anneaux de verre, dans lesquels les rayons éprouvent la réflexion totale. Mais ce système, très-couteux, ne s'emploie guère que pour les appareils de petites dimensions.

2546. Feux fixes. — On voit (fig. 1814) un appareil, dit *feu de port*, dont une des moitiés est une coupe passant par l'axe *acdh* est une sorte de tambour engendré par la section *ac* d'une lentille à échelons tournant autour d'une droite verticale passant par son foyer principal F. Les rayons lumineux partant de F traversent les parois du tambour et émergent horizontalement dans toutes les

directions, en formant une nappe lumineuse d'épaisseur *ac*. Les rayons qui passent par-dessus et par-dessous les bords du tambour, sont reçus par des anneaux de verre à section triangulaire *oo*, *o'o'*, dans lesquels ils éprouvent la réflexion totale, de manière à être renvoyés dans la direction horizontale, le côté réfléchissant de

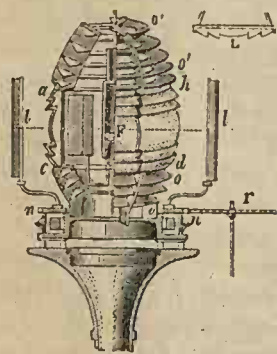


Fig. 1814.

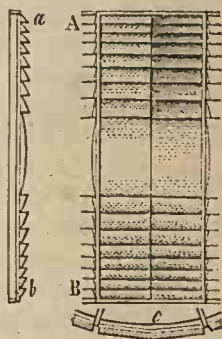


Fig. 1815.

la section de chaque anneau formant un arc de parabole ayant son foyer en F. L'appareil étant fixe, pour y produire des éclats, on fait tourner à l'extérieur deux lentilles cylindriques verticales à échelons *l, l*, dont on voit la coupe horizontale en L, qui rassemblent en faisceaux parallèles les rayons divergents horizontaux qui les traversent. Ces lentilles sont portées par une couronne dentée *nn* roulant sur des galets, et mise en mouvement par une roue *r* faisant partie d'une horloge. On varie aussi les feux, au moyen de verres rouges, fixes ou mobiles.

Dans les appareils à feux fixes de grandes dimensions, le foyer étant très-long, les anneaux qui forment le tambour, ont une courbure très-faible, et seraient très-difficiles à travailler. Le tambour est alors formé de lentilles cylindriques AB, *ab* (fig. 1815), dont *c* est une coupe horizontale. On met 32 de ces lentilles, au lieu de 8 ou 10 comme dans les feux tournants. Les rayons ne sont déviés que dans les plans verticaux; ils forment donc une nappe horizontale d'épaisseur AB, et illuminant tous les points de l'horizon.

2547. Bees multiples de Fresnel et Arago. — Le système lenticulaire

imaginé par Fresnel n'aurait pu donner les magnifiques résultats que nous admirons, si l'on n'avait employé un foyer lumineux très-intense. Avec une lampe d'Argent ordinaire, les lentilles à échelons donnent des résultats bien inférieurs à ceux des miroirs paraboliques; ceux-ci, avec les dimensions qu'on leur donne ordinairement, reçoivent les $\frac{7}{10}$ des rayons de la flamme placée à leur foyer, et en réfléchissent à peu près la moitié, soit $\frac{7}{20}$, en un faisceau parallèle. Les lentilles polyzonales, soutenant ordinairement dans tous les sens un angle de 45° ayant son sommet au foyer, ne reçoivent que $\frac{1}{20}$ environ des rayons de ce foyer; le miroir parabolique donne donc un faisceau parallèle 6 à 7 fois plus intense que la lentille. Cela explique l'insuccès des essais de phares lenticulaires; faits en Angleterre. Fresnel et Arago ont employé des becs à plusieurs mèches concentriques, dont les avantages avaient été signalés par Rumford, mais qui n'avait su en modérer la flamme. Fresnel et Arago ont levé la difficulté par la méthode de Carcel, qui consiste à faire circuler dans la mèche un excès d'huile qui éloigne la flamme du bec, et empêche l'ébullition. Dans les phares de premier ordre, les becs sont à quatre mèches concentriques pouvant s'élever ou s'abaisser indépendamment les unes des autres, au moyen de crémaillères à pignon. Le tout est enveloppé d'une cheminée de verre surmontée d'un tuyau métallique s'allongeant à volonté, et contenant un registre qu'on incline plus ou moins pour régler le tirage. Ces becs représentent 17 becs de lampe Carcel, et consomment 750 grammes d'huile par heure. Placés au foyer d'un panneau lenticulaire de 1 mètre de hauteur et de $0^m,76$ de largeur, ils produisent des éclats qui, dans l'axe, équivalent à 4000 becs Carcel, ou à 24000 bougies. L'huile est poussée dans le bec par des pompes que fait jouer un mouvement d'horlogerie, auquel on substitue aujourd'hui le système plus simple des lampes dites à *modérateur*. Une disposition ingénieuse sert à avertir le gardien, quand l'écoulement de l'huile cesse accidentellement. L'excès de ce liquide tombe dans un vase suspendu à un fléau et percé d'un trou assez petit pour rester toujours plein. Si l'écoulement s'arrête, le vase se vide, et le fléau, déplacé par un contre-poids, dégage une sonnerie qui avertit le gardien.

Après la découverte de sources abondantes de pétrole, on a substitué ce liquide à l'huile, avec grande économie. Nous avons vu aussi comment on emploie la lumière électrique et quels avantages de plus d'une sorte présente son application aux phares (III, 2352).

2548. De la portée des phares. — La portée d'un phare est la distance *maximum* de laquelle on peut l'apercevoir. Cette portée dépend de deux conditions : l'intensité de la lumière, et la hauteur au-dessus du niveau de la mer, à cause de la courbure du globe. C'est pourquoi les feux à grande portée sont placés autant que possible sur des hauteurs, et l'appareil, installé sur une haute tour (fig. 1813). Pour que le système éclairant d'un phare donne des résultats satisfaisants, il faut qu'il puisse être vu pendant la nuit, jusqu'aux limites de son horizon, quand l'air présente une transparence moyenne. Le tableau suivant indique la portée ordinaire des feux de différents ordres.

ORDRE DES FEUX	DIAMÈTRE DU TAMBOUR dioptrique.	NOMBRE DES MÈCHES	COMBUSTION D'HUILE par heure.	PORTÉE DES FEUX
1 ^{er} ordre.....	1 ^m 84	4	750 ^{sr}	15 à 10 lieues.
2 ^e ordre.....	1,40	3	500	10 à 7
3 ^e { grand modèle..	1	2	190	} 7 à 5
{ petit modèle..	0,50	2	120	
4 ^e { grand modèle..	0,375	1	60	} 6 à 3
{ petit modèle..	0,30	1	45	

Les phares lenticulaires sont une des plus importantes applications de la dioptrique, et auraient suffi pour immortaliser Fresnel; aussi ont-ils été promptement adoptés par tous les pays maritimes. La France, qui est le pays dont les côtes sont le mieux éclairées, n'emploie plus de miroirs paraboliques que pour quelques fanaux destinés à faciliter l'entrée des ports. Depuis les perfectionnements apportés par Soleil et Lepaute à la construction des appareils, l'étranger vient souvent demander aux ateliers français les systèmes dioptriques dont il a besoin. Un appareil pour phare de premier ordre revient à 30,000 francs environ, et le mètre carré de panneau lenticulaire en verre très-pur de Choisy-le-Roi, à 1,750 francs.

§ 4. — MESURE DES INDICES DE RÉFRACTION

I. Indices de réfraction des solides et des liquides.

2549. — Les formules relatives à la réfraction contiennent toujours un ou plusieurs indices de réfraction. Si donc on peut appliquer ces formules, il faut connaître les valeurs de ces indices. En outre, l'indice de réfraction constitue une caractéristique des corps chimiques et des minéraux transparents, pouvant servir à les distinguer les uns des autres. Les physiciens ont donc imaginé diverses méthodes pour déterminer cette valeur avec précision.

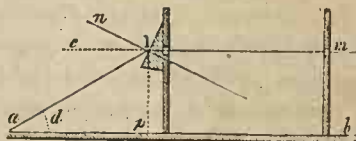


Fig. 1816.

Méthode de Descartes. — Après avoir découvert l'existence du rapport constant de réfraction, Descartes a naturellement cherché à en déterminer la valeur pour les divers corps. Pour les solides, il en formait un prisme dont il mesurait l'angle, et l'appliquait horizontalement contre une règle verticale percée d'un petit trou (fig. 1816). Il faisait arriver un pinceau horizontal de rayons solaires ml , par ce trou et par un autre trou m percé dans une seconde règle, à

la même hauteur au-dessus d'une table de marbre ab qui supportait tout l'appareil. Le rayon, entrant perpendiculairement dans le prisme, n'éprouvait de déviation qu'à sa sortie, et rencontrait la table en un point a , dont il mesurait la distance au point p . De cette distance et de la hauteur Ip , il déduisait la valeur de l'angle d , égal à la déviation ca . Or, on a $nla = nlc + cia$, ou $i = a + d$, a étant l'angle au sommet du prisme; d'où $i = d + a$. L'angle nlc est aussi égal à l'angle de réfraction r , l'indice n est donc donné par l'égalité

$$\sin(d + a) = n \sin a.$$

Ce moyen n'est pas très-précis, la mesure des longueurs n'étant pas susceptible d'une aussi grande précision que celle des angles.

Remarquons que dans cette méthode, comme dans celles qui suivent, on mesure l'indice de réfraction relatif de l'air et de la matière du prisme; mais l'indice absolu de l'air est tellement faible, que les résultats ne diffèrent pas sensiblement de ceux que l'on obtiendrait si le prisme était dans le vide.

2550. Méthode de Newton.

— Descartes, en employant un rayon normal à l'une des faces, faisait en sorte de n'avoir à mesurer qu'un seul angle d'incidence et qu'un seul angle de réfraction. Newton est arrivé au même résultat en cherchant la déviation *minimum*.

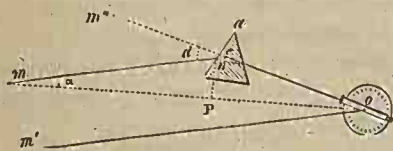


Fig. 1817.

On a en général, pour la valeur de la déviation, $D = i + e - a$; i et e étant les angles d'incidence et d'émergence (2509). Dans le cas du *minimum* (2512), e est égal à i , et il vient $d = 2i - a$; d'où $i = \frac{1}{2}(d + a)$. De plus, les angles du rayon réfracté avec les normales étant alors égaux, et leur somme étant égale à a , chacun d'eux est égal à $\frac{1}{2}a$. On a donc pour la valeur de l'indice, $n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \frac{1}{2}(d + a)}{\sin \frac{1}{2}a}$. Que l'on calcule par logarithmes. Il nous reste à dire comment on mesure d .

Mesure de la déviation minimum. — Après avoir mesuré l'angle a du prisme (fig. 1817) par une des méthodes indiquées (2448), on installe ce prisme verticalement sur un support mobile autour d'un axe vertical, on vise avec la lunette d'un cercle répétiteur o , une mire éloignée, d'abord directement, suivant om' , puis à travers le prisme, suivant onm , et l'on fait tourner ce prisme sur son support, jusqu'à ce que l'angle $m''om'$ que font entre elles les deux directions successives de la lunette, soit le plus petit possible. Si l'on suppose que la mire est assez éloignée pour que les rayons mn , $m'o$ soient parallèles, cet angle est alors égal à la déviation minimum $m''nm$. On prend souvent pour mire, la tige d'un paratonnerre très-éloigné, ou bien une fente pratiquée dans le volet d'une chambre noire, et par laquelle on fait entrer les rayons solaires.

Quand on opère pendant la nuit, on emploie une lampe enveloppée d'un manchon opaque muni d'une fente verticale.

Dans ce dernier cas, la mire n'est pas ordinairement assez éloignée pour que les rayons soient parallèles. Alors, on tient compte de l'angle qu'ils font entre eux. Soit m la mire, α cet angle, et o l'angle $m''om$. Dans le triangle mco , on a l'angle extérieur $d = o + \alpha$, et la valeur de n devient

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2} (a + o + \alpha)}{\sin \frac{1}{2} a}$$

Pour mesurer α , on peut transporter le cercle répétiteur en m ; mais comme cet angle est très-petit, on se contente ordinairement de mesurer la longueur d'un cordon np tendu perpendiculairement à mo , puis la distance mP ; et l'on a $\text{tang } \alpha = np : mP$.

2551. Appareils de mesure spéciaux. —

Fraunhofer a employé, dans ses recherches sur les indices de réfraction, l'appareil (fig. 1818) qui n'est autre chose qu'un théodolite modifié. AB est un cercle divisé horizontal, au centre duquel tourne une lunette horizontale L équilibrée par une masse a . Le prisme

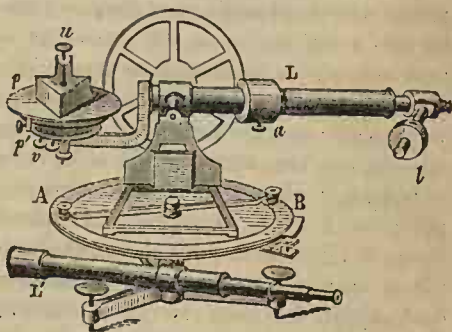


Fig. 1818.

est posé sur une plaque p , portée par la lunette et soutenue par trois vis calantes v , qui traversent une seconde plaque p' . Une tige fixée à p' joint ces deux plaques; elle s'enfonce dans une cavité de la plaque p , de manière que celle-ci puisse obéir aux mouvements des vis, quand on veut la mettre de niveau. Une potence fixée à la plaque p' porte une vis verticale u servant à maintenir le prisme. Le système des deux plaques peut tourner autour d'un axe vertical. — Après avoir visé une mire éloignée, et observé la position exacte de la lunette sur le cercle, on installe le prisme sur le support pp' , de manière que ses arêtes soient bien verticales. On vise ensuite la mire à-travers le prisme, et l'on fait tourner la lunette dans un plan horizontal, et les plaques pp' autour de leur centre, de manière que le fil focal de la lunette coïncide toujours avec l'image de la mire, et l'on s'arrête quand la lunette fait le plus petit angle possible avec sa position primitive. La quantité angulaire dont elle a tourné représente la déviation *minimum*. l est une petite lampe destinée à éclairer obliquement le réticule dans le cas où la mire a un faible éclat, et L' une lunette pointée sur la mire, servant à vérifier si l'appareil ne s'est pas dérangé pendant l'expérience.

L'abbé Dutirou, dans un grand travail sur lequel nous reviendrons, mesurait la déviation au moyen d'un appareil très-précis construit par Brunner, et qui n'est autre chose que le goniomètre de Babinet (2447), dont le collimateur fixe a été enlevé et remplacé par une mire éloignée. Le prisme est installé, au centre du cercle gradué, sur des plaques disposées comme celles de l'appareil (fig. 1818).

Enfin, le goniomètre de Babinet peut aussi servir à mesurer la déviation *minimum*, comme nous l'avons expliqué (2513). Avec ce dernier instrument, on ne se trompe pas de 1 minute. Or, d'après M. H. Deville, une erreur de 1 à 2 minutes, avec un prisme de 50°, de substance moyennement réfringente, n'influe que sur le 4^e chiffre décimal de la valeur de l'indice.

2552. Coloration des mires. — Quand on observe une mire à travers le prisme, elle paraît notablement élargie et colorée de nuances irisées disposées les unes à côté des autres. Ce phénomène, connu sous le nom de *dispersion*, rend incertaine la coïncidence de la mire avec le fil de la lunette. On pourrait faire disparaître l'épanouissement et la coloration de la mire en interposant un verre coloré; mais alors elle perdrait beaucoup de son éclat. On préfère généralement viser une couleur en particulier, et l'on a soin de noter à quelle couleur se rapporte l'indice mesuré. Ordinairement, on vise la couleur jaune, qui est placée vers le milieu, et qui présente le plus d'éclat. En agissant ainsi, il reste encore de l'incertitude quand on veut obtenir une grande précision, les couleurs n'étant pas nettement séparées et se fondant les unes dans les autres. On n'est donc pas sûr, dans deux expériences différentes, de viser au même point. La difficulté a été levée par une découverte de Fraunhofer, qui remarqua dans l'image étalée, des raies extrêmement fines parallèles aux bandes colorées, et toujours disposées suivant le même ordre dans chaque couleur, quelle que soit la matière du prisme, quand la lumière qui le traverse provient de la même source. Il suffira donc d'adopter une de ces raies dans la couleur que l'on visera.

M. H. Deville, dans des expériences faites avec le goniomètre de Babinet, a trouvé moyen d'obtenir un repère très-net sans avoir recours à ces raies. Il remplace le fil vertical du collimateur par une aiguille à coudre dont les deux bords forment des bandes colorées; ces bandes se superposent dans la partie la plus fine de l'aiguille, en donnant un trait net formé par la ligne de séparation de deux couleurs tranchées: un vert bleuâtre et un rose intense.

2553. Mesure de l'indice d'un milieu terminé par des plans parallèles. — On a souvent besoin de prendre l'indice de réfraction d'un corps qui a la forme d'une plaque. Le duc de Chaulnes a donné pour cela une méthode dont nous parlerons en traitant du microscope. M. F. Bernard a résolu la question au moyen du goniomètre de Babinet modifié¹. La lunette mobile, au lieu de tourner autour du centre de l'instrument, peut être déplacée parallèlement à elle-même au moyen d'une vis de rappel à tête micrométrique. La lame, fixée

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences, t. XXXIX, p. 27, et t. XLVIII, p. 120.

sur le support central de l'instrument, est d'abord placée perpendiculairement à l'axe du collimateur fixe, dont on fait coïncider les fils verticaux avec ceux de la lunette mobile. On fait ensuite tourner la plaque, d'une quantité angulaire i mesurée au moyen de l'alidade qui la porte; la coïncidence n'existe plus, à cause du déplacement latéral d qu'éprouvent les rayons, et l'on mesure ce déplacement en ramenant la coïncidence au moyen de la vis micrométrique. Ce déplacement d est lié à l'indice de réfraction, à l'épaisseur e et à l'angle d'incidence i par la formule (2502) $d = e \sin i \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 i}{n^2 - \sin^2 i}} \right)$, d'où l'on tire

$$n = \sin i \sqrt{1 + \left(\frac{e \cos i}{e \sin i - d} \right)^2}. \quad - \text{Pour plus d'exactitude, au lieu de}$$

mesurer simplement d , on tourne l'alidade d'une même quantité angulaire en sens opposé, et l'on mesure la distance $2d$, qui correspond aux deux positions symétriques de la plaque.

M. Pichot a appliqué cette méthode aux liquides placés dans une auge étroite à faces bien parallèles. Dans l'appareil qu'il a employé et qu'il nomme *réfractomètre*, c'est le collimateur, qui se meut parallèlement à lui-même. Il a aussi simplifié le calcul, en se servant de formules de Kepler. La lunette à laquelle on applique l'œil peut se mouvoir suivant son axe, au moyen d'une vis micrométrique, ce qui permet d'appliquer la méthode du duc de Chaulnes.

2554. Indices de réfraction des liquides. — Etot et Cauchoix ont appliqué la méthode de Newton aux liquides. Ils les renferment dans le *prisme-flacon* (fig. 1819), qui consiste en un prisme de verre percé transversalement d'un ou plusieurs trous o, o' fermés par des lames minces en verre appliquées sur les faces du prisme. Un petit canal c, c' , perpendiculaire à la base du prisme, sert à introduire le liquide, qui prend ainsi la forme d'un prisme, dont on mesure l'angle par la méthode de réflexion (2448), et auquel on applique la méthode de Newton après l'avoir enlevé de son pied.

Il est essentiel que les lames de verre qui limitent la masse liquide aient leurs faces bien parallèles. On choisit une lame mince travaillée avec soin, et l'on cherche les parties où les faces soient exactement parallèles. Pour cela, on observe les deux images d'une bougie, réfléchies sur les deux faces, pendant que l'on fait tourner la lame sur elle-même; les deux images restent parallèles, si les faces sont elles-mêmes bien parallèles dans la région où se fait la réflexion. On coupe alors la lame par un trait de diamant traversant cette région, et l'on applique les deux fragments sur les faces du prisme, en ayant soin, pour plus de sûreté, de mettre le bord coupé, du côté du sommet sur l'une des faces, et du côté de la base, sur l'autre, de manière que les déviations produites par les deux fragments s'entre-détruisent.

Malgré toutes les précautions, les lames produisent presque toujours une



Fig. 1819.

petite déviation. Pour en tenir compte, on vise la mire directement, puis, après avoir interposé le prisme-flacon vide, dans la position qui correspond au *minimum* de déviation. Le fil de la lunette s'écarte un peu de la mire; on rétablit la coïncidence, et le déplacement de la lunette mesure la déviation produite par les lames. Cette déviation doit être ajoutée ou retranchée à celle que produit le prisme liquide, suivant qu'elle est de sens contraire ou de même sens.

M. Ch. Montigny évite l'emploi de lames de verre, de la manière suivante¹. Il vise au moyen d'une lunette mobile sur un cercle vertical, une règle divisée fixée au fond d'un vase, dans le plan de ce cercle. Il verse ensuite le liquide dans le vase, et le point visé par la lunette, qui n'a pas été dérangée, n'est plus le même. L'angle d'incidence est égal à celui que fait la lunette avec la verticale, et l'angle de réfraction se déduit facilement de l'épaisseur du liquide et de la distance des deux points coïncidant successivement avec le réticule de la lunette. Cette méthode exige que l'on ait beaucoup de liquide et elle comporte des mesures de longueurs, qui ne sont jamais aussi précises que les mesures d'angles.

Quand on ne tient pas à une grande précision, on peut obtenir l'indice des liquides au moyen de l'appareil (fig. 1742).

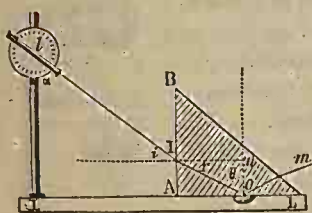


Fig. 1820.

Les liquides étant très-dilatables, les variations de température, même comprises entre les limites de celles de l'atmosphère, modifient sensiblement leur indice. Il faut donc opérer à une température bien constante, agiter vivement le liquide avant d'observer, pour qu'il soit bien homogène, et éviter d'employer les rayons solaires qui, en le traversant, l'échaufferaient inégalement.

2555. Méthodes par la réflexion

totale. — Quand on n'a que très-peu de liquide, on emploie des méthodes particulières, parmi lesquelles celle où l'on fait usage de la réflexion totale. Cette méthode, employée sous diverses formes, s'applique aussi aux corps peu transparents et aux matières molles, comme les couches du cristallin de l'œil.

Considérons d'abord un prisme rectangulaire posé sur une règle horizontale fixe LL (fig. 1820) et dont l'indice est connu. On fait adhérer sous sa face inférieure une goutte du liquide à étudier, liquide qui doit être *moins réfringent* que la matière du prisme; une cavité pratiquée dans la règle donne place à la goutte. On vise cette goutte à travers le prisme, au moyen d'une lunette *l* mobile au centre d'un cercle vertical gradué pouvant glisser sur un support vertical LL fixé à la table. La lunette étant d'abord assez élevée, on voit, à travers la goutte liquide, le fond de la cavité; mais si l'on abaisse peu à peu le cercle, l'angle *Ion* va en augmentant, et, tout à coup, on reçoit par réflexion totale en *o*, les rayons venant du côté *m*. On fixe alors la lunette, et l'on mesure l'angle α . Le moment

¹ Bulletin de l'Académie royale de Belgique, 2^e série, t. XVIII, n^o 7.

$\beta = 90^\circ - \alpha$, la valeur de l'angle $n'oi = 0$; puisqu'on a $n \sin \theta = n'$. Or, si nous prolongeons la normale in jusqu'à sa rencontre avec la normale im' , l'angle n est égal à l'angle lbc du prisme; et, si nous désignons cet angle par a , le triangle lno donne

$$0 = r + a, \quad \text{d'où} \quad \sin \theta = \frac{n'}{n} = \sin(r + a) = \sin r \cos a + \sin a \cos r.$$

Pour évaluer $\sin r$ et $\cos r$, on a $n \sin r = \sin i$, et le triangle $ln'n$ donne $n'ln = i + \beta = 90^\circ - a$; d'où $i = 90^\circ - a - \beta$. Donc,

$$\sin r = \frac{1}{n} \sin(90^\circ - a - \beta) = \frac{1}{n} \cos(a + \beta),$$

$$\text{et} \quad \cos r = \sqrt{1 - \sin^2 r} = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - \cos^2(a + \beta)}.$$

Portant les valeurs de $\sin r$ et $\cos r$ dans celle de $n' : n$, on en tire $n' = n \sin \theta = \cos(a + \beta) \cos a + \sin a \sqrt{n^2 - \cos^2(a + \beta)}$.

2557. Application de la méthode de la réflexion totale aux solides.

— Pour les corps mous, comme la cire, les substances organiques gélatineuses, il n'y a pas de difficulté. Quand le corps solide est dur, on l'applique sur le prisme par une face plane, et l'on a soin de chasser l'air interposé au moyen d'un liquide *plus réfringent* que le prisme, qui n'empêche pas la réflexion totale de se faire sur le corps solide. Ce moyen est précieux pour les corps que l'on n'a qu'en petits fragments, comme certains cristaux.

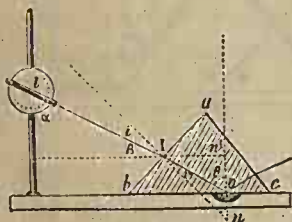


Fig. 1822.

On peut aussi, par cette méthode, prendre l'indice de la substance du prisme; il suffit alors de ne rien mettre sous la face inférieure. La formule précédente, dans laquelle on fait $n' = 1$, donne alors

$$n = \frac{1}{\sin a} \sqrt{1 + \cos^2(a + \beta) - 2 \cos a \cos(a + \beta)}.$$

On serait tenté d'employer un prisme à angle droit, en faisant $n = 1$ dans la formule $n' = \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}$; mais, pour que les rayons réfléchis totalement en o sortent par la face AB (fig. 1820), il faudrait que l'angle r , complémentaire de l'angle limite θ , fût moindre que lui, et que, par conséquent, θ fût plus grand que 45° ; ce qui suppose la matière du prisme moins réfringente que le verre, pour lequel l'angle limite est 41° .

Nous verrons plus tard d'autres méthodes de mesure des indices de réfraction : dans les unes, on fait usage du microscope; les autres sont fondées sur les principes du système des ondulations.

2558. Indice des liquides par réflexion totale sur l'air. — Cette

méthode, due à MM. Terquem et Trannin¹, n'exige pas, comme celle de Malus, l'emploi d'un prisme dont il faut connaître l'angle et l'indice; mais elle ne s'applique qu'aux liquides dont on a une assez grande quantité. Une petite auge carrée est fixée sur le cercle horizontal d'un goniomètre de Babinet, et dans son intérieur, au-dessus du centre, est soutenue verticalement par une potence portée par l'alidade mobile de l'instrument, une double plaque formée de deux glaces, entre lesquelles est emprisonnée une mince couche d'air. L'ajustement de la double plaque est facilité par le mode d'articulation de la tige qui la soutient par le milieu de son côté supérieur, et par la mobilité du bras horizontal de la potence. Après avoir placé la lunette bien en face du collimateur à lentille, la cuve vide étant placée de manière à présenter deux faces perpendiculaires aux rayons parallèles qui la traversent, on introduit le liquide en faisant tourner la plaque au moyen de l'alidade jusqu'à ce que l'on voie, à travers la lunette, la fente du collimateur disparaître. En ce moment, il y a réflexion totale sur la couche d'air. On tourne ensuite l'alidade en sens contraire jusqu'à ce que la même disparition se reproduise, et le déplacement imprimé à l'alidade représente le double de l'angle limite. Or, cet angle est le même que si les rayons parallèles passaient du liquide dans l'air sans l'intermédiaire de la lame de verre; en effet, en appelant x et n les indices du liquide et du verre, et supposant $x < n$, on a $\sin i = \frac{n}{x} \sin r$. Si r est l'angle limite pour un rayon passant du verre dans l'air, on a $\sin r = \frac{1}{n}$; remplaçant $\sin r$ par cette valeur dans la première équation, il vient $\sin i = \frac{1}{x}$, comme si le rayon passait directement du liquide dans l'air. Cette méthode a donné des résultats d'accord avec ceux qui ont été obtenus par les moyens les plus précis.

2559. Mesure de l'indice d'un solide de forme quelconque. — Quand un corps transparent est plongé dans un liquide possédant le même indice de réfraction que lui, il devient invisible, le passage des rayons par les surfaces de séparation se faisant sans résistance et sans réflexion ni réfraction. Par exemple, M. C. Tomlinson, ayant fait dissoudre dans très-peu d'eau, des équivalents en nombre égal de sulfate de zinc et de sulfate de soude, obtint un liquide, qui, entouré d'un mélange réfrigérant, se remplit de cristaux dont la présence se reconnaissait par le toucher, mais qui étaient tout à fait invisibles.

Brewster est parti de ce principe pour obtenir, par tâtonnement, l'indice d'un solide de forme quelconque; il le plongeait dans un mélange d'huile d'olive et d'essence de cassia, qui ont les indices 1,470 et 1,631, et dont il variait les proportions jusqu'à ce que le corps devint invisible. Il ne restait plus qu'à déterminer l'indice de réfraction du mélange. Ce moyen s'applique difficilement aux pierres précieuses, à cause de leur grande réfringence; mais il en fait

¹ *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. IV, p. 232.

distinguer les plus petits défauts, ce qui permet de reconnaître, dans la plupart des cas, si la pierre est naturelle ou fausse.

2560. Indice de réfraction des corps opaques. — La méthode par la réflexion totale présente cette particularité singulière, qu'elle s'applique aux matières opaques. Dans le cas où l'on opérerait avec un prisme droit, suivant la méthode de Wollaston (2555), il faudrait appliquer la formule $n' = \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}$. Mais rien n'autorise à étendre au cas des corps opaques les raisonnements par lesquels on rend compte de la réflexion totale et l'on calcule l'angle limite. Les forces qui agissent sur la lumière ne sont pas les mêmes dans les deux cas; les rayons, dans les corps opaques, étant absorbés en totalité, après avoir pénétré à une profondeur excessivement petite. Nous ferons connaître plus tard, en parlant de la lumière polarisée, une loi de Brewster, permettant de calculer l'indice de réfraction des corps opaques, et qui donne des résultats en désaccord avec ceux que l'on déduit de la réflexion totale; ce qui légitime les doutes que nous venons d'émettre. Des considérations tirées de la théorie de l'émission conduisent à doubler le second terme du radical dans la formule ci-dessus, qui devient alors $n'^2 = n^2 - 2 \cos^2 \alpha$; mais la théorie des ondulations ne conduit pas à cette formule.

2561. Puissance réfractive. Pouvoir réfringent. — Avant de faire connaître les indices de réfraction obtenus par divers physiciens, il nous faut poser quelques définitions. Nous verrons qu'il résulte des théories des ondulations, et de l'émission, que l'indice de réfraction représente le rapport des vitesses v et v' de la lumière dans les deux milieux consécutifs. On a donc $n = v' : v$, v' étant plus grand que v dans le système de l'émission. Si nous supposons un mobile qui suivrait la même route que la lumière, en éprouvant les mêmes changements de vitesse, sa *force vive* (I, 84) varierait, en passant d'un milieu dans l'autre, de $v'^2 - v^2$; et de $\frac{v'^2 - v^2}{v^2} = n^2 - 1$, par rapport à sa force vive primitive. La quantité $n^2 - 1$ indique donc l'effet que le milieu réfringent dans lequel pénètre la lumière exerce sur sa vitesse; on la nomme *puissance réfractive*. Si n était égal à 1, c'est-à-dire si le rayon n'éprouvait pas de déviation en changeant de milieu, la puissance réfractive serait nulle. n représente ici l'indice absolu, si l'un des milieux est le vide, et l'indice relatif, si les deux milieux sont pondérables.

Dans le système de l'émission, on trouve que la puissance réfractive est proportionnelle à la densité d ; de sorte que le rapport $(n^2 - 1) : d$ serait constant, quel que fût l'état de la substance dans laquelle pénètre le rayon, qu'elle fût, par exemple, comprimée ou dilatée, à l'état solide ou gazeux. Mais des expériences de Petit et Arago, faites sur les mêmes corps liquides ou à l'état de vapeur, ont prouvé que cette loi est fautive¹. Cela résulte aussi de la comparaison des indices de certaines vapeurs aux indices des liquides qui les fournissent (2567).

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. I, p. 4.

Cependant, la loi pourrait bien être vraie pour une même substance sous le même état, et dont la densité serait modifiée, soit par la chaleur, soit par la compression. M. Jamin a trouvé qu'elle est vraie pour l'eau différemment comprimée; de telle sorte qu'on peut, en partant de l'indice de réfraction sous différentes pressions, déterminer le coefficient de compressibilité de ce liquide. Nous verrons aussi que cette loi paraît vraie pour un même gaz à différentes pressions. Quoi qu'il en soit, on a donné le nom de *pouvoir réfringent*, au rapport $(n^2 - 1) : d$. Nous ajouterons que quelques auteurs désignent dans un autre sens, sous le nom de *pouvoir réfringent*, l'indice de réfraction absolu, pour le distinguer de l'indice relatif.

2562. Résultats. — Plusieurs physiciens ont donné des tables d'indices de réfraction. Le tableau qui suit renferme un certain nombre de résultats correspondant aux rayons jaunes, excepté ceux qui sont dus à Wollaston, et qui, d'après Young, appartiendraient au rouge extrême. Les noms des observateurs, Newton, Fraunhofer, Malus, Young, Biot, Wollaston, Herschell, Euler fils, Rochon, sont indiqués par les initiales de leur nom.

INDICES DE RÉFRACTION DES CORPS SOLIDES

NOMS DES SUBSTANCES	INDICES de RÉFRACTION	OBSERVA- TEURS	NOMS DES SUBSTANCES	INDICES de RÉFRACTION	OBSERVA- TEURS
Chromate de plomb.	de 2,50 à 2,97	Br.	Sucre	1,535	W.
Diamant	2,47 à 2,75	Br., R.	Acide phosphorique	1,544	Br.
Phosphore	2,224	Br.	Sulfate de cuivre..	1,531 à 1,552	Br.
Verre d'antimoine.	2,216	Br.	Baume de Canada..	1,532	Y.
Soufre natif	2,115	Br.	Acide citrique . . .	1,527	Br.
Zircon	1,95	W.	Nitre	1,514	Br.
Borate de plomb..	1,866	H.	Spermaceti	1,503	Y.
Carbonate de plomb	1,81 à 2,08	Br.	Crown-glass	1,500	W.
Rubis	1,779	Br.	Sulfate de potasse..	1,509	Br.
Feldspath	1,764	Br.	Sulfate de fer	1,494	Br.
Tourmaline	1,668	Br.	Suif; cire	1,492	Y.
Topaze incolore . . .	1,610	Bi.	Sulfate de magnésie	1,488	Br.
Bénil	1,598	Br.	Spath d'Islande . . .	1,654	M.
Écaille de tortue . .	1,591	Br.	Obsidienne	1,488	Br.
Émeraude	1,585	Br.	Gomme	1,476	N.
Flint-glass	1,57 à 1,58	Br., W.	Borax	1,475	Br.
Cristal de roche . . .	1,547	W.	Alun	1,457	W.
Sel gemme	1,545	N.	Spath fluor	1,436	Br.
Colophane	1,543	W.	Glace	1,310	W.

INDICES DE RÉFRACTION DES CORPS LIQUIDES

NOMS DES LIQUIDES	INDICES de RÉFRACTION	OBSERVA- TEURS	NOMS DES LIQUIDES	INDICES de RÉFRACTION	OBSERVA- TEURS
Sulfure de carbone.	1,678	Br.	Acide nitrique (den- sité, 1,48).....	1,410	Y., W.
Huile de cassia....	1,631	Y.	Dissolut. de potasse (densité, 1,416).	1,405	Fr.
Huile essentielle d'a- mandes amères...	1,603	Br.	Acide chlorhydrique concentré.....	1,410	Bi.
Huile de noix....	1,50	Br.	Sel marin à saturat ⁿ	1,575	»
— de lin.....	1,485	W.	Alcool rectifié....	1,372	H.
— de naphte...	1,475	Y.	Éther sulfurique...	1,358	W.
— de navette...	1,475	Br., Y.	Alun à saturation..	1,356	H.
— d'olive.....	1,470	Br.	Sang humain.....	1,354	Y.
— de térében- thine....	1,470	W.	Blanc d'œuf.....	1,351	E.
— d'amandes...	1,469	W.	Vinaigre distillé..	1,372	H.
— de lavande...	1,457	Br.	Salive.....	1,339	Y.
Acide sulfurique (densité 1,7)...	1,429	N.	Eau.....	1,336	W., Br.

Remarques. — 1^o Les indices de réfraction, attribués par divers physiiciens à la même substance, diffèrent souvent notablement, quelquefois dès la seconde décimale. Cela tient à l'imperfection des méthodes, aux différences entre les échantillons, et à la température. Malheureusement, la plupart des physiiciens ont négligé d'indiquer cette température, ainsi que la composition chimique des substances étudiées.

2^o Les résultats généraux que l'on peut déduire de la multitude d'indices mesurés sont peu nombreux. Newton, ayant remarqué que les huiles, qui sont combustibles, possèdent un indice assez grand, et que le diamant et l'eau ont un indice peu différent de ceux des huiles, avait conclu, avec une grande hardiesse, que le diamant et l'eau devaient contenir quelque principe combustible; ce que l'expérience a confirmé en montrant que le diamant est du carbone cristallisé, et que l'eau renferme un gaz inflammable.

3^o On peut dire, en général, que tout ce qui augmente la densité d'une même substance, augmente aussi sa réfrangibilité. Ainsi M. Jamin a trouvé, par une méthode très-délicate que nous ferons connaître plus tard, que la compression augmente sensiblement la réfrangibilité de l'eau. La dilatation par la chaleur diminue l'indice des liquides; ainsi, Brewster trouve que l'éther, dont l'indice est 1,358 à la température ordinaire, ne donne que 1,057 quand son volume est triplé par la chaleur. MM. Dale et Gladstone ont fait de nombreuses expériences à ce sujet, sur plus de 140 liquides différents, entre 0° et 50°¹. Ils

¹ Transactions philos., pour 1858, et Ann. de ch. et de phys., 3^e série, t. LVIII, p. 117.

ont employé l'appareil de Fraunhofer (2551); seulement le prisme était horizontal et chauffé par une lampe à alcool, ou refroidi par un mélange réfrigérant. Un thermomètre, avec lequel on agitait le liquide, en donnait la température. Le tableau suivant contient une partie des résultats trouvés; ces résultats sont relatifs à la raie D du spectre solaire (2510), excepté ceux du phosphore qui se rapportent à la raie C.

TEMPÉRA- TURE	SULFURE de CARBONE	EAU	ÉTHÉR	ALCOOL ABSOLU	ESPRIT DE BOIS	PHOSPHORE LIQUIDE	ESSENCE DE CASSIA
0°	1,6142	1,3330	»	»	»	»	»
19	1,6346	1,3327	1,3592	1,3658	1,3379	»	»
20	1,6261	1,3320	1,3515	1,3645	»	»	»
30	1,6182	1,3309	1,3495	1,3578	»	2,0741	»
40	1,6103	1,3297	»	1,3536	1,3297	2,0677	1,5796
50	»	1,3280	»	1,3491	»	2,0603	»
60	»	1,3259	»	1,3437	»	2,0515	1,5690

Arago a reconnu que l'indice de l'eau diminue d'une manière continue entre $-1^{\circ},3$ et $+5^{\circ},2$. Le passage par le *maximum* de densité ne change pas le sens des variations; résultat confirmé par M. Jamin et par MM. Dale et Gladstone.

4° Quand un corps passe de l'état solide à l'état liquide, tantôt la réfrangibilité diminue, comme pour l'acide phosphorique, la cire, le suif; tantôt elle augmente, comme pour l'eau, le borax; tantôt elle ne varie pas sensiblement, comme pour le sucre.

5° M. H. Deville a mesuré l'indice de réfraction de l'alcool, de l'esprit de bois et de l'acide acétique, mêlés d'eau en différentes proportions. Ces substances donnent le *maximum* de contraction ou de densité, quand on les unit à 3 équivalents d'eau. C'est aussi avec cette proportion d'eau que les deux dernières possèdent le *maximum* de réfrangibilité; tandis que ce *maximum* se présente, pour l'alcool, quand il y a un seul équivalent d'eau. A la température de 16° , l'alcool absolu a pour indice 1,3633, et avec un équivalent d'eau, 1,3662. L'esprit de bois et l'acide acétique anhydres ont pour indice 1,3358 et 1,3753; et avec 3 équivalents d'eau, 1,3462 et 1,3781¹.

MM. Landolt et Hagen et M. A. Wulner ont fait aussi beaucoup d'expériences sur les liquides, et en modifiant un peu la définition du pouvoir réfringent, l'ont trouvé à peu près constant².

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. V, p. 429.

² Annales de Poggendorff, t. CXXXI et CXXXIII.

II. Mesure de l'indice de réfraction des gaz.

2563. Mesure de l'indice de réfraction de l'air. — La réfraction de l'air, jouant un rôle important dans les observations astronomiques (2491), on conçoit combien il était important de la mesurer. D'un autre côté, les grandes variations de densité qu'éprouvent les gaz par la compression et la dilatation, faisaient espérer que l'on pourrait vérifier facilement la constance du *pouvoir réfringent* d'un même gaz placé dans différentes conditions. Aussi, avait-on fait, à l'ancienne Académie des sciences de Paris, de nombreuses tentatives pour évaluer la réfraction de l'air, mais on n'avait pu saisir de déviation dans un rayon traversant un prisme creux dans lequel on avait fait le vide. La Société royale de Londres fut plus heureuse : Lewthorp et Hauksbée, non-seulement obtinrent une déviation sensible, mais encore donnèrent une valeur assez exacte de l'indice de l'air. Borda, voulant reprendre les expériences de l'Académie de Paris, fit construire un prisme qui devait rendre la déviation sensible ; mais il n'en fit pas usage.

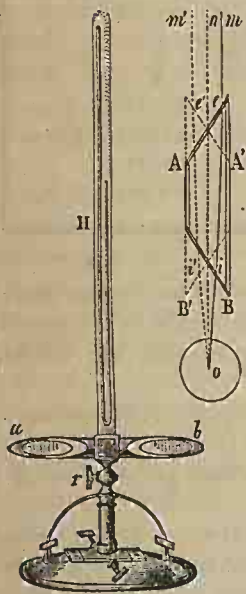


Fig. 1823.

baromètre à siphon, renfermé dans une éprouvette, II, donne la pression du gaz qui remplit le prisme.

Indice de réfraction de l'air. — Pour mesurer l'indice de réfraction de l'air, Biot et Arago ont fait le vide le plus parfait possible dans le prisme creux, après l'avoir bien desséché en y introduisant plusieurs fois de l'air sec, et ils ont ensuite appliqué la méthode de Newton, avec cette différence que, le prisme étant moins réfringent que le milieu ambiant, ils ont cherché la déviation *maximum* au lieu de la déviation *minimum* (2512). Le prisme et le cercle répé-

¹ *Mém. de l'Acad. des sc.*, t. VII (1807), et *Traité de phys.*, par Biot, t. III, p. 322.

titeur horizontal étant installés au Palais du Luxembourg, à Paris, un des paratonnerres de l'Observatoire servait de mire. Comme l'épaisseur du prisme empêchait de viser directement la mire, après avoir visé celle-ci à travers le prisme, dont on voit la coupe en AB, et obtenu le *maximum* de déviation au moyen du rayon *meio*, on amenait le prisme dans la position A'B' en lui faisant faire à peu près un demi-tour, et l'on visait de nouveau la mire sous le *maximum* de déviation. L'image *m'* se trouvant alors rejetée du côté opposé, par rapport à la droite *no* venant directement de la mire, l'angle *ioi'* représentait évidemment le double de la déviation *noi*. On retournait ensuite plusieurs fois le prisme dans les deux positions, de manière à appliquer la méthode de répétition. On évaluait de même la déviation que pouvaient produire les lames de verre fermant le prisme, en opérant sur ce prisme rempli d'air ambiant, et l'on en corrigeait les résultats.

Biot et Arago ont observé ainsi des déviations de quelques *minutes*, d'où ils ont déduit, pour l'indice de réfraction de l'air à la température de 0° et à la pression de 0^m,76, $n = 1,000\ 294$. La *puissance réfractive* est alors $n^2 - 1 = 0,000\ 588$. Ces nombres sont d'accord avec ceux que Delambre avait déduits des réfractions astronomiques.

2564. Indice des gaz autres que l'air. — L'indice de l'air étant connu, celui des autres gaz se détermine en en remplissant le prisme, avec toutes les précautions qu'on emploie dans les mesures de densité des gaz, et comparant leur indice de réfraction à celui de l'air ambiant. Biot et Arago ont expérimenté sur l'*oxygène*, l'*hydrogène*, l'*azote*, l'*acide carbonique*, le *gaz ammoniac*, et l'*acide chlorhydrique*. Ayant opéré sur ces gaz et sur l'air à diverses pressions, ils ont trouvé que la *puissance réfractive* ($n^2 - 1$) d'un même gaz est proportionnelle à sa densité; ou, ce qui revient au même, que le *pouvoir réfringent* d'un gaz est constant, quelle que soit sa température et sa pression. Cette loi s'applique aux mélanges gazeux, car la puissance réfractive du mélange est égale à la somme des puissances des gaz mélangés, rapportées à leur pression particulière dans le mélange.

Malheureusement, cette loi n'a été constatée que pour des pressions inférieures ou égales à la pression ordinaire de l'atmosphère, à cause de la difficulté de maintenir dans le prisme une pression plus grande. Or, dans des limites aussi restreintes, la proportionnalité ne peut manquer de se vérifier; car, si l'on pose, en général, en appelant *h* la pression du gaz, $n^2 - 1 = ah + bh^2 + ch^3 + \dots$, et si l'on suppose *h* plus petit que l'unité, on pourra négliger les termes en h^2 , h^3 , etc., et l'on aura $n^2 - 1 = ah$. On peut donc penser que la loi n'est qu'approximative, pour les faibles pressions; d'autant plus que les déviations observées laissent quelques incertitudes, d'abord à cause de leur petitesse, car elles ne sont que de quelques minutes, ensuite parce que les plus faibles changements dans l'état de l'atmosphère, pendant l'expérience, qui demande un temps assez long, modifient notablement les résultats. Il est vrai que les savants observateurs ont eu soin de choisir un état atmosphérique dans lequel ces changements ne pouvaient être qu'extrêmement lents. Néanmoins, la déviation

n'étant que de 5' environ, ils ont trouvé, en opérant à différentes époques, jusqu'à 16" de différence.

2565. Expériences de Dulong. — Dulong a fait un grand nombre d'expériences sur les indices des gaz, par une méthode assez prompte pour qu'il n'y ait pas à craindre les variations atmosphériques, et qui, de plus, n'exige pas le parfait parallélisme des lames¹. Dulong s'est appuyé sur la loi de la constance des pouvoirs réfringents, ce qui lui était permis, la pression des gaz n'ayant pas dépassé celle de l'atmosphère. Voici le principe de la méthode.

On vise avec une lunette à réticule une mire éloignée, à travers un prisme semblable à celui de Borda et rempli d'air sec. On fixe ce prisme, ainsi que la lunette, et on le remplit d'un autre gaz, dont on fait varier peu à peu la pression, jusqu'à ce que l'image de la mire coïncide de nouveau avec le fil du réticule. Il est évident que l'indice du gaz est égal sous cette pression, H' , à celui de l'air sec sous la pression, H , qu'il possédait. En appelant x et n les indices de réfraction du gaz et de l'air à la même pression H et à la même température, et N l'indice du gaz à la pression H' , lequel est égal à n , on aura pour le gaz, d'après la loi des puissances réfractives :

$$x^2 - 1 : N^2 - 1 = H : H', \quad \text{ou} \quad x^2 - 1 : n^2 - 1 = H : H'.$$

Si l'on voulait ramener les résultats à ce qu'ils seraient à une température et à une pression données, par exemple à la température de 0° et à la pression de 0^m,76, il n'y aurait rien à changer à la proportion, car il faudrait faire subir aux puissances réfractives les mêmes changements qu'aux densités, c'est-à-dire les multiplier par une même quantité dépendant de la pression et de la température, tous les gaz se dilatant et se comprimant de la même manière dans les limites des variations de l'atmosphère.

La figure 1824 représente l'appareil de Dulong; ab est le prisme creux, dont l'angle est de 145°; il communique avec un gros tube de verre TT , de 1 mètre de longueur, fermé à ses deux extrémités par des viroles de fer. La virole supérieure porte trois tubulures destinées à faire communiquer le tube T : la première, par le tube n avec le prisme; la deuxième et la troisième, par les tubes t, t , avec une machine pneumatique et avec une cloche C reposant sur une cuve à mercure et contenant le gaz à étudier. Le cylindre T peut être rempli de mercure par le tube latéral cd . L est une lunette fixe à réticule, au moyen de laquelle on vise la mire à travers le prisme. Cette lunette grossissait assez pour qu'on pût saisir dans l'élasticité de l'air une variation de 1^{mm}, correspondant à $\frac{1}{750}$ environ de l'effet total. Comme on ne pouvait répondre de la pureté des gaz qu'à moins $\frac{1}{200}$, un plus fort grossissement n'aurait pas donné plus de précision.

Après avoir desséché tout l'intérieur de l'appareil en y faisant passer un courant d'hydrogène sec, on faisait le vide, et l'on remplissait le prisme, par le

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXXI, p. 154.

robinet r' de la machine pneumatique, d'air sec à la pression atmosphérique; on visait la mire avec la lunette L , puis on fixait solidement le prisme et la lunette. On introduisait ensuite le gaz bien sec, en répétant plusieurs fois l'opération; puis, laissant échapper du mercure par le robinet inférieur r , on faisait varier la pression jusqu'à ce que la mire coïncidât de nouveau avec le fil du réticule de la lunette L . La pression était donnée par le tube barométrique m de la machine pneumatique.

Quand le gaz était moins réfringent que l'air, comme l'oxygène et l'hydrogène, au lieu de porter la pression au-dessus de celle de l'atmosphère, Dulong a préféré remplir d'abord le prisme de gaz, puis d'air sec, dont il diminuait la pression de manière à rétablir la coïncidence.

Quand le gaz attaquait le mercure, comme le chlore, on modifiait la méthode. Le tube n était composé de trois parties, représentées à part en ND (fig. 1824). La partie moyenne AB était surmontée d'une cuvette A dans laquelle s'enfonçait la partie N . En D était une autre cuvette recevant l'extrémité B , et il y avait assez de jeu pour que la partie AB pût s'enlever sans déranger les tubes N et D . Du mastic très-fusible, coulé dans les cuvettes, empêchait les fuites de gaz. Quand on voulait opérer sur un gaz attaquant le mercure, on enlevait la partie AB . On faisait passer à travers le prisme un courant de gaz arrivant par le tube supérieur HE et sortant en n . Quand la mire visée à travers le prisme ne paraissait plus se déplacer, ce qui indiquait

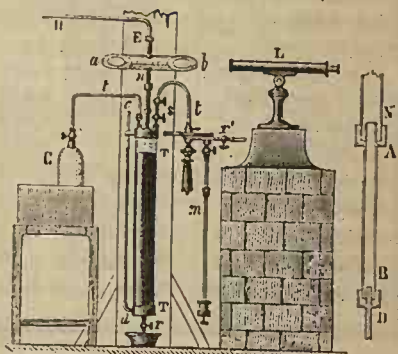


Fig. 1824.

que le gaz était pur, on fixait la lunette L . On chassait ensuite le gaz au moyen d'un courant d'acide carbonique, on rétablissait le tube AB en coulant du mastic en A et B , on fermait l'orifice E , et, après avoir fait le vide, on remplissait le prisme d'un gaz plus réfringent que celui sur lequel on venait d'opérer. Dans le cas du chlore, Dulong employait le cyanogène. La puissance réfractive K de ce dernier gaz par rapport à l'air ayant été mesurée, il évaluait celle du chlore par rapport à l'air en multipliant par K la puissance réfractive du chlore par rapport au cyanogène. Ce procédé étant assez long, on n'opérait que dans les circonstances atmosphériques les plus favorables, et vers le *maximum* de température du jour.

Pour opérer sur une vapeur ne pouvant supporter la pression atmosphérique à la température ordinaire, après avoir fait le vide, on remplissait de liquide l'intervalle des deux robinets s , et, ouvrant le robinet inférieur, on introduisait en T un peu de liquide, qui tombait en T et s'y répandait en vapeurs.

2566. Résultats. — Voici les résultats trouvés par Dulong :

GAZ OU VAPEURS	PUISSANCE RÉFRACTIVE			INDICE DE RÉFRACTION	DENSITÉ
	par rapport à l'air.	excès sur le calcul.	absolue $n^2 - 1$.		
Air	1,000	»	0,060589	1,000294	1,000
Oxygène.....	0,924	»	0,000544	1,000272	1,106
Hydrogène.....	0,470	»	0,000277	1,000138	0,069
Azote.....	1,020	»	0,000601	1,000300	0,971
Chlore.....	2,623	»	0,001545	1,000772	2,470
Protoxyde d'azote...	1,710	+ 0,228	0,001007	1,000503	1,520
Gaz nitreux.....	1,030	+ 0,058	0,000606	1,000303	1,039
Acide chlorhydrique..	1,527	- 0,020	0,000899	1,000449	1,247
Oxyde de carbone...	1,157	»	0,000681	1,000340	1,957
Acide carbonique....	1,526	- 0,093	0,000899	1,000449	»
Cyanogène.....	2,832	»	0,001668	1,000834	1,806
Gaz oléfiant.....	2,302	»	0,001356	1,000678	0,978
Gaz des marais....	1,504	»	0,000886	1,000443	0,555
Éther chlorhydrique..	3,720	- 0,099	0,002191	1,001095	2,234
Acide cyanhydrique..	1,531	- 0,130	0,000903	1,000451	0,944
Ammoniaque.....	1,309	+ 0,093	0,000771	1,000385	0,596
A. chloroxycarbonique	3,936	+ 0,0152	0,002318	1,001159	3,442
Acide sulhydrique..	2,187	»	0,001288	1,000644	1,191
Acide sulfureux....	2,260	»	0,001331	1,000665	2,234
Éther sulfurique....	5,197	»	0,003061	1,900153	2,580
Sulfure de carbone...	5,110	»	0,003010	1,100150	2,644
Phosphure d'hydrogène	2,682	»	0,001579	1,000789	1,214

Il résulte de ce tableau et des observations de Biot et Arago que :

1° Il n'y a pas de relation simple entre les puissances réfractives des différents gaz et leurs densités. Ainsi, la densité de la vapeur d'éther chlorhydrique est un peu plus faible que celle de l'acide sulfureux, et la puissance réfractive du premier est supérieure à celle de l'acide sulfureux, de plus des $\frac{2}{3}$ de celle-ci; la vapeur d'éther sulfurique possède à peu près la même densité que le chlore, et sa puissance réfractive est double. Les gaz simples ayant leurs molécules également distantes sous la même pression et à la même température, on voit que ces molécules n'agissent pas de la même manière sur la lumière; d'où l'on peut conclure que les capacités calorifiques et les puissances réfractives n'appartiennent pas au même ordre de cause.

2° La puissance réfractive des gaz et des vapeurs est proportionnelle à leur pression; mais cette loi n'a été vérifiée que pour des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Elle a été trouvée exacte pour des températures comprises entre 8° et 32°.

3° La puissance réfractive d'un mélange de gaz est égale à la somme des

puissances réfractives des gaz mélangés, rapportées à la pression particulière de chacun d'eux dans le mélange.

4^e La puissance réfractive d'un composé gazeux n'est pas égale à la somme des puissances des gaz composants; elle est tantôt plus grande, tantôt plus petite. Ce résultat, que Dulong a constaté sur le plus grand nombre de gaz possible, se voit dans la troisième colonne du tableau, où se trouvent les excès entre les résultats observés et ceux que donnent les sommes des puissances des gaz composants. Ces excès sont bien supérieurs à ceux qui pourraient provenir des erreurs d'observation. — L'air ayant une puissance réfractive égale à la somme des puissances de l'oxygène et de l'azote, rapportées à leur pression particulière, on en conclut que l'air est un mélange des deux gaz.

2567. Indice de la vapeur d'eau. — La vapeur d'eau existant dans l'atmosphère, il était important d'en connaître l'indice de réfraction. Laplace, ayant fait entrer cet indice dans ses formules de réfraction atmosphérique, en a calculé la valeur au moyen de l'indice de l'eau, en se servant de la loi des pouvoirs réfringents proportionnels à la densité, loi inexacte (2561). Biot a cherché à obtenir, par l'expérience, un résultat plus digne de confiance; mais il ne put saisir aucune différence de déviation quand le prisme de Borda était rempli d'air sec, ou d'air saturé de vapeur. M. Jamin a repris la question par une méthode très-précise que nous ferons connaître plus tard, et a trouvé, en appliquant la loi de la proportionnalité pour un même gaz, des puissances réfractives aux densités, que la vapeur d'eau, à la température de 0° et sous la pression de 0^m,76, aurait pour indice, si elle pouvait exister sous une semblable pression, la valeur 1,000261, moindre que l'indice de l'air dans les mêmes conditions. La puissance réfractive serait donc $n^2 - 1 = 0,000521$; tandis que, si on la calcule en partant de l'indice de l'eau, au moyen de la loi des pouvoirs réfringents, on trouve 0,000625.

En ajoutant à l'indice de l'air sec, celui de la vapeur d'eau à saturation sous la pression qu'elle possède à 20°, M. Jamin trouve que la différence entre les indices de l'air sec et de l'air saturé, n' , n'est que 0,000000726. La vapeur d'eau n'apporte donc à l'indice de l'air que des changements beaucoup trop faibles pour être sensibles avec le prisme de Borda. Il n'est donc pas étonnant que Biot n'ait pas trouvé de différence entre l'air sec et l'air humide, et l'on voit qu'il est inutile d'introduire dans les formules de réfraction atmosphérique, un terme relatif à la présence de l'humidité.

2568. Indice des vapeurs produites à des températures élevées. — L'action d'un corps sur la lumière qui le traverse dépend à la fois de sa structure et de la nature de sa substance. L'influence de la structure est éliminée dans l'état fluide, et en particulier dans l'état gazeux. C'est pourquoi M. Leroux a entrepris de mesurer les indices des vapeurs de divers corps simples qui ne se vaporisent qu'à une haute température¹. Il a déduit l'indice de la vapeur, par

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. LXI, p. 385.

rapport à l'air à la même température, de la déviation *minimum* à travers un prisme en fer fermé par des glaces et rempli de la vapeur à étudier. En admettant que le rapport des dilatations de l'air et de la vapeur soit constant, on peut regarder le pouvoir réfringent $(n^2 - 1) : d$ comme constant pour une même substance, et ramener par le calcul les indices des diverses vapeurs à la même température.

La figure 1825 représente l'appareil employé. Le prisme est représenté à part en P, P'; P est une coupe par un plan perpendiculaire aux arêtes, et P' une vue par l'arête de sommet placée verticalement. Ce prisme est percé suivant ll', d'un canal fermé par des glaces l et l' choisies avec soin. Ces glaces sont maintenues par des cadres de fer ff' et f' f', pressés par des pinces à vis, p, p...; un mastic, formé d'azotate de potasse et de blanc de Mendon, est interposé entre les glaces

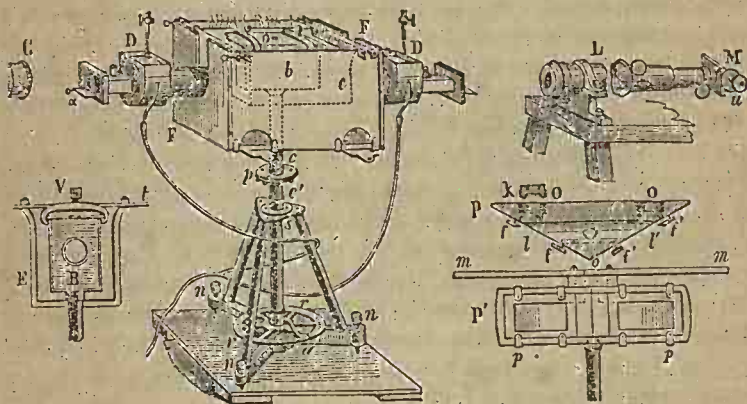


Fig. 1825.

et le prisme de fer. Quand la température devait dépasser 600°, l'azotate était remplacé par du borate de soude ou des silicates facilement fusibles. O, O sont des ouvertures destinées à nettoyer les glaces, et fermées par des bouchons à vis k.

Le prisme, dont l'angle est connu, est surmonté d'un tube par lequel s'échappe l'excès de vapeur; un disque mince posé sur l'ouverture o, o fait soupape, et permet à la pression intérieure de s'équilibrer avec l'extérieure. Le prisme est uni à une plaque de fer, mm, bien dressée et bien parallèle à sa base, par laquelle on le suspend dans une boîte en fer forgé, b, munie de deux ouvertures opposées, et représentée à part en VB. Des crochets à vis, V, serrent la plaque contre les bords bien dressés de la boîte, qui est entourée d'une enveloppe en tôle E, e, pouvant contenir du plomb fondu. La boîte est fixée à l'extrémité d'une colonne de fer ce' pouvant tourner sur elle-même sur une pointe inférieure, et

dans un collet *s*, pour appliquer le retournement. Les angles se mesurent sur un cercle gradué *rr*, au moyen du bras à vernier *a*.

Le prisme est échauffé au moyen d'un fourneau en tôle revêtu de briques *FF*, suspendu à la boîte et à son enveloppe, au moyen de deux traverses de fer, *t*, faisant corps avec l'enveloppe *E*. Pour éviter que les mouvements de l'air chaud à l'extérieur du prisme ne troublent les images, on a adapté aux ouvertures opposées de la boîte des tubes de fer *D, D* fermés par des glaces, et dans lesquels l'air chaud ne peut former de courants, et se trouve distribué en tranches à peu près verticales, qui ne dévient pas les rayons; comme on s'en est assuré, du reste, en opérant avec le prisme rempli d'air. Pour empêcher la chaleur d'arriver jusqu'aux glaces, il y a en *D, D* des portions de tube de cuivre, autour desquelles circule un courant d'eau.

La lumière d'une lampe, ou celle du soleil réfléchi par un héliostat, passe par un collimateur *C*, à fente verticale très-fine et portant une lentille *C*, qui rend les rayons parallèles. Les rayons qui ont traversé le prisme sont reçus par une lunette *L* destinée à observer la déviation. Cette lunette est fixe et munie d'un micromètre *M*, consistant en deux fils croisés inclinés à 45° sur l'horizon, et recevant un mouvement horizontal, d'une vis micrométrique, *u*, dont le pas a $\frac{1}{2}$ mm et dont la tête porte 200 divisions. L'oculaire se meut avec le micromètre, et grossit assez pour qu'on puisse apprécier le déplacement correspondant à 4 divisions de la tête. On mesure ainsi le déplacement de la mire quand le prisme agit sur la lumière, et on en déduit la déviation en considérant ce déplacement comme l'arc qui la mesure; arc dont le rayon est égal à la distance, d'environ 2^m , du micromètre au centre optique de l'objectif. Cette méthode permettait d'opérer rapidement, et l'erreur ne pouvait atteindre $1''$. — Comme la course du micromètre était peu étendue, quand on avait à mesurer une déviation de plus de $12'$, on plaçait près du collimateur, sur une petite plate-forme horizontale *x*, un mince prisme vertical dont la face d'entrée était bien parallèle à la glace fermant le tube *D*. La déviation de ce prisme, qui était de $17'$ environ, se mesurait sur l'appareil même.

Voici la marche de l'opération. On commence, en s'aidant d'un niveau à bulle d'air posé sur les bords de la boîte *b*, par la placer bien horizontale, au moyen des vis calantes *n*, et de vis appartenant à un double plateau *p*, réunissant les deux parties *e, e'* de l'arbre, et dont trois tendent à les rapprocher et trois autres à les écarter. On place ensuite le prisme, on chauffe jusqu'à 300° environ, pour ramollir le mastic, et l'on place les glaces des tubes *D, D*. On vise alors la mire lumineuse au milieu de sa largeur, on recommence après le retournement, et l'on connaît ainsi le double de la déviation produite par les glaces. On introduit ensuite dans le prisme la substance qui doit fournir la vapeur, et quand la température est arrivée au point convenable, on observe la déviation, en employant le retournement si la vapeur ne se dissipe pas trop vite. — Il est bon de terminer en chassant la vapeur par un courant d'air, et d'observer de nouveau la déviation produite par les glaces. — Toutes les causes d'erreur, discutées

minutieusement, ont été reconnues négligeables. Le tableau suivant renferme les résultats trouvés par M. Leroux :

SUBSTANCES	INDICES ABSOLUS	$n^2 - 1$ $\times 1000$	DENSITÉ (ρ)	POUVOIR réfringent P $\times 1000$	ÉQUIVA- LENTS $H = 1$	PRODUIT DE P par l'équivalent.
Soufre	1,001629	3,258	6,617	0,492	46	7,87
Phosphore . . .	1,001364	2,728	4,355	0,626	31	19,44
Arsenic	1,001444	2,229	10,390	0,214	75	16,08
Mercure	1,000556	1,442	6,976	0,159	100	15,93

Le pouvoir réfringent de la vapeur du soufre 0,0004923 et celui de l'oxygène trouvé par Dulong, 0,0004924, sont égaux, et l'on sait que ces corps ont de nombreuses analogies chimiques. Une comparaison semblable peut être faite entre les pouvoirs réfringents 0,0006264 et 0,0006187 du phosphore et de l'azote. Mais la loi qui semble ressortir de ce rapprochement n'est appuyée jusqu'à présent que sur ces deux cas.

Nous aurons à revenir plus tard, quand nous aurons fait connaître le principe des interférences, sur la mesure des indices des gaz et des vapeurs, par une méthode fondée sur ce principe,

CHAPITRE IV

CHROMATIQUE

« Nec variat lux fracta colorem. »
NEWTON.

§ 1. — DISPERSION, OU DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR RÉFRACTION

2569. Définitions. — Nous avons considéré jusqu'à présent les rayons lumineux comme des lignes mathématiques, abstraction faite des qualités ou propriétés physiques qui peuvent les distinguer, et nous avons étudié les changements de direction qu'ils éprouvent quand ils se réfléchissent ou se réfractent dans différentes conditions ; étude qui constitue l'*optique géométrique*. On peut, en se plaçant à un autre point de vue, considérer les phénomènes qui dépendent

des qualités particulières que peuvent présenter les rayons lumineux, phénomènes qui se manifestent soit par la manière dont ces rayons impressionnent l'organe de la vue, soit par les effets divers qu'ils produisent en se rencontrant, ou qu'ils éprouvent de la part des milieux qu'ils traversent. Cette seconde branche de l'optique est l'*optique physique* dont nous allons nous occuper dans ce chapitre et dans les suivants.

Chromatique. — La lumière émise par les corps lumineux, ou renvoyée d'une manière diffuse par les corps éclairés, produit sur l'organe de la vue, des impressions diverses indépendantes de l'intensité et de la direction des rayons, et que nous désignons par le mot *couleur*. La partie de l'optique qui traite des couleurs est la *chromatique*, science créée par Newton; avant lui on n'avait sur ce sujet que des notions vagues ou erronées.

Les couleurs peuvent être considérées dans les rayons lumineux, ou dans les corps éclairés, qui les réfléchissent d'une manière diffuse et avec des teintes qui dépendent de leur substance et de l'état de leur surface. Ces couleurs, dont la nature embellit et diversifie à l'infini toutes ses productions, nous font distinguer les objets, indépendamment de leur forme, de leur grandeur et de leur position, par l'espèce de lumière qu'ils nous renvoient. Nous considérerons d'abord les couleurs dans les rayons lumineux.

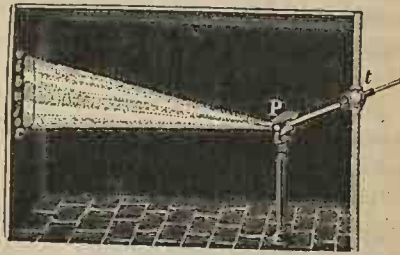


Fig. 1826.

2570. SPECTRE SOLAIRE. — On a cru pendant longtemps, qu'il n'y avait rien de plus indécomposable qu'un rayon lumineux, et si quelque philosophe se fût avisé de prédire qu'on pourrait un jour en séparer plusieurs parties distinctes, il n'eût certainement rencontré que des incroyables. Une expérience ancienne, reproduite et variée par Newton, lui a servi de point de départ pour une longue série de brillantes expériences dans lesquelles il a fait « l'anatomie de la lumière » et a prouvé que la lumière blanche la plus pure est composée d'une multitude de rayons de couleur différente. Voici cette expérience.

On fait passer à travers un prisme P (fig. 1826) un mince pinceau *tP* de rayons solaires. Ce pinceau est dévié vers la base, et si on le reçoit sur un écran blanc, on reconnaît qu'il s'étale en éventail *perpendiculairement aux arêtes du prisme*, c'est-à-dire dans le plan de réfraction; tandis qu'il conserve ses dimensions dans le sens parallèle à ces arêtes. En outre, l'image allongée projetée sur l'écran se montre colorée des nuances les plus vives, se succédant d'une extrémité à l'autre. Newton a donné à cette image le nom de *spectre solaire*, et au phénomène de l'apparition des couleurs dans le faisceau réfracté, le nom de *dispersion*. La forme du spectre solaire est une bande allongée

perpendiculairement aux arêtes du prisme; les bords latéraux sont nettement limités, mais les extrémités sont diffuses et arrondies.

Newton a distingué dans le spectre solaire sept couleurs principales, qui sont, en commençant du côté de la base du prisme :

violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge;

série facile à retenir, parce qu'elle forme un vers alexandrin. Ces sept couleurs se désignent souvent sous les noms de *couleurs du spectre, couleurs de l'iris*. Elles ne sont pas les seules, car on remarque qu'elles se fondent les unes dans les autres, de manière qu'on ne peut reconnaître les limites précises qui les séparent. Il y a donc une infinité de couleurs intermédiaires. Nous devons dire cependant qu'il existe une multitude d'interruptions dans le spectre solaire, mais elles sont excessivement étroites; nous les étudierons en particulier sous le nom de *raies du spectre*, et nous verrons quelle est leur importance, et quel merveilleux parti on en a tiré. Fraunhofer a désigné les 8 principales par les premières lettres A, B, C... Il de l'alphabet en commençant par l'extrémité rouge du spectre.

Newton, afin d'éviter toute objection relativement aux modifications que la réflexion pourrait faire subir aux qualités des rayons, a fait ses expériences sur des rayons solaires entrant directement par le volet de la chambre obscure. Quand on veut faire de même, on introduit les rayons solaires par un tube *t* (*fig. 1826*) qui traverse une sphère pouvant tourner sur elle-même dans une cavité annulaire de même courbure, ce qui permet de placer le tube dans diverses directions. Quand il ne s'agit que de répéter les expériences, on peut employer sans inconvénient la lumière solaire réfléchie par un miroir métallique, ou, dans la plupart des cas, la lampe photo-électrique, ou oxy-hydrique.

Les rayons de la plupart des sources lumineuses donnent un spectre, généralement moins brillant que celui du soleil. Les couleurs sont disposées, sauf avec certains prismes liquides, dans le même ordre, mais quelques-unes peuvent manquer, et l'on voit à leur place des espaces obscurs.

La dispersion était connue des anciens. Sénèque en parle, et fait un rapprochement très-juste entre ce phénomène et celui de l'arc-en-ciel. Grimaldi n'avait vu dans la dispersion, qu'une dilatation accidentelle du faisceau, due au défaut d'homogénéité du prisme, et il attribua les couleurs à une modification apportée par le verre à la nature des rayons, et dépendant de l'épaisseur qu'ils traversaient.

Le P. de Chales a fait beaucoup d'expériences sur le spectre, et est arrivé en combattant certaines idées de Descartes à formuler quelques idées assez justes. Trente ans plus tard, Newton ayant cherché à construire des lentilles sans aberration, reconnut que cela était impossible à cause de la dispersion, les divers rayons colorés formant des foyers différents. Il étudia alors cette dispersion, et consigna les résultats de ses expériences dans son *Traité d'optique*, destiné

spécialement au développement de la théorie des couleurs, ouvrage qui excita, lors de son apparition, une admiration comparable à celle qui avait accueilli le livre des *Principes* (I, 164).

2571. De l'étendue du spectre solaire. — 1° La longueur du spectre augmente avec l'angle du prisme, comme on peut le constater au moyen des prismes à angle variable (2510). Pour avoir un beau spectre, on emploie un prisme en *flint-glass*, dont l'angle est au moins de 60° (fig. 1827).

2° L'étendue du spectre dépend de la substance du prisme. On le reconnaît au moyen du *polyprisme* AB (fig. 1828), composé de plusieurs prismes de même angle, mais de substance différente; on fait tomber sur ce

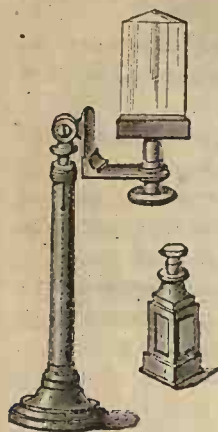


Fig. 1827.

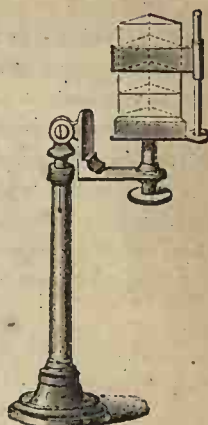


Fig. 1828.

système, un faisceau mince et assez large dans le sens des arêtes, pour rencontrer à la fois tous les prismes, et l'on obtient plusieurs spectres placés les uns à côté des autres, et de position et d'étendue très-différentes. Si les prismes sont incolores, on remarque que tous les spectres présentent les mêmes couleurs disposées dans le même ordre; mais ces couleurs n'y occupent pas des espaces proportionnels. Par exemple, avec un prisme de verre ordinaire ou *crown-glass*, le rouge occupe relativement plus de place que dans le spectre formé par un prisme de même angle en *flint-glass* ou cristal, et le spectre de ce dernier renferme plus de violet que celui du premier prisme. Un petit écran, ajouté par M. J. Duboscq, et glissant sur une tige parallèle aux arêtes, permet de masquer un des prismes, à volonté.

Pour faire la même expérience avec des prismes liquides, on emploie le petit appareil *ae* (fig. 1829). Les deux lamies de verre *abce*, *a'b'ce* sont à faces bien parallèles, et l'on remplit les compartiments avec différents liquides. Le spectre que produit l'eau, est peu étalé; on le rend très-brillant, en saturant l'eau d'acétate de plomb. — L'essence de térébenthine et le sulfure de carbone donnent des spectres très-brillants. On voit (fig. 1827) le flacon-prisme dans lequel on renferme le liquide.

L'inégale répartition des couleurs dans les spectres formés par divers prismes, fait dont nous verrons l'importance pratique (2608), a été découvert par Clairaut et Boscovich, et confirmé par Blair, puis par Brewster, après avoir été contesté

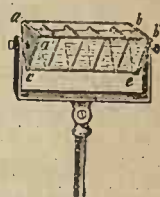


Fig. 1829.

par Wollaston. Il avait échappé à la sagacité de Newton, qui même avait cru saisir une relation entre les distances des limites incertaines des couleurs à un point pris hors du spectre, et les longueurs de cordes donnant une certaine gamme mineure.

2572. THÉORIE DE NEWTON. — Après avoir observé la dispersion dans les conditions les plus variées, Newton a expliqué ce phénomène au moyen des trois principes suivants :

1° *La lumière blanche n'est pas simple, mais composée d'une infinité de rayons différents présentant les couleurs que l'on observe dans le spectre.*

2° *Ces divers rayons sont inégalement réfringibles; ce qui fait qu'ils se séparent les uns des autres en se réfractant. La dispersion n'est donc autre chose que la décomposition de la lumière dans l'acte de la réfraction.*

3° *Les rayons qui composent le spectre sont simples et indécomposables, et à chaque couleur correspond un degré de réfrangibilité particulier.*

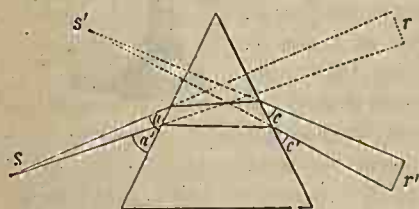


Fig. 1830.

Pour établir cette théorie, il faut prouver que : 1° l'épanouissement du faisceau et la forme allongée du spectre qui en résulte, ne peuvent être produits par des rayons également réfringibles; 2° les divers rayons colorés ont des réfrangibilités différentes allant en croissant, du rouge au

violet; 3° ils sont indécomposables par une nouvelle réfraction; 4° tous les rayons colorés qui composent le spectre étant réunis et mélangés, forment de la lumière blanche. C'est ce que Newton a établi de la manière la plus évidente, au moyen de nombreuses expériences que nous allons passer en revue.

2573. I. L'allongement du spectre est incompatible avec l'égalité réfrangibilité des rayons. — Quand un mince faisceau conique de rayons tous également réfringibles traverse un prisme placé dans la position newtonienne ou du *minimum* de déviation du rayon moyen (2511), la section droite du faisceau émergent a sensiblement la même forme que celle du faisceau incident. Soit *s* (fig. 1830), un faisceau incident formant un cône droit; nous allons d'abord prouver que les angles *s* et *s'* des rayons limitant le faisceau dans la section droite du prisme, sont égaux. Soit *a*, *a'*, et *c*, *c'* les angles des rayons limites incidents et émergents, avec les deux faces du prisme; on a $s = a' - a$ et $s' = c - c'$; et pour que *s'* soit égal à *s*, il suffit que l'on ait $a = c$ et $a' = c'$. Or, le rayon qui forme l'axe du cône incident étant dans la position du *minimum* de déviation, la partie incidente et la partie émergente de ce rayon sont également inclinées sur les faces du prisme (2511), et l'on a aussi, sensiblement, $a = c$ et $c' = a'$; car, dans le voisinage du *minimum*, de petites variations dans l'angle d'incidence n'en apportent que de très-faibles dans la

déviations ; ce que montre aussi l'expérience. Les dimensions du faisceau émergent n'étant pas modifiées dans un plan parallèle aux arêtes du prisme, la forme de la section r' sera la même que celle de r .

Ce résultat peut se vérifier par l'expérience, en interposant dans le faisceau incident une lame de verre rouge, qui ne laisse passer que des rayons également réfrangibles : l'image du trou circulaire du volet se projette sur un écran, sous la forme d'un cercle, quand le prisme est dans la position newtonienne, mais si on le fait tourner, l'image s'allonge dans le plan de réfraction quand le faisceau incident se relève vers le sommet, et s'aplatit, quand le faisceau s'abaisse vers la base. — On peut aussi expérimenter en regardant un corps sphérique à travers le prisme et la lame de verre rouge ; ce corps paraît rond dans la position du *minimum*, allongé quand les rayons entrant dans l'œil s'abaissent vers la base, et aplati quand ces rayons sont relevés vers le sommet ; contrairement à ce qui a lieu quand l'image est reçue sur un écran (2506).

Il résulte de ce qui précède que, le spectre étant allongé lors de la déviation *minimum*, le faisceau dispersé ne peut être formé de rayons également réfrangibles.

2574. II. Les divers rayons colorés sont inégalement réfrangibles.

— Sur ce point, Newton a multiplié les expériences :

1° On isole un très-mince pinceau de rayons sortant d'un prisme P (*fig. 1831*)

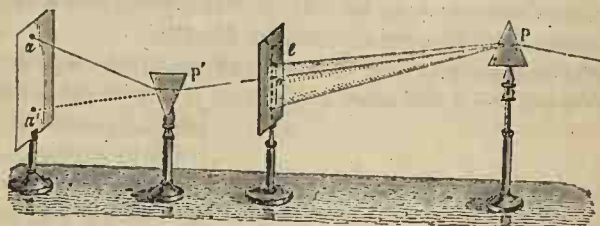


Fig. 1831.

en faisant tomber le spectre e sur un écran percé de petits trous. Ces trous sont fermés par des lames à coulisse, excepté celui qui doit laisser passer le pinceau que l'on veut isoler. Ce pinceau traverse un second prisme P' , qui le dévie vers sa base, et que l'on place dans la position newtonienne. La distance aa' de l'image a projetée sur un écran, à l'image directe a' que forme le rayon quand le prisme P' est enlevé, sert de mesure à la déviation. En opérant ainsi avec les rayons des différentes couleurs, on trouve que la distance aa' est plus grande pour les rayons violets que pour tous les autres, et va en diminuant du violet au rouge, pour lequel elle est la plus petite.

2° On fait l'expérience des prismes croisés. Le spectre donné par le prisme P (*fig. 1832*) est reçu sur un second prisme P' , dont les arêtes sont perpendi-

culaires à celles du premier, et qui dévie de nouveau les rayons lumineux. On remarque que le spectre $r'v'$ est rejeté du côté de la base du prisme P' , en rv , et *obliquement*, de manière que l'extrémité violette v se trouve plus éloignée du spectre direct $r'v'$, que l'extrémité rouge r . Les rayons violets ont donc été plus déviés que les autres par le second prisme. — Les bords du spectre ainsi déplacé étant rectilignes, on en conclut que la réfrangibilité des rayons colorés croît d'une manière continue, du rouge au violet, comme on pouvait le prévoir, puisque les couleurs se fondent les unes dans les autres. De plus, si le second prisme P' est identique au pre-

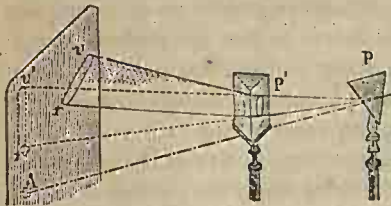


Fig. 1832.

mier, et si les rayons entrent sous la même incidence, les distances $v'v$ et $r'r$ sont égales aux distances Av' , Ar' ; ce qui montre que la réfrangibilité de chaque rayon n'est pas modifiée par son passage à travers le premier prisme.

Newton a donné à cette expérience une forme encore plus piquante : on superpose sur un même écran deux spectres inverses rv , $v'r'$ (fig. 1833), formés par deux prismes égaux P , P' recevant chacun un pinceau de rayons solaires, et l'on regarde ce double spectre avec un troisième prisme p perpendiculaire aux deux autres; on voit les deux spectres déplacés vers le sommet du troisième prisme (2506), et croisés comme en RV , $R'V'$.

Les expériences qui précèdent montrent bien que la coloration du faisceau dispersé n'est pas due à une action exercée sur la lumière par la matière du prisme, puisque le second prisme ne produit pas cet effet, le spectre déplacé n'étant pas étalé dans le plan de réfraction.

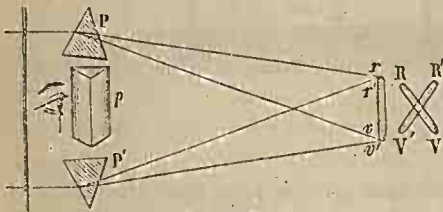


Fig. 1833.

3^o Newton a encore prouvé l'inégale réfrangibilité des rayons, au moyen de la réflexion totale. L'angle limite θ étant lié avec l'indice de réfraction n

par la formule $\sin \theta = 1 : n$ (2485), cet angle doit être d'autant plus petit que les rayons sont plus réfringibles. On prend un prisme isocèle à angle droit ABC (fig. 1834), on fait tomber sur l'une des petites faces un pinceau, s , qui donne un spectre vr ; puis, inclinant peu à peu le prisme, on augmente l'angle du rayon sn avec la normale à CB , et on le rend sensiblement égal à l'angle limite. Or, cet angle étant, pour le verre, de 41° environ, le rayon incident sera alors à peu près perpendiculaire à la face AC , qu'il traversera sans déviation et par suite sans dispersion, et tous les rayons colorés qui le composent tomberont sur

CB sous la même incidence. Cependant, ils ne commencent pas à éprouver la réflexion totale au même instant : les rayons violets l'éprouvent les premiers, puis les rayons indigos, bleus, etc., et ces rayons disparaissent successivement dans le spectre rv . Pour en constater la présence dans le rayon qui émerge en c , on le reçoit sur un second prisme abc , qui forme un spectre pâle $r'v'$ à cause d'un peu de lumière blanche réfléchi à la surface BC. Mais, dès que les rayons violets, indigos, bleus... disparaissent successivement dans le spectre rv , on les voit apparaître avec un vil éclat dans le spectre $r'v'$, à leur place ordinaire. Newton désignait ce phénomène sous le nom d'*inégaie réflexibilité* des rayons.

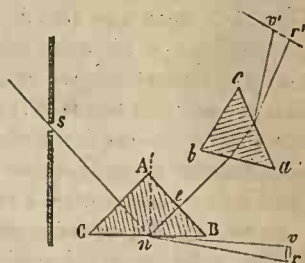


Fig. 1834.

4^o De peur qu'on n'attribuât l'inégale réfrangibilité à une modification que les rayons auraient éprouvée par l'action du verre, Newton a opéré de la manière suivante, sur des rayons qui n'ont pas traversé un premier prisme. On place parallèlement aux arêtes d'un prisme ABC (fig. 1835) une bande de papier Br bien éclairée, dont une moitié, b , est bleue, et l'autre, r , rouge. En regardant cette bande à travers le prisme, on voit les deux moitiés séparées l'une de l'autre, la partie bleue, b' , étant plus relevée vers le sommet que la partie rouge, r' ; ce qui prouve que les rayons envoyés par la bande bleue arrivent dans l'œil après avoir été plus déviés que les rayons rouges. L'expérience se fait de même avec deux autres couleurs, et les deux parties de la bande sont d'autant plus écartées que ces couleurs sont plus éloignées l'une de l'autre dans le spectre.

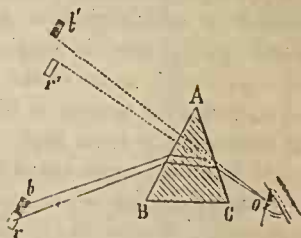


Fig. 1735.

5^o Voici encore quelques expériences de Newton : on peint une moitié d'une feuille imprimée et bien éclairée, en violet, et l'autre en rouge; ou bien on projette sur la feuille blanche un spectre solaire, et l'on reçoit sur un écran l'image de la feuille, formée par une lentille. On trouve que l'écran doit être plus près de la lentille pour voir nettement l'image des caractères qui sont sur fond violet, que pour voir l'image de ceux qui sont sur fond rouge. Quand on emploie le spectre, il est essentiel d'opérer dans une chambre complètement obscure, pour que la feuille imprimée ne reçoive pas d'autres rayons que ceux du spectre.

2575. III. Les rayons du spectre sont simples. — Quand on reçoit sur un prisme P' (fig. 1831) un pinceau coloré séparé par l'écran e , du faisceau dispersé par le prisme P, on remarque que ce faisceau est dévié en a sans éprouver de nouvelle coloration, et l'image a conserve la forme de l'ouverture

de l'écran, si le prisme P' donne la déviation *minimum*. Newton a conclu de là que les rayons colorés du spectre sont *simples* et *homogènes*. Cette conclusion a d'abord été attaquée par plusieurs physiciens, parmi lesquels on est étonné de trouver Mariotte. C'est qu'on ne prenait pas assez de précautions pour éviter le mélange de rayons de différentes couleurs en un même point du spectre. Des expériences faites avec plus de soin confirmèrent celles de Newton. Depuis, on a soutenu que, si les rayons colorés ne peuvent être décomposés par la réfraction, ils peuvent l'être par absorption à travers certains milieux colorés ; mais nous verrons plus loin (2587) que la simplicité des rayons colorés du spectre est sortie victorieuse des nombreuses épreuves auxquelles elle a été soumise dernièrement, et que *la couleur des rayons est liée à leur réfrangibilité*, chaque rayon coloré correspondant à une réfrangibilité particulière.

2576. IV. Le mélange des couleurs du spectre forme du blanc. — Newton a fait un grand nombre d'expériences pour réunir les couleurs du



Fig. 1836

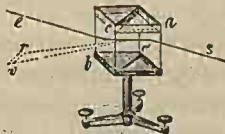


Fig. 1837.

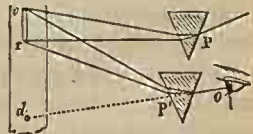


Fig. 1838.

spectre solaire, soit en ramenant au parallélisme les rayons divergents qui le forment, soit en les rassemblant en un même point :

1° On reçoit le faisceau s dispersé par un prisme P (fig. 1836) sur un second prisme P' de même angle et de même substance, mais ayant son sommet tourné du côté opposé à celui du premier. Les deux prismes étant assez près l'un de l'autre pour que le second reçoive le faisceau tout entier, les rayons sont ramenés au parallélisme, et forment un faisceau de lumière blanche. Si les prismes n'ont pas exactement le même angle et ne sont pas de même substance, on arrive encore au même résultat quand les différences sont peu prononcées, en donnant au second prisme une position convenable. — On peut encore prendre une cuve rectangulaire de verre ab (fig. 1837), partagée en deux par une cloison diagonale cc' ; on verse de l'eau dans un des compartiments acc' , et l'on fait passer un faisceau s à travers le prisme formé par la cloison et par l'une des faces, ac' . Ce faisceau donne un spectre rv ; mais le faisceau est ramené en e à sa forme cylindrique et à sa blancheur primitive, dès qu'on remplit d'eau le second compartiment, qui forme un prisme dont l'angle est opposé à celui du premier.

Enfin, on peut projeter simplement le spectre rv (fig. 1838) sur un écran blanc, et le regarder à travers le second prisme P' , placé très-près du premier, et ayant son sommet du même côté. En tournant peu à peu le prisme P' , on finit par apercevoir une image blanche d ; car un rayon de lumière blanche venant de o fournirait le spectre rv après avoir traversé le prisme P' , et les rayons

doivent suivre la même route quand ils viennent en sens contraire, des différents points de rv , et se confondre en formant le faisceau blanc o . Il faut que l'obscurité soit complète, afin que le spectre rv ne reçoive pas de lumière étrangère. Si le prisme P est assez long, on peut regarder à travers une section différente de celle que traversent les rayons qui forment le spectre, et l'on n'a plus besoin du second prisme.

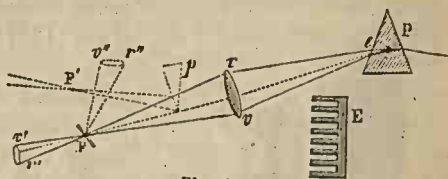


Fig. 1839.

2° On recompose la lumière blanche en rassemblant en un même point les rayons colorés qui forment le spectre. On peut se servir pour cela d'une lentille rv (fig. 1839) assez grande pour recevoir tout entier le faisceau dispersé par le prisme P . Les rayons qui ont traversé la lentille se croisent en F , image de l'ouverture de la chambre noire, et continuent leur route en produisant un second spectre $r'v'$ renversé par rapport à rv ; ce qui montre que les rayons colorés ne se modifient pas au foyer, et que chacun d'eux conserve ses qualités en se mélangeant aux autres. — Il en est encore de même quand ces rayons sont réfléchis en F , sur un petit miroir plan; car on obtient un spectre $r''v''$ symétrique de $r'v'$ par rapport au plan de ce miroir. Les différents rayons colorés ne forment pas leur foyer au même point, mais dans un espace assez petit; si l'on place un écran blanc dans cet espace, chaque couleur est réfléchie diffusément et se mêle ainsi aux autres, de manière à donner une image blanche.

Si l'on intercepte, avec une règle parallèle aux arêtes du prisme, quelques-unes des couleurs du spectre, l'image focale F reçue sur un écran blanc n'est plus blanche, et sa couleur change quand on déplace la règle. Pour intercepter des couleurs non contiguës, on emploie un écran découpé E . Si l'on imprime à cet écran un mouvement de va et vient très-rapide, l'image focale paraît blanche; c'est que l'impression faite dans l'œil ayant une durée d'environ $\frac{1}{10}$ de seconde, les couleurs se succèdent assez rapidement au foyer pour que les impressions subsistent simultanément.

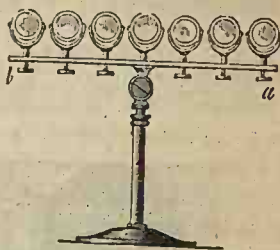


Fig 1840.

Par la même raison, si l'on fait osciller rapidement le prisme ou le miroir F , de manière que toutes les parties du spectre se superposent successivement les unes sur les autres, on ne voit plus de couleurs sur l'écran blanc.

Tous ces résultats peuvent s'obtenir également au moyen d'un miroir sphérique concave.

3° On peut encore rassembler en un même point les rayons dispersés par un prisme, au moyen de 7 petits miroirs plans (fig. 1840) mobiles dans tous les

sens et pouvant être rapprochés plus ou moins les uns des autres sur la barre *ab*. On les dispose de manière que chacun d'eux reçoive une des couleurs principales du faisceau dispersé, et que les 7 faisceaux réfléchis se croisent en un même point, où ils forment de la lumière blanche.

4^o La durée des impressions produites dans l'œil a suggéré à Newton l'expérience suivante : on divise un disque de carton *D* (fig. 1841) en 7 secteurs peints des couleurs du spectre, et d'étendue convenable. Quand on fait tourner rapidement ce disque, au moyen du mécanisme *mp*, il paraît blanc. — Musschenbroeck expérimentait avec une toupie dont la surface était divisée suivant les méridiens, en 7 parties peintes.

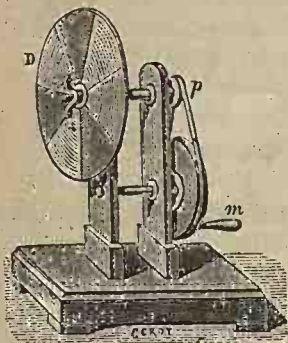


Fig. 1841.

M. Duboscq a imaginé d'employer des secteurs colorés, en verre ou en gélatine (fig. 1842) à travers lesquels on regarde la lumière des nuées. Cette lumière conserve sa blancheur pendant le mouvement de rotation. — On peut aussi mettre le disque dans un faisceau de rayons solaires divergents, obtenus avec une lentille;

les secteurs se peignent sur un écran éloigné; et l'image devient blanche pendant la rotation.

5^o Newton a cherché à obtenir la couleur blanche, en mélangeant des poudres, colorées des principales nuances du spectre; mais il restait toujours une teinte grise, ce qui tient à ce que les poudres absorbent beaucoup de lumière, l'effet étant le même que celui que produisent les corps blancs peu éclairés, qui paraissent gris. Newton ayant éclairé, par les rayons solaires, un mélange de poudres d'orpiment, de pourpre, d'azur et de vert-de-gris, et ayant

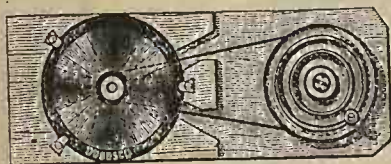


Fig. 1842. — 1/6.

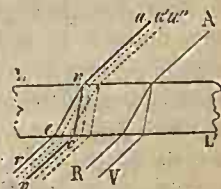


Fig. 1843.

placé à côté, mais à l'ombre, une feuille de papier blanc, le papier parut gris, et la poudre, d'un blanc éclatant.

2577. Explication de quelques phénomènes. — Quand un faisceau de rayons lumineux traverse un milieu incolore terminé par des plans parallèles, il sort sans présenter de coloration, quoiqu'il éprouve la dispersion dans l'intérieur

du milieu. Cela tient à ce que tous les rayons émergents sont parallèles aux rayons incidents dont ils proviennent. Considérons, par exemple, un faisceau de lumière blanche aa (fig. 1843) tombant sur une lame de verre LL' . Un rayon a sera décomposé dans l'intérieur de la lame, en un faisceau coloré très-mince cne , et formera à sa sortie un pinceau parallèle rv , dans lequel seront distribués des rayons de toutes les couleurs. Mais le rayon voisin, a' , fournira un rayon rouge qui, tombant dans l'espace ec , se superposera au rayon orangé provenant de a . De même, le rayon a'' formera un rayon rouge qui se superposera au rayon jaune de a et au rayon orangé de a' ; de sorte qu'à une distance insensible du bord er du faisceau émergent, on aura toutes les couleurs superposées, et par conséquent de la lumière blanche. Les bords r et v du faisceau rV présenteront des rayons colorés séparés, mais parallèles et distribués dans un espace rV tellement étroit que les couleurs seront insensibles, à moins que la lame ne soit très-épaisse. — On peut observer la décomposition qui se fait dans l'intérieur de la lame, en faisant tomber très-obliquement un très-mince pinceau de rayons solaires sur une couche d'huile de cassia placée dans une auge de verre à faces bien parallèles; on distingue la dispersion produite par la première réfraction, avant que les couleurs ne se réunissent à la seconde.

On voit que la recomposition de la lumière dispersée en dedans a lieu à l'émergence, parce que les rayons réfractés font des angles égaux avec les faces d'entrée et de sortie. La recomposition aurait donc lieu si, cette condition étant remplie, les faces n'étaient pas parallèles; d'où l'explication de l'expérience suivante.

Expérience de Charles. — On fait tomber sur un prisme équilatéral ABC (fig. 1844) un pinceau si de rayons solaires dans la direction du *minimum* de déviation, et en un point i situé au tiers du côté AB , condition toujours réalisée par une partie des rayons quand le pinceau est gros. On obtient d'abord un spectre r ; une partie du pinceau réfracté ia se réfléchit en a , suivant ac , parallèle à AB , et donne un pinceau émergent cb , parfaitement blanc. C'est que le pinceau ac étant la continuation de ia , et rencontrant la face CB en dessous, et en faisant avec elle le même angle que ia avec la face AB , le pinceau brisé iac est dans le même cas que s'il traversait un milieu terminé par deux faces parallèles. Les rayons émergents cb forment donc un pinceau cylindrique. Une réflexion partielle en c donne un faisceau cd qui émerge en d et produit un second spectre r' . Le pinceau réfléchi de , ayant le violet en dessous par rapport à la face AC , donne le pinceau blanc eb' , et en même temps le pinceau réfléchi en qui donne lieu au spectre r'' . Enfin, la portion de lumière qui se réfléchit en n donne le faisceau blanc b'' , et en i il se fait une réflexion partielle qui donne un pinceau qui se confond avec ia , de manière que les rayons qui émergeront ou se réfléchiront ne seront que reproduire les images déjà formées. — Ces résultats

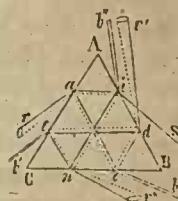


Fig. 1844.

se vérifient par l'expérience, et l'on voit que les images r , b , r' , b' ... sont de plus en plus faibles. — Comme les deux images r , b' sont très-peu éloignées l'une de l'autre comparativement à leur distance au prisme, on peut trouver le *minimum* de déviation, dans le cas du prisme isocèle, en le faisant tourner jusqu'à ce que ces deux images, l'une blanche, l'autre colorée, se superposent.

2578. Bords irisés des corps vus à travers un prisme. — Quand on regarde une ligne lumineuse, ou une ligne blanche éclairée sur un fond noir, à travers un prisme qui lui est parallèle, on aperçoit un spectre dont le violet se trouve du côté du sommet. C'est que la ligne doit être considérée comme formée de lignes superposées colorées des diverses nuances du spectre, et donnant des images d'autant plus relevées vers le sommet que les rayons simples sont plus réfrangibles (2574). C'est en regardant ainsi les sources faibles à travers un prisme qu'on obtient le spectre de ces sources. Les étoiles donnent, par ce moyen, des spectres brillants, qu'on ne pourrait obtenir par projection sur un écran.

Quand la ligne blanche est remplacée par une large bande, les deux côtés parallèles aux arêtes du prisme sont bordés de couleurs irisées, le violet terminant le bord tourné du côté du sommet du prisme, et le rouge le bord opposé. Entre ces bords irisés se trouve le fond blanc de la bande. Les côtés perpendiculaires aux arêtes du prisme ne sont pas colorés. Ici, on doit considérer tous les éléments linéaires de la bande, parallèle aux arêtes, comme formant autant de spectres. Ces spectres se superposent à une certaine distance des bords, et il y a en chaque point toutes les couleurs réunies, ce qui produit du blanc. Mais, près du bord qui se trouve du côté du sommet, le premier spectre n'est recouvert qu'en partie par les suivants; de sorte que l'on a d'abord du violet pur, puis le violet du spectre suivant mêlé avec l'indigo du premier, puis le violet du troisième mêlé au bleu du premier et à l'indigo du deuxième..., et ainsi de suite jusqu'au point où commence le blanc. Au bord opposé, on a du rouge, puis du rouge mêlé à de l'orangé... Si la bande n'est pas suffisamment large, la partie blanche peut ne pas exister. Si cette bande est noire sur un fond blanc, c'est le fond qui donne les couleurs, et elles sont évidemment distribuées dans un ordre inverse.

Quand la bande possède une couleur propre, on a encore des bords irisés, mais dont l'aspect dépend du mélange de rayons qui forme la couleur du corps. Si la bande est assez large, il y a entre les bords irisés un espace présentant cette couleur.

Quand la bande est longue, elle présente la forme d'un arc dont la convexité est du côté de la base du prisme. C'est que les rayons qui partent des extrémités passent obliquement, et sont dans le même cas que s'ils traversaient un prisme à angle plus grand; ils sont donc plus déviés, ce qui les fait paraître plus relevés vers le sommet.

Quand on regarde une flamme à travers un morceau de verre taillé à facettes, tout rayon qui passe par deux faces formant un angle donne un spectre, comme

s'il avait traversé un prisme. C'est ainsi que se forment ces couleurs irisées que l'on voit dans les morceaux de verre à facettes que l'on suspend aux lustres. Les diamants taillés produisent des effets analogues.

2579. Aberration de réfrangibilité des lentilles. — Il résulte de la dispersion que les rayons qui traversent une lentille doivent se décomposer en se déviant, et que les divers rayons colorés ne peuvent former leur foyer à la même distance de la lentille, même si elle est aplanétique. Alors, les images focales seront irisées sur leur contour, d'où un défaut de netteté, désigné sous le nom d'*aberration chromatique ou de réfrangibilité*. Cet effet peut être montré au moyen de la lentille (fig. 1796), sur laquelle on applique le disque à fente circulaire. Quand on fait passer des rayons à travers cette lentille, l'image projetée sur un écran placé à diverses distances est irisée sur son contour. On distingue particulièrement le bleu et l'orangé; celui-ci en dehors, quand l'écran est plus près de la lentille que l'image focale, et en dedans dans le cas contraire.

2580. MANIÈRE D'ISOLER LES RAYONS DU SPECTRE. — Plusieurs expériences de dispersion doivent être faites avec un spectre dont les couleurs soient bien séparées les unes des autres. Pour remplir cette condition, Newton a prescrit les règles suivantes :

1° Il faut employer un prisme en verre pur et exempt de stries, et lui donner un grand angle. Un prisme de sulfure de carbone maintenu à une température uniforme, produit un spectre brillant et étalé.

2° Le faisceau incident doit être très-mince perpendiculairement aux arêtes du prisme. En effet, si nous considérons deux rayons a et a' (fig. 1845), chacun d'eux forme un spectre particulier rv , $r'v'$, ces spectres se superposent et leurs couleurs se mêlent dans la partie $r'v$. On voit que les deux spectres sont d'autant plus près de coïncider que l'épaisseur aa' est moindre. Les rayons compris entre a et a' donnent, de même, des spectres qui viennent mêler leurs couleurs à celles des spectres extrêmes rv , $r'v'$. En considérant en particulier l'espace cn , n étant le point où le rayon violet du faisceau arv coupe le rayon rouge du faisceau $a'r'v'$, on voit qu'il passe en chaque point de cet espace un rayon de chaque couleur, et que, par conséquent, cet espace est blanc : en effet, si l'on rapproche peu à peu le rayon a du rayon a' , le spectre rv empiètera de plus en plus sur le spectre $r'v'$, et se confondra avec lui quand le rayon a coïncidera avec le rayon a' . Pendant ce mouvement, les différents rayons colorés qui forment le spectre rv passent successivement par le point n ou par tout autre point de l'espace cn . Or, le résultat serait le même, si, au lieu d'un rayon mobile de a en a' , on considérait les rayons fixes qui remplissent toute l'épaisseur aa' .

Les faisceaux cylindriques, rouge, r' , et violet v' (fig. 1845), divergeant entre eux, plus l'écran sera éloigné, plus le spectre qu'il reçoit sera pur. Par

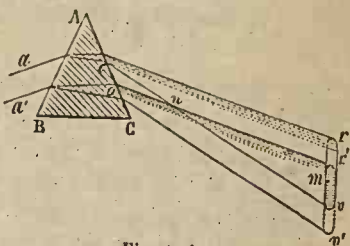


Fig. 1845.

exemple, jusqu'en n , du rouge se mêle au violet, tandis qu'en rv' , ces deux couleurs sont séparées de celles de la partie moyenne du spectre. Il faut donc placer l'écran loin du prisme.

4° Les rayons incidents ne doivent pas être divergents. En effet, supposons qu'ils divergent en formant un cône droit, et que le prisme soit placé de manière à donner la déviation *minimum*. Les rayons de chaque couleur formeront un

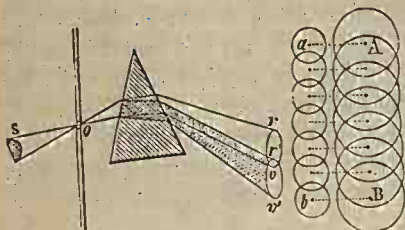


Fig. 1846.

cône qui produira sur un écran éloigné une image arrondie (fig. 1846). Par exemple, les rayons rouges et les rayons violets formeront les images, rv , $r'v'$, d'autant plus écartées que l'écran sera plus éloigné, et d'autant plus rapprochées, pour une même distance, que l'angle du cône incident sera plus grand. On voit donc que, moins le faisceau sera divergent, plus les images seront

petites, et plus les couleurs en chaque point seront pures; comme on le voit en AB et ab . — On peut calculer le nombre de couleurs qui passent par un point donné, quand on connaît le rayon r de chaque image et la longueur totale l du spectre, et si l'on suppose que les centres des cercles correspondant aux 7 couleurs sont également espacés. En effet, tous les cercles dont les centres sont à des distances du point donné moindre que r apportent leur couleur en ce point. Or, les centres qui satisfont à cette condition occupent un espace $2r$; et comme tous les centres sont distribués sur une longueur totale $l - 2r$, on voit que le nombre des cercles qui se superposent, au point donné, est proportionnel à $2r : (l - rv)$; valeur positive, puisque l est toujours plus grand que $2r$, d'autant plus petite que r est lui-même plus petit, et nulle pour $r = 0$, comme on pouvait le prévoir.

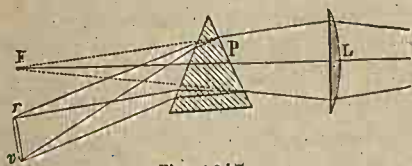


Fig. 1847.

5° Le diamètre apparent du corps lumineux qui fournit le faisceau incident doit être aussi petit que possible; car, le faisceau incident passant par une très-petite ouverture o , est d'autant plus divergent que ce diamètre apparent est plus grand. Par exemple, s'il s'agit du soleil, ce faisceau forme un cône dont l'angle au sommet est de $31'$. De plus, il y a autour de chaque image colorée une pénombre qui rend confus les contours de chaque cercle coloré, et qui est d'autant plus étendue que le diamètre apparent est plus grand. On peut diminuer la divergence des rayons solaires, en faisant passer le faisceau à travers deux ouvertures étroites; mais le spectre est alors peu brillant. Pour en obtenir un très-lumineux et à couleurs bien séparées, Newton fait tomber un faisceau

venant d'une fente étroite sur une lentille à très-long foyer L (fig. 1847) placée très-près du prisme P, et dispose au foyer, un écran blanc sur lequel chaque couleur produit un *focus* très-brillant et très-étroit. Il vaut mieux encore employer une lentille cylindrique parallèle aux arêtes du prisme, et qui donne pour chaque couleur, une bande focale mince et bien séparée des autres. — L. Foucault a perfectionné cette méthode, principalement par l'addition entre le prisme et la lentille, d'un diaphragme qui arrête les rayons qui, passant trop près des bords de celle-ci, tendent à iriser chaque trait coloré. On voit aussi que le spectre est d'autant plus étalé que la lentille est placée plus près du prisme, qui alors est plus éloigné du spectre, l'écran devant être à une distance déterminée de la lentille. — Nous ajouterons, en terminant, que le meilleur signe de la pureté des couleurs d'un spectre est l'apparition des *raies*, dont nous avons déjà dit quelques mots ci-dessus (2570).

§ 2. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR ABSORPTION

2581. Absorption de la lumière par les milieux diaphanes. — Nous avons vu (2378) qu'il n'y a pas de corps absolument opaques, et que tous laissent passer la lumière quand ils sont en lame suffisamment mince. De même, il n'y a pas de corps parfaitement transparents; tous absorbent une partie de la lumière qui les traverse; mais pour certains d'entre eux, comme le verre, l'eau, l'air, la proportion absorbée est tellement faible qu'elle n'est appréciable que lorsqu'ils sont en grande épaisseur.

Certains milieux ont la propriété de donner à la lumière blanche qui les traverse une couleur d'autant plus prononcée qu'ils sont en couche plus épaisse; tels sont les verres et les liquides dits *colorés*. On explique ce résultat en admettant que ces milieux absorbent en différente proportion, les divers rayons qui composent la lumière blanche. Ainsi, un verre rouge est celui qui absorbe beaucoup moins les rayons rouges que les rayons de toute autre couleur. Si les rayons émergents sont d'un rouge simple, comme cela a lieu avec une lame de verre de 1^{mm} d'épaisseur colorée en rouge par le protoxyde de cuivre, c'est que la substance est *opaque* pour tous les rayons autres que les rayons rouges. Pour justifier cette théorie, on regarde un spectre à travers le verre rouge; on ne voit que la partie rouge, les rayons provenant des autres parties étant arrêtés. Si le verre n'est pas d'une couleur simple, on aperçoit, dans les parties du spectre dont les rayons sont le plus absorbés, des bandes d'autant plus sombres que la lame est plus épaisse. Par exemple, avec un verre bleu azur, il ne reste, quand l'épaisseur est suffisante, que les rayons rouges et violets. — On peut aussi procéder par projection, en interposant le verre rouge dans le faisceau dispersé rencontrant un écran.

Si l'on fait passer les rayons qui ont traversé un verre rouge, à travers un second verre de même couleur, ce dernier n'absorbe qu'une très-faible propor-

tion de la lumière qu'il reçoit, les rayons qui ne peuvent traverser le verre rouge ayant été arrêtés par la première lame, de telle sorte que la seconde ne reçoit que les rayons qui passent facilement. Si, au contraire, le second verre était d'une couleur verte ne pouvant laisser passer les rayons rouges, les deux verres superposés formeraient une lame opaque. Nous avons vu que les rayons de chaleur donnent, en traversant des lames diathermanes, des résultats semblables, qui s'expliquent de la même manière (II, 879).

Un milieu incolore est celui qui laisse passer dans les mêmes proportions toutes les espèces de rayons colorés ; la lumière blanche qui traverse un semblable milieu reste blanche. Il n'y a pas de milieu absolument incolore ; l'eau et l'air eux-mêmes décomposent la lumière qui les traverse sous une très-grande épaisseur, comme nous le verrons plus loin.

2582. Formule d'absorption. — La quantité de lumière de chaque couleur, qui traverse une lame dépend de l'épaisseur de celle-ci et du *coefficient d'absorption* correspondant. Pour calculer la couleur d'un faisceau de lumière blanche qui a traversé une semblable lame, nous emploierons la formule $i = Ia^e$, dans laquelle e représente l'épaisseur de la lame, I l'intensité de la lumière incidente, et a la proportion qui traverse une tranche d'épaisseur égale à l'unité (2423). La quantité absorbée est alors $I(1 - a^e)$.

Considérons un faisceau composé de rayons des principales couleurs du spectre ; l'intensité de ce faisceau sera, à son entrée :

$$R + O + J + U + B + I + V,$$

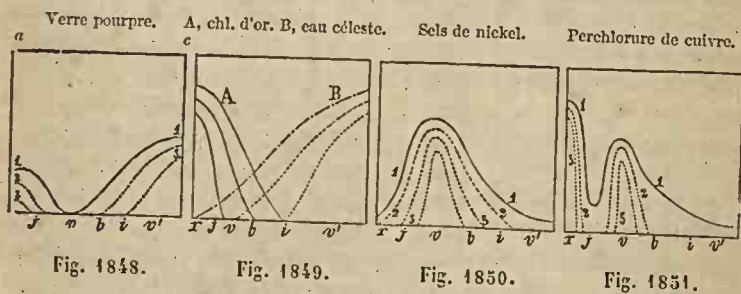
les lettres représentant les intensités particulières de chaque espèce de rayon, soit r, o, j, u, b, i et v les fractions de chaque rayon qui traversent, sans être absorbées, une épaisseur égale à l'unité, l'intensité du faisceau émergent sera

$$Rr^e + Oo^e + Jj^e + Uu^e + Bb^e + Ii^e + Vv^e. \quad [1]$$

Les termes qui contiennent les fractions r, o, j, \dots les plus petites décroissent le plus rapidement quand e augmente. Les couleurs qui correspondent aux autres termes domineront donc alors de plus en plus, et la lumière émergente ne sera plus blanche. Si les rayons d'une espèce, par exemple les rayons rouges, sont moins absorbés que tous les autres, on pourra toujours, en augmentant suffisamment l'épaisseur, obtenir les rayons émergents rouges sensiblement homogènes ; car, en augmentant e , on peut toujours rendre aussi grands que l'on veut les rapports $(Rr^e : Oo^e)$, $(Rr^e : Jj^e)$, etc. — Quand les quantités r, o, j, \dots diffèrent peu de l'unité, et que l'épaisseur est faible, la somme [1] diffère peu de celle qui représente le faisceau incident, et la lumière n'est pas sensiblement colorée.

2583. Représentation graphique des résultats. — Pour rendre plus facile l'interprétation de la formule, W. Herschell emploie les constructions

graphiques¹. Distribuons sur une horizontale ju' (fig. 1848) les différentes couleurs du spectre, et représentons par des ordonnées élevées au milieu de chaque couleur, les intensités des divers rayons colorés quand ils ont traversé un milieu d'épaisseur donnée. Supposons aussi que tous les rayons colorés entrent avec la même intensité, représentée par 1, et prenons ja égal à l'unité; la droite ac sera l'emblème d'un milieu incolore, c'est-à-dire qui laisserait passer également sans absorption tous les rayons colorés. S'il s'agit d'un milieu coloré, prenons sur les ordonnées des longueurs proportionnelles à $re, o^e \dots ve$. Nous obtiendrons une ligne, 1, qui sera la *courbe emblème* d'un milieu coloré d'épaisseur e . Pour une autre épaisseur, nous aurions une autre courbe, 2; et l'on reconnaîtra facilement ainsi quelles sont les couleurs qui tendent à disparaître pour laisser prédominer les autres. Par exemple, si la courbe a un *maximum* dans le vert (fig. 1850), c'est que les rayons verts passent plus facilement que tous les autres; à mesure que l'épaisseur augmente, la couleur verte domine, s'épure de plus en plus, et tend à devenir homogène. C'est ce qui a lieu pour les



verres colorés en vert, les dissolutions de sels de cuivre, de nickel, etc., qui absorbent fortement les extrémités du spectre; le rouge plus que le violet, si leur teinte est bleuâtre, et le violet plus que le rouge, si elle est jaunâtre.

Pour juger de la forme de la courbe, on regarde un trait lumineux à travers un prisme et à travers la lame colorée. Partout où le spectre est assombri, la courbe s'abaisse, et d'autant plus que la teinte est plus sombre. Cette méthode ne donne que des *à peu près*, la diminution d'intensité dans une couleur ne pouvant s'évaluer exactement, et, de plus, les couleurs ne pouvant s'apprécier sûrement à cause d'effets de contraste.

2584. Polychroïsme. — Il résulte de la théorie précédente que certains milieux doivent paraître d'une couleur différente, suivant l'épaisseur qu'on leur donne. C'est, en effet, ce qui a lieu, et ce phénomène est connu sous le nom de *polychroïsme*. Considérons d'abord un milieu tel que la courbe emblème aille en diminuant du rouge au violet. Si le rouge domine, même dans les plus faibles épaisseurs, la couleur, toujours rouge, sera de plus en plus foncée et de plus en

¹ *Traité de la lumière*, traduction française, t. I, p. 293.

plus pure, à mesure que l'épaisseur augmentera. C'est ce qui a lieu avec les verres rouges écarlates. Mais, si le coefficient d'absorption des rayons orangés et jaunes diffère peu de celui des rayons rouges (A, fig. 1849), la teinte sera jaune pour les faibles épaisseurs, et brunira, puis passera au rouge quand l'épaisseur augmentera. Tels sont : le vin de Porto, l'infusion de safran, le perchlorure de fer, le chlorure d'or, l'eau-de-vie vieille, etc. On vérifie cela facilement en donnant à la substance la forme d'un prisme à angle aigu; la couleur n'est pas la même aux différentes distances de l'angle.

Il peut arriver que la courbe emblème ait deux *maximum*. W. Herschell propose de nommer *dichromatiques* les milieux qui sont dans ce cas, parce que, laissant passer particulièrement deux sortes de rayons, ils sont comme s'ils avaient deux couleurs : par exemple, les solutions de chlorure de chrome, de vert de vessie, de manganate de potasse, l'infusion de pétales de certaines fleurs rouges et les mélanges des liquides rouges et verts, ou rouges et bleus, ont un

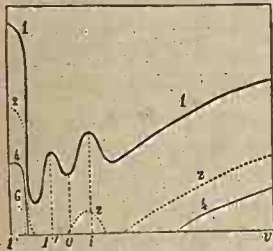


Fig. 1852.

maximum dans le rouge et un autre dans le vert. Le plus souvent le *maximum* rouge l'emporte sur le vert, de sorte que la teinte devient livide et rougeâtre à mesure que l'épaisseur augmente (fig. 1851). Les verres pourpres et cramoisis, les solutions acides et alcalines de cobalt, etc., sont aussi dichromatiques; ces substances absorbent fortement les parties moyennes du spectre, les unes passant au violet quand l'épaisseur augmente, les autres passant au rouge.

Les milieux bleus sont le plus souvent *dichromatiques*; ils absorbent surtout les rayons rouges et jaunes les plus éclatants, et laissent passer facilement les rayons violets (B, fig. 1849). Parmi ceux dont le pouvoir absorbant décroît le plus régulièrement depuis le rouge jusqu'au violet, il faut citer les dissolutions des sels de cuivre, par exemple l'eau céleste, que l'on obtient en saturant le sulfate de cuivre avec le carbonate d'ammoniaque. Un tube de verre de 12^{cm} de longueur, fermé par des glaces et rempli de ce liquide, donne une lumière violette bien homogène.

Parmi les milieux bleus, Herschell cite, comme un des plus curieux, le verre azur ou bleu de cobalt, qui prend une teinte rougeâtre de plus en plus prononcée, et devient tout à fait rouge quand on augmente son épaisseur. La courbe emblème de ce milieu présente plusieurs *maximum* (fig. 1852). La courbe 1 correspond à une épaisseur de 1 millimètre, les courbes 2, 4 et 6, à des épaisseurs double, quadruple et sextuple.

2585. Influence de la chaleur. — La chaleur rend généralement plus foncée la teinte des corps transparents, comme le remarquent souvent ceux qui fondent les minéraux au chalumeau, et la couleur reprend sa première nuance par le refroidissement; le dérangement des molécules par la dilatation augmente donc la faculté absorbante de ces milieux. Quelquefois la chaleur change la

couleur. Ainsi, Brewster a trouvé des minéraux transparents et des verres colorés qui passent du rouge au vert quand on les chauffe, et redeviennent rouges par le refroidissement.

L'influence de la chaleur se voit aussi dans les expériences suivantes de Faraday¹. Une feuille d'or, n'ayant que $\frac{1}{4200}$ mm d'épaisseur, est rendue 10 à 20 fois plus mince par l'action d'une solution de cyanure de potassium, puis appliquée sur une lame de verre. Cette feuille laisse passer de la lumière verte; mais si on la chauffe fortement, elle devient incolore par transmission et semble disparaître. En même temps elle réfléchit moins de lumière, car de jaune d'or elle passe au brun pâle. Si on la comprime fortement pendant qu'elle est incolore par transmission, elle reprend sa couleur verte. — Si l'on volatilise un fil d'or par une décharge électrique, tout près d'une lame de verre ou de mica, l'or se dépose sur la lame en une couche jaune par réflexion. Mais, par transmission, cette couche est rouge sombre au-dessous du fil, violette et quelquefois bleue ou verte tout à côté, et violette un peu plus loin. Si l'on chauffe au rouge sombre, la teinte rouge rubis se montre partout. Si l'on comprime fortement cet or pulvéfèrent entre deux plaques d'agate, il devient en certains points, vert par transmission. — Les feuilles d'argent du commerce ne laissent pas passer la lumière; mais, au rouge sombre, elles deviennent translucides et perdent en même temps leur pouvoir réflecteur.

Ces diverses expériences montrent que si l'absorption dépend de la nature des molécules du milieu traversé par la lumière, elle dépend aussi de leur arrangement; ce qui est confirmé par ce fait que certains cristaux changent de couleur quand les rayons lumineux les traversent dans différentes directions. Par exemple, la *cordiérite* paraît bleue ou jaune pâle, suivant ces directions.

2586. Cas de plusieurs milieux. — Si les rayons lumineux traversent successivement plusieurs milieux, chacun d'eux agit sur la lumière, et l'effet total se calcule au moyen des effets de chacun des milieux. Par exemple, si R est l'intensité des rayons rouges qui entrent dans le premier milieu; $r, r', r'' \dots$, les coefficients de transmission qui correspondent à chacun des milieux, dont les épaisseurs sont $e, e', e'' \dots$, l'intensité des rayons qui sortent du premier, et qui passent dans le suivant, sera, en négligeant les pertes par réflexion, Rr^e ; par conséquent $Rr^e \times r'^{e'}$ sera l'intensité des rayons sortant du second milieu, $Rr^e r'^{e'} \times r''^{e''}$, celle des rayons sortant du troisième, et ainsi de suite. On voit que l'ordre dans lequel les milieux se succèdent n'a aucune influence sur le résultat. On peut même mêler les substances, quand elles sont liquides et qu'elles n'ont pas d'action chimique les unes sur les autres, sans changer la couleur et l'intensité des rayons émergents.

2587. Hypothèse des trois couleurs. — Dans la théorie de Newton, on admet que le spectre est formé d'une infinité de rayons *simples*, et qu'à chaque couleur correspond une réfrangibilité particulière, de sorte que la couleur est

¹ *Trans. phil.* pour 1857, p. 145; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e série, t. LIII, p. 60.

intimement liée à la réfrangibilité. Nous avons vu avec quelle facilité cette théorie explique tous les phénomènes. Brewster, en étudiant la décomposition de la lumière par absorption, a rencontré certains faits qu'il considère comme incompatibles avec cette théorie, et il a adopté, sur la constitution du spectre, une nouvelle hypothèse qui a beaucoup occupé les physiciens. D'après lui :

1° La lumière blanche serait composée de *trois* couleurs seulement : *rouge, jaune, bleu*, mélangées en diverses proportions.

2° Le spectre serait formé de trois spectres superposés présentant ces trois couleurs dans toute son étendue, mais avec des intensités variant d'un point à l'autre, et présentant leur *maximum* en des points différemment placés. Si *rv* (fig. 1853) représente la longueur du spectre, ces intensités en chaque point seraient proportionnelles aux ordonnées de la courbe R pour les rayons *rouges*; de la courbe J pour les rayons *jaunes*, et de la courbe B pour les rayons *bleus*. En *a*, le bleu domine et est mêlé de jaune et de rouge en quantités proportionnelles à *an* et à *ao*, et le mélange donne la couleur indigo qu'on observe en ce point.

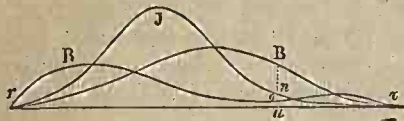


Fig. 1853.

3° Il y aurait des rayons de chacune de ces trois couleurs, présentant tous les degrés de réfrangibilité compris entre ceux des rayons extrêmes du spectre.

4° Toutes les couleurs du spectre seraient *composées*, et, comme tous les rayons réunis en un même point ont la même réfrangibilité, elles ne pourraient être décomposées par une nouvelle réfraction.

La supposition de trois couleurs seulement dans le spectre est déjà ancienne. A peine la théorie de Newton était-elle connue en France, que le peintre Gauthier, observant qu'on pouvait obtenir toutes les couleurs en mélangeant en proportions convenables des matières rouges, jaunes et bleues, soutint que la lumière blanche ne contenait que ces trois couleurs. En 1775, Mayer présenta une hypothèse semblable dans un ouvrage intitulé : *de Affinitate colorum*. Wünsch, en 1792, Young, en 1802, et A. Prieur, en 1806, supposèrent aussi qu'il n'y avait que trois couleurs primitives, mais qui seraient le rouge, le vert et le violet, ce qui leur permettait d'expliquer plus facilement la présence de cette dernière couleur dans le spectre. — Enfin, Brewster soutint de nouveau l'opinion de trois couleurs primitives, et chercha à prouver l'existence de chacune d'elles dans *toutes* les parties du spectre, et à y montrer de la lumière blanche en enlevant une proportion convenable des couleurs en excès. Il procédait principalement en cherchant à absorber, en tout ou en partie, au moyen de lames colorées, les rayons mêlés à ceux dont il voulait prouver l'existence. — Il employait pour cela des lames de verre, des liquides, diverses dissolutions; des couches de baume du Pérou, de poix, de gélatine; des lames de mica rouge, etc.

2588. Discussion du système de Brewster. — Le système de Brewster,

après un grand retentissement, a été généralement repoussé. D'abord, il est en opposition formelle avec la théorie des ondulations, car de même qu'il y a une infinité de sons et une infinité de longueurs d'ondulations de l'air, de même il doit y avoir une infinité de couleurs et une infinité de longueurs d'ondulations de l'éther, ce qui entraîne, comme nous le verrons, une infinité de réfrangibilités différentes. D'un autre côté, pour expliquer les raies noires du spectre solaire (2570), il faudrait admettre que certains rayons manquent dans les *trois* spectres colorés, précisément aux mêmes points. Mais la grande autorité du nom de Brewster exigeait qu'on lui opposât autre chose que des difficultés théoriques; aussi, son système a-t-il été l'objet de travaux importants.

On a remarqué d'abord que, pour prouver l'existence des couleurs primitives dans certaines parties du spectre, Brewster admet que, là où il y a une couleur pouvant être produite par le mélange de deux autres, ce mélange existe réellement. Or, c'est supposer ce qu'il faut démontrer, puisqu'il s'agit de prouver qu'il n'y a de couleur simple en aucun point du spectre. En outre, l'apparition, en divers points du spectre observé à travers certains milieux, de couleurs autres que celles qui s'y montrent à l'œil nu, a été contestée.

M. Airy a surtout recherché les causes d'illusions dans les expériences¹. Il remarque d'abord que le choix des trois couleurs *rouge, jaune, bleu* n'est pas obligatoire, d'autres couleurs pouvant, avec des courbes d'intensité convenables, donner le même spectre. Il a ensuite cherché si la couleur qui se montre en un point du spectre est réellement modifiée quand on interpose des lames colorées; il s'est appliqué à éviter toute lumière étrangère qui, décomposée par la lame, ferait apparaître la couleur qui lui est propre, et comme on ne peut bien juger de la différence ou de l'identité de deux couleurs qu'en les voyant simultanément, il a eu soin de comparer le spectre regardé à travers la lame au spectre vu directement. Il formait, au moyen des rayons solaires traversant une fente, un prisme et une lentille cylindrique, un spectre assez pur pour y distinguer les principales raies, et plaçait la lame colorée sur une moitié de la longueur de la fente, de sorte que le spectre était partagé en deux suivant sa longueur. Ayant opéré avec une foule de lames solides et liquides, il lui fut impossible de soupçonner même la plus petite différence de couleur dans les points correspondants des deux spectres; l'absorption ne produisait que des diminutions d'intensité. M. Airy remarque aussi que, si l'on ne compare pas le spectre vu à travers un absorbant, au spectre direct, on peut croire à des couleurs différentes de celles qui existent, la nature de l'impression produite par une couleur dépendant de l'intensité, de même qu'un son grave intense semble plus grave qu'il ne l'est réellement, comme cela a lieu pour celui des grosses cloches, dont on est étonné de pouvoir prendre l'unisson avec la voix.

M. F. Bernard a examiné spécialement cette influence de l'intensité²; il

¹ *Philosophical magazine* (1847), février, n° 199, et mars, n° 200.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXV, p. 385.

remarque qu'un mince faisceau de rayons solaires reçu dans l'œil après avoir traversé un prisme donnant un spectre bien pur, paraît d'un blanc éblouissant entre les raies A et F; l'extrémité rouge semble mêlée de jaune; la teinte est légèrement bleuâtre au passage du jaune au vert, entre les raies E et F, et le reste du spectre présente une espèce de violet sale très-clair. Si l'on diminue l'intensité de la lumière incidente, le jaune et l'orangé apparaissent; les autres couleurs sont plus franches, et le vert se manifeste. — Si l'on reçoit le spectre bien pur sur un écran qu'on éloigne beaucoup pour diminuer l'intensité, la partie la plus lumineuse paraît d'un blanc verdâtre, l'espace bleu prend une teinte violette, et toutes les couleurs tendent à se confondre en se rapprochant du gris. — M. F. Bernard a encore fait l'expérience suivante : un faisceau de rayons solaires, rendus divergents par une lentille, traverse un tube de 2^m de longueur rempli d'une solution concentrée de sulfate de cuivre ammoniacal. Ce tube projette une image bleue brillante sur un écran placé à quelques centimètres de son extrémité; mais si l'on éloigne l'écran, l'image s'affaiblit et semble passer à l'indigo, puis, à 5 ou 6 mètres, elle paraît d'un violet très-rougeâtre; cependant la dissolution, sous l'épaisseur qu'on lui donne ici, absorbe tous les rayons du spectre, sauf les bleus et les violets. Le résultat est le même quand on affaiblit l'image projetée sur l'écran laissé à la même place, au moyen de lames de verre incolores placées avant la dissolution, et qui réfléchissent une portion notable de la lumière incidente.

Melloni a montré, de son côté, l'influence sur les résultats, de l'épaisseur du faisceau incident qui forme le spectre¹. Ayant regardé une fente éclairée à travers un prisme et une lame de verre bleu-cobalt, il vit à la place de l'orangé, une bande obscure sur laquelle empiétaient le jaune et le rouge. Mais, ayant noirci la face d'incidence du prisme, en ne laissant à découvert qu'un espace étroit parallèle aux arêtes, la place de l'orangé ne parut plus envahie par d'autres couleurs. Ces couleurs provenaient donc de spectres formés par les rayons tombant près des bords de la face d'incidence, et ne coïncidant pas avec les spectres des rayons entrant par le milieu de cette face.

M. Helmholtz a mis en évidence l'influence sur les couleurs du spectre observé à travers une lame colorée, de la lumière diffusée par cette lame, par le prisme et par la lentille destinée à épurer le spectre². Or, Brewster a souvent employé des lames peu transparentes, par exemple, des lames de gélatine. Pour éliminer toute lumière diffuse, M. Helmholtz fait tomber un spectre bien pur sur un écran percé d'une fente laissant passer un mince pinceau coloré. Ce pinceau traverse un second prisme suivi d'une lentille, qui donnent une image colorée de la fente et un léger spectre provenant de la lumière diffuse qui a traversé cette fente. Ce spectre n'altère pas sensiblement la pureté de l'image focale, sur laquelle il ne projette qu'une très-faible partie de la lumière qui le forme. En

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), t. V, p. 948.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXXVII, p. 70.

examinant ainsi successivement les différentes couleurs épurées du spectre, à travers divers milieux, on n'y peut jamais distinguer de teinte autre que celle de la couleur observée. — M. Helmholtz montre aussi que certains effets de contraste peuvent tromper, quand on n'isole pas chaque couleur comme il le fait. Par exemple, quand on regarde le spectre à travers un liquide brun, on voit le rouge bordé d'une teinte verte qui occupe la place de l'orangé et du jaune, tandis que cette teinte ne se montre aucunement quand on regarde le jaune ou l'orangé isolés comme il vient d'être dit. — Il est facile de voir, d'après ce qui précède, comment Brewster a pu être induit en erreur.

On doit conclure de ces expériences qu'il n'est pas plus possible de décomposer les couleurs du spectre par absorption que par réfraction, que ces couleurs sont simples, et qu'à chaque couleur correspond un degré de réfrangibilité particulier. La théorie de Newton reste donc intacte.

Nous allons voir, en outre (2507), que les peintres qui cherchent à composer toutes les nuances au moyen de trois couleurs seulement, n'obtiennent que des résultats approximatifs; car, en opérant directement sur des rayons colorés, on ne peut former toutes les couleurs par la combinaison de trois sortes de rayons seulement. L'hypothèse de trois couleurs primitives manque donc aussi de base.

§ 3. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR RÉFLEXION DIFFUSE THÉORIE DES COULEURS

2589. Couleurs simples et couleurs composées. — Le mot *couleur* peut s'entendre de trois manières différentes. Il exprime : 1^o les qualités particulières qui distinguent les rayons lumineux; 2^o la propriété des corps de nous lancer telle ou telle espèce de rayons, soit par réflexion diffuse, soit directement s'ils sont lumineux par eux-mêmes; 3^o la nature de la sensation particulière produite dans l'œil par les rayons lumineux. Cette dernière manière de considérer les couleurs ne nous occupera que plus tard, quand nous étudierons la vision.

Newton divise les couleurs en *simples* ou *élémentaires*, et en *composées*. Les premières sont celles qui se voient dans un spectre bien pur. Elles appartiennent aux rayons simples, directs ou réfléchis par une surface blanche.

M. Chevreul divise les couleurs simples, en couleurs *lumineuses*, qui sont le rouge, l'orangé, le jaune, le vert; et en couleurs *sombres*, qui sont le bleu, l'indigo et le violet; celles-ci ont beaucoup moins d'éclat que les premières. — Les botanistes considèrent la série *xantique*, qui va du rouge au jaune inclusivement, et la série *cyanique*, qui va du vert au violet.

Les *couleurs composées* sont formées par le mélange des couleurs simples. Elles peuvent ressembler à celles du spectre, mais sont rarement identiques quant à l'impression produite sur l'organe de la vue. Ainsi, on peut, par le mélange de certains rayons colorés, obtenir du rouge, de l'orangé... analogues

aux mêmes couleurs du spectre; mais qui en diffèrent en ce que, formées de rayons inégalement réfringibles, elles se décomposent par réfraction.

2590. Couleurs complémentaires. — Newton désigne ainsi deux couleurs dont le mélange produit du blanc. — Si, au moyen d'une lentille cylindrique *l*, on forme en *a* (fig. 1854) l'image blanche de la fente par laquelle entre le faisceau solaire *s*, et si l'on dévie en *c* une partie des rayons, au moyen d'un prisme placé en *p*, les couleurs obtenues en *a* et *c* sont complémentaires, puisque leur réunion formerait du blanc. En avançant plus ou moins le prisme *p*, on fait varier les deux couleurs complémentaires. — On peut encore prendre deux dis-

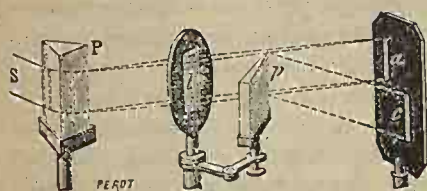


Fig. 1854.

ques à secteurs colorés des nuances du spectre (fig. 1841), couvrir, sur l'un d'eux, certains secteurs avec du papier noir, et laisser ces mêmes secteurs seuls à découvert sur l'autre; ces disques présenteront des couleurs complémentaires, pendant la rotation. On trouve, ainsi, que les couleurs rouge et vert; orangé et bleu;

jaune et violet, sont complémentaires l'une de l'autre.

Toute couleur simple ou composée a sa couleur complémentaire. De plus, chaque couleur a une infinité de couleurs complémentaires; car, en ajoutant du blanc en proportion quelconque à l'une ou à l'autre des deux couleurs, elles ne cessent pas de former du blanc par leur mélange. On peut obtenir de la lumière blanche au moyen de verres de couleurs complémentaires non simples; par exemple, en superposant un verre rouge et un verre bleu. M. Maumené forme un liquide incolore en mélangeant une dissolution rose d'un sel de nickel avec une dissolution bleue d'un sel de cobalt. Ces liquides mélangés agissent donc comme s'ils étaient simplement superposés (2586).

2591. Expériences de M. Helmholtz. — Ces expériences ont été faites directement sur les rayons solaires dispersés. Après avoir obtenu, au moyen d'un prisme et d'une lentille achromatique, un spectre bien pur dans lequel on distingue les raies de Fraunhofer (2570), on reçoit ce spectre sur un écran muni de deux fentes étroites parallèles aux arêtes du prisme et pouvant être rapprochées l'une de l'autre. Les fentes laissent passer deux pinceaux colorés homogènes, que l'on reçoit sur une lentille qui les rapproche et les réunit sur un écran blanc placé à une distance convenable. M. Helmholtz a reconnu, par ce moyen, qu'il existe une infinité de groupes binaires de couleurs qui, combinées en proportions convenables, forment du blanc parfait. A l'exception du vert pur, toute couleur simple du spectre est complémentaire d'une autre couleur simple.

Dans ces expériences, on faisait varier le rapport entre les intensités des deux couleurs mélangées, en modifiant les largeurs des fentes. Ces intensités relatives étaient mesurées par le moyen suivant : les largeurs des fentes étant évaluées

par des procédés micrométriques, on rétrécissait la plus large jusqu'à ce que le faisceau auquel elle donnait passage fût de même intensité que l'autre; ce que l'on jugeait assez bien par la méthode de Rumford (2414), malgré la différence de couleur des ombres. La diminution qu'il avait fallu faire subir à la fente la plus large permettait de calculer le rapport qui existait entre les intensités des faisceaux au moment où ils produisaient de la lumière blanche. Un fait remarquable, c'est que ce rapport dépend de l'intensité absolue de la lumière incidente. C'est ce qui ressort des résultats suivants :

Groupes de couleurs complémentaires.	Rapport des intensités de la deuxième couleur à la première	
	Lumière vive.	Lumière faible.
Violet — jaune verdâtre.....	10	5
Indigo — jaune.....	4	3
Bleu — orangé.....	1	1
Bleu verdâtre — rouge.....	0,44	0,44

Parmi ces résultats, il en est un auquel on ne se serait pas attendu, c'est la production du blanc au moyen de rayons *bleus* et *jaunes*, tandis que le mélange de substances de ces deux couleurs donne toujours du vert. M. Helmholtz a contrôlé ce résultat par le moyen suivant : il pose sur une table noire deux disques colorés, l'un par le jaune de chrome ou la gomme gutte, l'autre par le bleu d'azur de cobalt; entre les deux, il fixe verticalement une glace sans tain, et place l'œil de manière que l'image de l'un des disques vu par réflexion se superpose à l'autre disque vu à travers la glace. Les deux couleurs se trouvent ainsi mélangées dans l'œil, et l'on voit un disque blanc. Avec l'outremer artificiel, il y a une légère teinte rougeâtre, et avec le bleu de Prusse une teinte verdâtre. Si le mélange des substances bleues et jaunes donne du vert, c'est que les parcelles translucides sont traversées par les rayons lumineux, qui, se réfléchissant à une certaine profondeur, viennent mêler aux rayons réfléchis à la surface, des couleurs provenant d'une décomposition par absorption. — La méthode qui précède peut servir à trouver l'effet du mélange de deux couleurs quelconques. En éloignant plus ou moins les disques, de la glace, on modifie l'intensité relative des rayons qu'ils envoient à l'œil. — Nous décrirons plus tard, sous le nom de stéréoscope un appareil très-propre à étudier ainsi l'effet du mélange de deux couleurs.

2592. COULEUR DES CORPS. — Des corps différents éclairés par une même source de lumière peuvent présenter des couleurs différentes. C'est à Newton que l'on doit la première explication rationnelle de ce phénomène, sur lequel on n'a eu longtemps que des idées vagues et confuses. Plutarque nous a conservé quelques-unes des opinions des philosophes de l'antiquité sur ce sujet. Empédocle, Platon, les pythagoriciens regardaient la couleur comme appartenant en propre aux corps. Épicure la regarde, au contraire, comme appartenant à la lumière, que les corps réfléchissent en en modifiant les propriétés suivant

l'arrangement de leurs parties superficielles. Parmi les péripatéticiens, les uns regardèrent la couleur comme appartenant aux corps; d'autres la faisaient naître d'un mélange d'ombre et de lumière; d'autres enfin la regardaient comme une émanation, variable suivant la nature du corps. Boyle et Vossius revinrent à l'opinion que la couleur appartient aux rayons lumineux, et le premier fit quelques expériences pour l'appuyer. Descartes adopta cette idée, mais il supposa que le plus ou moins d'intensité des rayons réfléchis déterminait la sensation des différentes couleurs. Le P. de Chales, trente ans avant Newton, a émis quelques idées qui ne sont pas sans analogie avec celles que ce dernier a étayées plus tard d'un si grand nombre d'expériences.

2593. Décomposition de la lumière par réflexion diffuse. — Pour expliquer les couleurs des corps, Newton admet qu'ils *décomposent* à leur surface la lumière incidente, en absorbant une partie des rayons qui la composent, et réfléchissant l'autre *diffusément* (2428); de manière que celle-ci se trouve colorée parce qu'elle n'est plus composée de rayons simples réunis dans les mêmes proportions que dans la lumière incidente. Les corps *noirs* sont ceux qui absorbent toute la lumière incidente; les corps *blancs*, ceux qui réfléchissent en mêmes proportions tous les rayons simples qui la composent. Ces deux sortes de corps agissent de la même manière sur toutes les espèces de rayons. Entre ces deux extrêmes se trouvent une infinité de corps qui réfléchissent les divers rayons colorés en proportions très-différentes. Ainsi, un corps rouge est celui qui réfléchit principalement les rayons rouges; un corps jaune réfléchit en plus grande proportion les rayons jaunes, etc; de même que les corps diaphanes présentent une différence d'aptitude à absorber et à réfléchir les divers rayons colorés. La couleur n'appartient donc pas à la matière, qui ne fait que *décomposer* la lumière incidente, en absorbant certains rayons et renvoyant les autres. Dans les corps opaques, la décomposition a lieu dans les couches superficielles d'épaisseur insensible qui les terminent, et le résultat est indépendant des couches qui sont au-dessous. — Cette théorie est basée sur un grand nombre d'expériences, dues, pour la plupart, à Newton.

1^o Si l'on fait tomber sur une surface *blanche* les rayons dispersés par un prisme, chaque point réfléchit la lumière qu'il reçoit, et paraît de la couleur de cette lumière. Si la surface est *rouge*, elle est très-éclatante dans la partie rouge du spectre, mais les autres couleurs sont faibles, la surface rouge réfléchissant abondamment les rayons rouges, mais en faible proportion les autres rayons. Si le corps absorbe totalement certains rayons, on voit des parties noires dans le spectre; et, si l'on éclaire le corps avec cette espèce de rayons seulement, il paraît noir.

2^o Une surface colorée, éclairée par un faisceau de même couleur, présente le même aspect qu'une surface blanche éclairée par ce même faisceau; mais si la lumière incidente est d'une autre couleur que la surface, celle-ci présente généralement une nuance différente de celle de la surface blanche; la première réfléchissant en proportions différentes les divers rayons qui composent le faisceau

incident, tandis que la surface blanche les réfléchit tous également. L'expérience se fait au foyer de la lentille de la figure 1854, en interceptant certains rayons du faisceau dispersé. Si l'on intercepte précisément les rayons que la surface colorée réfléchit le plus abondamment, elle pourra présenter la même couleur qu'une surface blanche; c'est ainsi que l'or prend la même couleur que l'argent, quand on intercepte les rayons jaunes.

3^o Si l'on éclaire un même corps coloré, au moyen de différentes sources en apparence semblables, il peut présenter successivement des couleurs différentes; les spectres formés par ces diverses sources n'étant pas composés des mêmes couleurs dans les mêmes proportions. C'est ainsi que des corps verts à la lumière du jour, paraissent bleus à celle d'une lampe; les rayons jaunes étant moins nombreux dans le spectre de la flamme que dans le spectre solaire. Certains verts d'eau paraissent fauves à la lampe. Un corps qui paraît blanc un peu avant le lever du soleil est bleuâtre au grand jour. S'il est blanc à la lumière d'une lampe, il est jaune ou brun aux rayons solaires. Les teints bruns paraissent beaucoup plus blancs à la lumière des bougies. Au clair de lune, la plupart des objets prennent des nuances tout autres que pendant le jour. La flamme de l'alcool salé est sensiblement *monochromatique*; elle n'émet guère que des rayons jaunes. Si l'on éclaire avec cette flamme une série de bandes présentant les sept principales couleurs du spectre, les bandes jaune, orangé et rouge paraissent jaunes; et les autres, noires ou grises, parce qu'elles ne reçoivent pas de rayons qu'elles soient susceptibles de réfléchir. Avec une semblable lumière, le visage prend une teinte livide à cause de l'absence des rayons rouges. — La lumière électrique et celle du magnésium donnent un spectre aussi complet que celui du soleil, avec plus de violet; et les corps éclairés par ces lumières présentent à peu près les mêmes nuances qu'en plein jour.

4^o La proportion de lumière de chaque couleur réfléchie par un corps, et par conséquent sa couleur, dépend de l'arrangement des molécules superficielles; et, comme la chaleur modifie la distance de ces molécules, on conçoit qu'elle change la couleur des corps. Gay-Lussac a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, en projetant les corps colorés sur des morceaux de porcelaine portés à une température de 100° à 400°. En général, les couleurs se foncent par la chaleur: ainsi, le vermillon, l'oxyde rouge de mercure, le minium passent au rouge carmin ou au violet; l'azotate de cobalt passe du rouge vineux au bleu, etc. Nous avons vu comment Faraday a prouvé cette influence de la chaleur, et aussi celle de la compression, sur la couleur des feuilles excessivement minces de certains métaux (2585).

5^o Les corps ne présentent pas la même couleur quand ils sont polis ou non polis: le marbre, le bois dépolis ont une couleur terne qui ne permet pas de distinguer les veines; mais vient-on à mouiller le marbre ou à vernir le bois, la teinte devient plus foncée et les veines apparaissent. Il y a des corps qui changent de couleur quand on les regarde sous une obliquité différente; ce qui tient, pour les corps à surface unie et homogène, à la proportion différente de lumière

blanche réfléchi spéculairement, et aussi à ce que la proportion diffuse des divers rayons réfléchis change avec l'incidence, suivant des lois différentes pour chacun d'eux. — Les corps présentent souvent des couleurs différentes quand ils sont en poudre ou en masse. Les métaux en poudre impalpable sont souvent noirs; ils absorbent donc tous les rayons : tels sont le platine, le fer... Le pouvoir absorbant pour la chaleur présente un phénomène semblable.

Il resterait, pour compléter cette théorie, tout à fait semblable à celle que Melloni a établie plus tard pour la thermochrose des corps (II, 885), à expliquer par quel phénomène certains rayons sont réfléchis diffusément, pendant que d'autres sont transmis ou absorbés. Nous verrons plus tard comment Newton et d'autres physiciens ont cherché à rattacher ce phénomène à celui des couleurs qui se produisent dans les lames minces.

2594. Cas des corps transparents. — Quand le corps est transparent, il est évident que les rayons qui le traversent et émergent sont ceux qui n'ont pas été réfléchis par les particules qu'ils ont rencontrées; la lumière transmise et la lumière réfléchi pourront donc présenter des couleurs différentes. C'est, en effet, ce qui a lieu. Par exemple, l'or en feuilles frappé par la lumière blanche laisse passer des rayons d'un vert bleuâtre, tandis qu'il réfléchit les rayons jaunes; et, si la couleur des rayons transmis est modifiée par la chaleur, la couleur des rayons réfléchis est aussi modifiée (2585). Faraday a formé des dépôts pulvérulents, par la décharge électrique à travers des fils métalliques dans l'hydrogène; il a vu le cuivre, l'étain, le zinc, le palladium, l'aluminium, qui sont pourpre, blanc brillant, blanc, gris, blanc, par réflexion, être vert, brun, brun ou gris bleuâtre, brun, brun ou orangé, par transmission.

Halley, étant descendu sous l'eau à une profondeur de plusieurs brasses, dans une cloche à plongeur, vit de couleur cramoisie, le dessus de sa main sur laquelle tombaient les rayons solaires passant par une ouverture vitrée; tandis que le dessous, illuminé par la lumière réfléchi sur les parties profondes de l'eau, paraissait vert; d'où Newton conclut que l'eau laisse passer les rayons rouges et réfléchit les rayons violets et bleus. Hassenfratz a vérifié cette explication au moyen d'un long tube noirci en dedans, fermé par des glaces et rempli d'eau pure, à travers laquelle il faisait passer les rayons solaires. La lumière sortait successivement blanche, jaune, orangée ou rouge, quand la longueur de la colonne d'eau augmentait. Des diaphragmes annulaires, placés en différents points du tube, paraissaient noirâtres du côté de l'observateur, au point où la lumière était encore blanche; d'un violet faible à la distance pour laquelle elle était jaune; bleus là où elle était orangée; verts là où cette lumière était rouge. Le diaphragme était éclairé par la lumière réfléchi par les molécules d'eau, lumière qui présentait la couleur complémentaire de celle qui était transmise.

La belle lumière bleue qui illumine l'intérieur de la grotte d'azur, dans l'île de Capri, est due à la réflexion sur les molécules de l'eau, des rayons lumineux qui pénètrent dans la mer par l'ouverture surbaissée par laquelle entrent les bateaux, et qui ne laisse passer qu'une faible quantité de lumière directe.

On pourrait croire que la couleur par transmission devrait toujours être complémentaire de la couleur par réflexion; mais il n'en serait ainsi qu'autant qu'il n'y aurait aucune partie de lumière absorbée. Par exemple, il y a des corps rouges par réflexion, et par transmission; c'est qu'ils réfléchissent une partie des rayons rouges incidents, laissent passer le reste; et absorbent ou éteignent les rayons des autres couleurs. — Nous citerons plus loin (2618) des corps dont les couleurs par transmission et par réflexion sont complémentaires.

2595. Analyse de la couleur des corps et des sources lamineuses.

— Les couleurs des corps sont généralement composées; ainsi, les matières tinctoriales, les pierres précieuses, les fleurs les plus éclatantes, nous réfléchissent des rayons composés, comme on peut s'en assurer en les regardant à travers un prisme; les bords parallèles aux arêtes paraissent irisés. Pour analyser ces couleurs, on applique sur la surface du corps une feuille de papier noir présentant une fente étroite, à bords soigneusement noircis; ou bien, quand cela est possible, on recouvre cette surface de noir de fumée, en laissant à découvert une bande très-étroite. On regarde ensuite cette bande, bien éclairée, à travers un prisme parallèle à sa direction, et l'on aperçoit un spectre dans lequel on distingue les couleurs simples qui forment la couleur composée du corps. Cette méthode n'est pas à l'abri de toute erreur, parce qu'il y a souvent de la lumière blanche mêlée à la lumière colorée que réfléchit la surface. Le noir de fumée même est dans ce cas; on voit de légères couleurs partout où il y a quelque inégalité à sa surface. Mais, cette lumière blanche étant en petite quantité quand le corps n'est pas poli, il est assez facile de distinguer son spectre, très-faible, de celui des rayons diffusés par le corps.

2596. Couleurs des flammes. — Pour analyser les couleurs des flammes, on les place derrière un écran noir présentant une fente étroite, et l'on regarde le trait lumineux à travers un prisme parallèle à la fente. Par ce moyen, on peut étudier le spectre formé par les différentes parties de la flamme.

Le spectre des flammes colorées présente le plus souvent de larges bandes noires indiquant l'absence de certaines couleurs; telles sont les flammes du cyanogène, de l'oxyde de carbone, les flammes colorées par des sels, comme nous le verrons plus loin (2627). — Pour étudier l'influence des sels, on les dissout dans l'alcool d'une lampe, ou bien on en saupoudre la mèche. On reconnaît ainsi que les sels de soude colorent la flamme en jaune; ceux de potasse, en violet pâle; ceux de chaux, en rouge de brique; l'acide borique, les sels de baryte, en vert; la strontiane, en pourpre; et les sels de cobalt, en bleu. Le sulfate de fer, l'antimoine, l'arsenic, rendent la flamme blanche.

Lampe monochromatique. — Le soufre projeté dans un creuset incandescent donne une flamme d'un jaune pâle à peu près simple. Brewster a imaginé, en 1822, une lampe *monochromatique*, très-utile dans certaines expériences d'optique. C'est une lampe à alcool, dont l'alcool a été mêlé avec un quart d'eau saturée de sel marin. La flamme est jaunâtre et sensiblement homogène. Cependant, un prisme de 60° permet de distinguer sur les bords, des franges vertes

et violettes, mais extrêmement faibles. — M. Fox Talbot rend cette flamme beaucoup plus brillante en employant de l'alcool pur dans lequel plonge une mèche préalablement imbibée d'une solution de sel marin, puis séchée.

2597. Résultats du mélange des couleurs. — Pour trouver par l'expérience le résultat du mélange de plusieurs couleurs, on emploie différents moyens : 1^o on couvre avec du papier noir, en tout ou en partie, certains secteurs du disque avec lequel Newton recomposait la lumière blanche (fig. 1841), et l'on voit, en le faisant tourner, quel est l'effet produit par le mélange des couleurs qu'on a laissées à découvert. On peut encore, comme l'ont fait Newton, Castel, Mayer, Lambert, Forbes, etc., mélanger des matières colorées, en poudre fine ; mais on n'obtient ainsi que des couleurs ternes ou rabattues, à cause de la grande quantité de lumière absorbée ; ces couleurs sont comme si elles étaient faiblement éclairées. Pour avoir des résultats satisfaisants, il faut opérer sur les rayons simples du spectre solaire. 2^o On emploie la disposition de la figure 1854 ; on intercepte les rayons colorés qui ne doivent pas entrer dans le mélange, et l'on a, au foyer, une image colorée, d'un éclat qui dépasse tout ce qu'on peut



Fig. 1855.

obtenir au moyen des couleurs artificielles. 3^o On reçoit sur quelques-uns des miroirs de l'appareil (fig. 1840) les rayons du spectre présentant les couleurs que l'on veut mélanger, et on les renvoie par réflexion sur un même point d'un écran blanc.

Méthode de M. Helmholtz. — Il est bien difficile, par les procédés qui précèdent, d'opérer sur deux faisceaux parfaitement homogènes. M. Helmholtz a rempli cette condition au moyen de la méthode suivante¹. Il regardait à travers un prisme vertical deux fentes étroites formant un angle droit, ab , $a'b'$ (fig. 1855), et inclinées à 45^o par rapport aux arêtes du prisme. Ce prisme étant placé à environ 4 mètres des fentes, et dans la position du *minimum* de déviation, on apercevait deux spectres, rv , $r'v'$, dans lesquels on pouvait distinguer, en s'aidant d'une lunette, des raies noires parallèles aux fentes. Ces deux spectres se superposaient en partie, et les dimensions des fentes étaient telles, que chaque bande colorée oo de l'un des spectres croisait toutes les bandes colorées de l'autre.

Pour connaître le résultat de la combinaison de deux couleurs, on dirigeait la lunette de manière que le point de croisement de son réticule se projetât sur la combinaison que l'on voulait examiner, puis on plaçait l'œil à une distance de 50 à 60^{cm} de la lunette, de manière à ne voir qu'un très-petit espace autour de ce point de croisement ; un écran percé d'un petit trou indiquait la position de l'œil. On appréciait ainsi la teinte composée, sans être influencé par les couleurs voisines ; puis, cachant successivement l'une et l'autre fente, on voyait les cou-

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXVI, p. 500.

leurs simples qui avaient produit cette teinte. — Pour faire varier le rapport entre les quantités de lumière des couleurs composantes, on inclinait le prisme de manière à le rapprocher de la position parallèle à l'une des fentes; le spectre de celle-ci se rapprochait de la forme d'un rectangle, et les couleurs y étaient plus resserrées, et par conséquent plus vives que dans l'autre spectre, où avait lieu l'effet inverse. Quand les intensités des deux couleurs devaient être très-différentes, on recouvrait l'une des fentes avec du papier huilé ou non huilé.

M. Helmholtz a aussi cherché l'effet produit par la réunion de trois couleurs en ajoutant une troisième fente, de manière à obtenir trois spectres superposés en partie. — Il a aussi cherché le résultat du mélange de deux couleurs, par les méthodes que nous avons indiquées plus haut (2591).

Voici les principaux résultats trouvés par M. Helmholtz : 1° deux couleurs forment par leur mélange une couleur composée, quelquefois identique à une des couleurs simples du spectre, mais qui souvent aussi en diffère sensiblement. Par exemple, le jaune verdâtre et le bleu verdâtre du spectre donnent un vert beaucoup plus terne que le vert simple. Ce dernier vert, le violet, et surtout le rouge, ne peuvent être obtenus exactement par le mélange de deux autres couleurs. 2° Un résultat important, c'est que la couleur produite par la réunion de trois couleurs simples est différente de celle que l'on obtiendrait en combinant l'une d'elles avec la couleur simple du spectre, semblable au résultat de la combinaison des deux autres. Par exemple, le rouge et le vert bleuâtre du spectre donnent du *jaune*; et le rouge, avec le vert bleuâtre obtenu par mélange du vert et de l'indigo, donne du *blanc*. 3° Beaucoup de combinaisons de trois couleurs donnent du blanc. 4° Il est impossible, avec trois couleurs seulement, de produire d'une manière un peu satisfaisante toutes les couleurs du spectre; il faut, pour cela, se servir de cinq couleurs au moins : *rouge, jaune, vert, bleu et violet*. Le point de départ de l'hypothèse de trois couleurs primitives est donc inexact (2587). Si l'on peut réussir en mélangeant trois couleurs matérielles, cela tient au peu d'éclat des nuances obtenues, et à ce que l'on ne prend pas la peine de les comparer à celles du spectre, dont elles diffèrent notablement dans la plupart des cas. Les couleurs adoptées, *rouge, jaune, bleu*, ne seraient même pas les plus favorables; il vaudrait mieux adopter le rouge, le vert et le violet; mais encore n'obtiendrait-on que des imitations imparfaites des couleurs du spectre.

2598. Construction de Newton. — Après avoir fait un grand nombre d'expériences par quelques-unes des méthodes précédentes, Newton a formulé la règle géométrique suivante, pour trouver approximativement le résultat du mélange de plusieurs couleurs : on divise une circonférence (*fig.* 1856) en 7 parties correspondant aux 7 couleurs du spectre, et proportionnelles aux nombres $\frac{1}{6}, \frac{1}{10}, \frac{1}{10}, \frac{1}{6}, \frac{1}{10}, \frac{1}{10}, \frac{1}{6}$; les valeurs des arcs en degrés sont alors :

Rouge.	Orangé.	Jaune.	Vert.	Bleu.	Indigo.	Violet.
60°45'34"	34°10'38"	54°41'1"	60°45'34"	54°41'3"	34°10'38"	60°45'34"

On marque les centres de gravité r, o, j, u, b, i, v , de chacun de ces arcs, et, pour obtenir le résultat du mélange de plusieurs couleurs, on suppose appliquées aux centres de gravité des arcs qui leur correspondent des forces parallèles proportionnelles aux quantités que l'on veut mélanger; puis, on cherche le point d'application de la résultante de ces forces. La couleur cherchée sera celle de l'arc du secteur dans lequel tombera ce point d'application. Par exemple, pour connaître le résultat du mélange de rayons rouges, bleus et jaunes, ayant des intensités entre elles comme les nombres n_r, n_b, n_j , il faudra chercher, par la méthode connue, le point d'application de la résultante de trois forces parallèles égales à n_r, n_b et n_j , appliquées en r, b et j ; si ce point tombe en n , on en conclura que le mélange donne du jaune et du jaune tirant sur le vert, le point n se trouvant plus près de la limite du vert que de celle de l'orangé. Plus le point n sera placé près du centre c , plus la nuance sera lavée de blanc. Si le point n tombait en c , le mélange formerait du blanc. C'est ce qui arrive entre autres

quand on combine les 7 couleurs dans les proportions même des arcs qui les représentent, la résultante étant alors appliquée au centre de gravité c de la circonférence.

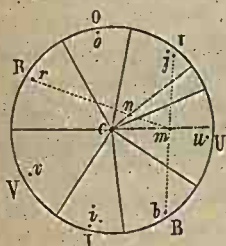


Fig. 1856.

On conclut de la règle de Newton que : 1° deux couleurs simples qui se suivent sur la circonférence donnent une nuance intermédiaire. Il faut cependant excepter le rouge et le violet, qui ne se suivent pas dans le spectre. 2° Deux couleurs séparées par une troisième donnent cette dernière. Ainsi, le rouge et le jaune donnent de l'orangé; l'orangé et le vert, du jaune, etc. L'indigo et le rouge, qui se trouvent aux

extrémités opposées du spectre, donnent une couleur rougeâtre différente du violet.

Biot a réduit cette méthode en formule. Pour cela, il calcule les coordonnées des centres de gravité des arcs, en prenant pour axe des abscisses la droite passant, par le point de séparation des arcs du violet et du rouge, et par le centre, pris pour origine. Ces coordonnées étant calculées, il multiplie chacune d'elles par le nombre de rayons de la couleur correspondante qui doit entrer dans le composé, il fait la somme de tous ces produits, et, la divisant par la somme totale des rayons à composer, il obtient les coordonnées du point d'application de la résultante. Ces coordonnées sont, en désignant les nombres de rayons de chaque couleur par l'initiale de son nom, sauf pour le violet, qui est représenté par u :

$$X = \frac{(r+u) 0,82284 + (o+i) 0,207398 - (j+b) 0,513992 - v \cdot 0,353796}{r+o+j+v+b+i+u}$$

$$Y = \frac{(r-u) 0,48235 + (o-i) 0,963163 + (j-b) 0,813736}{r+o+j+v+b+i+u}$$

De ces coordonnées on peut déduire la distance D du point d'application au

centre du cercle, ainsi que l'angle α que fait cette distance avec l'axe des x ; car on a

$$\text{tang } \alpha = Y : X, \text{ et } Y = D \sin \alpha, \text{ ou } X = D \cos \alpha.$$

La valeur de α fait connaître dans quel secteur tombé le point d'application, et le rapport de D à 1 — D , la proportion de lumière simple et de lumière blanche qui compose la couleur résultante.

Newton a donné la méthode précédente comme une règle empirique représentant les résultats qu'il a obtenus en formant au foyer d'une lentille, des couleurs composées contenant des proportions connues de lumière simple. Cependant, il faut la considérer comme ne donnant qu'une approximation, dont on est d'autant plus disposé à se contenter, qu'on n'a pas ordinairement sous la main de moyen d'apprécier les couleurs avec certitude. Remarquons aussi que cette règle ne se vérifie pas toujours aussi bien que l'avait cru Newton; nous avons vu, par exemple, que le mélange des rayons bleus et jaunes peut donner du blanc et non du vert (2591).

2599. Nomenclature des couleurs. — Il a régné pendant longtemps une grande confusion dans la manière de désigner les couleurs. Les dénominations appliquées à une même nuance diffèrent même souvent dans les diverses industries qui en font usage; le peintre, l'émailleur, le mosaïste, le verrier, le teinturier, n'ont pas la même nomenclature. Les termes employés sont, d'ailleurs, choisis d'une manière très-capricieuse: tantôt ils sont empruntés aux objets naturels ou aux substances qui présentent ces couleurs, tantôt au pays qui les fournit; d'autres fois, ce sont des noms d'hommes, des noms de fantaisie, des noms bizarres. Des tentatives assez nombreuses ont été faites pour mettre de l'ordre dans ce chaos, et c'est à M. Chevreul qu'est due la première solution satisfaisante de la question¹.

Tons et nuances. — M. Chevreul donne aux mots *ton* et *nuance* des valeurs différentes; il appelle *nuances* les résultats du mélange des couleurs pures en diverses proportions. Les nuances peuvent ensuite être mélangées de blanc ou de noir en quantité variable, ce qui donne pour chacune d'elles une infinité de *tons*. Le ton d'une nuance est d'autant plus affaibli ou *abaissé* qu'il s'y mêle plus de blanc, et d'autant plus foncé ou *élevé* qu'il s'y mêle plus de noir.

Les couleurs mêlées de noir sont celles que les peintres appellent *rabattues*; ce sont des couleurs qui réfléchissent peu de lumière; et, en effet, si l'on éclaire de moins en moins une surface peinte avec une couleur franche, elle paraît de plus en plus sombre. C'est ce qu'on peut remarquer quand le jour fuit: toutes les couleurs se foncent et tournent au noir.

Cercle chromatique. — M. Chevreul a formé un tableau de 72 nuances, passant graduellement des unes aux autres, avec 20 tons pour chacune d'elles,

¹ De la loi du contraste simultané des couleurs, p. 87.

les uns produits par des mélanges de blanc en proportion croissante, les autres par des mélanges de noir. Imaginons un cercle divisé en 72 secteurs égaux. Trois secteurs équidistants portent les trois couleurs principales : *rouge*, *jaune* et *bleu*. A égale distance de ces trois couleurs sont placées celles que l'on forme en les mélangeant deux à deux : l'*orangé*, entre le rouge et le jaune; le *vert*, entre le jaune et le bleu; le *violet*, entre le rouge et le bleu; puis, entre ces six nuances, les nuances intermédiaires, et ainsi de suite, de manière que le cercle se trouve contenir 72 nuances, passant graduellement des unes aux autres. Les secteurs sont partagés en cases quadrangulaires par vingt circonférences concentriques, et dans les vingt cases de chaque secteur sont distribués les *tons* de la couleur qui lui appartient. Au centre est un petit cercle blanc, à partir duquel la nuance se fonce, en perdant du blanc, jusqu'à devenir pure; puis, le ton se hausse de plus en plus en prenant du noir, jusqu'au contour du disque qui est bordé de noir. Il y a donc une série circulaire de cases qui contiennent les nuances *pures* avec leur *maximum* d'intensité, et à partir de chacune desquelles les tons s'affaiblissent en allant vers le centre, et se foncent en s'en éloignant.

La série de couleurs contenues dans un même secteur forme une *gamme* de *tons*. Si l'on part d'une case pour marcher suivant la circonférence, on a la série des 72 nuances correspondantes au ton de cette circonférence. On a ainsi un tableau de 1440 couleurs, qui forment des types suffisamment rapprochés pour les besoins de l'industrie, et auxquels il sera bon d'ajouter la gamme du blanc, c'est-à-dire la série des tons gris allant du blanc au noir. De semblables tableaux, construits avec des couleurs inaltérables, par exemple peints sur porcelaine, rendent de grands services à l'industrie, en permettant de s'entendre sur les couleurs, que l'on pourra désigner par les numéros du secteur et de la circonférence sur lesquels elles se trouvent.

M. Lecoq a disposé les cases colorées d'une autre manière. Il divise la surface d'une sphère en espaces quadrangulaires, au moyen de méridiens et de parallèles. A l'équateur sont les couleurs franches. Chacune de ces couleurs se fonce sur chaque méridien en allant vers l'un des pôles qui est terminé par une tache noire, et elle s'éclaircit en allant vers l'autre pôle, où se trouve une tache blanche.

Il serait plus commode d'employer un cylindre, dont une des bases serait bordée de noir et l'autre de blanc, et qui présenterait, à égale distance de ces bases, une zone contenant les nuances pures. On pourrait encore développer ce cylindre sur un plan, ce qui permettrait d'embrasser d'un seul coup d'œil l'ensemble des nuances et de leurs tons. En répétant à l'une des extrémités du tableau quelques-unes des gammes de l'extrémité opposée, on y trouverait chacune des gammes juxtaposée à celles qui en diffèrent le moins. Sous cette forme, le tableau serait d'une exécution plus facile, surtout si l'on voulait le fabriquer en porcelaine.

§ 4. — ACHROMATISME

I. Dispersion, pouvoir dispersif, etc.

2600. Définitions. — Les lentilles et les prismes présentent l'inconvénient, très-grand pour les instruments d'optique, de disperser les rayons lumineux en les déviant; c'est ce qui constitue l'*aberration chromatique* ou de *réfrangibilité*. L'*achromatisme* a pour objet de détruire cette dispersion et la coloration qui en résulte, tout en conservant une certaine déviation aux rayons. Avant d'exposer les moyens par lesquels on obtient ce résultat, nous allons établir quelques définitions.

Dispersion et rapports de dispersion. — On représente l'action plus ou moins grande d'une substance pour disperser la lumière, au moyen de la différence $n_v - n_r$ des indices de réfraction des rayons extrêmes du spectre. Cette différence a reçu le nom de *coefficient de dispersion*, ou simplement *dispersion*. Depuis la découverte des raies de Fraunhofer (2570), on prend pour n_v et n_r les indices correspondant aux raies H et B.

La *dispersion partielle* est la différence des indices de deux rayons autres que les rayons extrêmes du spectre, par exemple des indices des rayons jaunes et bleus. Ces indices sont rapportés à la raie principale de chaque couleur. Les dispersions partielles de deux substances ne sont pas proportionnelles à leurs dispersions totales, les couleurs n'étant pas réparties de la même manière dans les spectres formés par ces substances.

On nomme *rapport de dispersion* de deux substances le rapport entre les coefficients de dispersion de ces deux substances $(n_v - n_r) : (n'_v - n'_r)$, ou entre les dispersions partielles relatives aux mêmes raies. Ce rapport change quand on passe de deux raies à deux autres.

2601. Angle de dispersion, pouvoir dispersif. — On nomme *angle de dispersion* l'angle dans lequel sont étalés les divers rayons colorés pendant qu'ils se réfractent, ou la différence des angles faits avec la normale par les rayons rouges et violets extrêmes. Quand un rayon se présente pour sortir d'un milieu en faisant un très-petit angle i avec la normale, l'*angle de dispersion* est sensiblement égal à la *dispersion* multipliée par l'angle i . En effet, soient e_v et e_r les angles d'émergence des rayons extrêmes, on a $\sin e_v = n_v \sin i$, et $\sin e_r = n_r \sin i$; d'où $\sin e_v - \sin e_r = (n_v - n_r) \sin i$; ou, en prenant les angles pour les *sinus*, parce que i est très-petit, $e_v - e_r = (n_v - n_r) i$, formule dans laquelle $e_v - e_r$ n'est autre chose que l'angle des rayons extrêmes.

L'angle de dispersion dépend évidemment de la déviation moyenne des rayons, et, pour une même substance, il augmente avec cette déviation. Quand l'incidence reste la même, il varie avec la nature des milieux et avec la déviation qui se produit. Il faut donc, pour avoir une idée de la manière dont la lumière est dispersée en changeant de milieu, comparer l'angle de dispersion $(e_v - e_r)$ à la

déviations moyennes $e_j - i$, et l'on prend le rapport entre ces deux quantités. Ce rapport se nomme *pouvoir dispersif* d'un milieu quand le second milieu est le vide.

Dans les calculs, on emploie une autre définition du *pouvoir dispersif*, dans laquelle on considère les indices de réfraction, et l'on ne fait plus intervenir l'angle i . C'est alors le rapport entre la différence, $n_e - n_r$, des indices des rayons extrêmes, et l'indice des rayons jaunes moyens diminué de 1, ou $(n_j - 1)$.

Il est facile de voir que les deux définitions rentrent l'une dans l'autre, quand

l'angle i est très-petit, c'est-à-dire que l'on a alors $\frac{e_e - e_r}{e_j - i} = \frac{n_e - n_r}{n_j - 1}$; en effet,

on a, en prenant les angles pour les sinus, $e_e - e_r = (n_e - n_r) i$. On a aussi

$e_j = i \cdot n_j$, et, en retranchant i des deux membres, $e_j - i = (n_j - 1) i$.

L'expérience montre que, pour une même déviation des rayons moyens, l'angle des rayons extrêmes est différent dans deux substances différentes, ainsi que les angles d'écart entre deux rayons colorés quelconques. De plus, l'angle de deux rayons colorés change, quand on passe de deux couleurs à deux autres.

2602. Mesure des coefficients et des rapports de dispersion, etc. —

Wollaston, un des premiers, s'est occupé de comparer les *dispersions* d'un grand nombre de matières solides et liquides¹. Il procédait en observant la réflexion totale, comme Newton pour l'inégale *réflexibilité* des rayons (2574, 3^e). Supposons une face du prisme en contact avec de l'eau, et l'œil placé de manière à recevoir les rayons réfléchis totalement à la surface de séparation du verre et du liquide, on verra le champ de réflexion bordé de franges colorées, le violet occupant le bord inférieur. Si les deux milieux, inégalement réfringents, dispersaient également, il n'y aurait pas de couleurs. On pourra donc, en remplaçant l'eau par des dissolutions salines, trouver le degré de concentration donnant la même dispersion que le verre. — Quand le pouvoir dispersif du liquide est beaucoup plus grand que celui du prisme, il peut arriver que l'ordre des franges soit interverti, et que le rouge se trouve au bord inférieur. C'est ce qui a lieu pour un prisme de flint et l'huile de sassafras; pour des prismes de spath pesant, de cristal de roche et surtout de spath fluor, qui ont une faible dispersion, et pour une foule de liquides. Il faut donner au prisme un angle tel que les rayons entrent et sortent à peu près normalement aux faces d'incidence et d'émergence, pour qu'il n'y ait de dispersion qu'à la surface de réflexion. — Les substances qui suivent sont placées dans l'ordre de leur dispersion, d'après Wollaston : 1, soufre; 2, huile de sassafras; 3, flint; 4, huile de térébenthine; 5, spath d'Islande; 6, diamant; 7, crown; 8, eau; 9, acide sulfurique; 10, alcool; 11, spath pesant; 12, cristal de roche; 13, spath fluor.

2603. Résultats. — C'est dans le cours de son travail que Wollaston remarqua les premières raies du spectre (2570). Fraunhofer, après les avoir découvertes de son côté, en a fait usage pour étudier les dispersions totales et partielles d'un certain nombre de corps solides et liquides. Il procédait en

¹ Bibliothèque britannique (Sciences et Arts), t. XXVI, p. 234.

mesurant les indices de réfraction des principales raies, au moyen de son appareil (fig. 2551). Le tableau qui suit renferme une partie des résultats qu'il a publiés :

SUBSTANCES RÉFRINGENTES	B	C	D	E	F	G	H	COEFFICIENTS
								de dispersion $n_D - n_B$
Flint-glass, n° 13. . .	1,62775	1,62968	1,63503	1,64202	1,64826	1,66028	1,67106	0,04331
Crown-glass, n° 9 . . .	1,52583	1,52685	1,52958	1,53300	1,53605	1,54165	1,54656	0,02073
Eau	1,33093	1,33171	1,33358	1,33585	1,33782	1,34129	1,34418	0,01825
Solution de potasse . . .	1,39963	1,40051	1,40280	1,40563	1,40808	1,41258	1,41637	0,01674
Essence de térébenth. . .	1,47019	1,47153	1,47443	1,47835	1,48173	1,48820	1,49387	0,02338
Flint, n° 3	1,60204	1,60380	1,60849	1,61453	1,62004	1,63077	1,64037	0,03883
Flint, n° 30	1,62357	1,62547	1,63058	1,63735	1,64346	1,65540	1,66607	0,04250
Crown, n° 13	1,52431	1,52530	1,52798	1,53137	1,53434	1,53991	1,54468	0,02087
Crown, lettre M	1,55477	1,55593	1,55907	1,56315	1,56674	1,57353	1,57947	0,02470
Flint, n° 23	1,62659	1,62847	1,63367	1,64049	1,64675	1,65885	1,66968	0,04300

Rudberg a mesuré les indices de réfraction relatifs aux raies du spectre donné par plusieurs cristaux, et M. Baden-Powel a fait le même travail sur un grand nombre de liquides. Babinet a aussi indiqué le moyen suivant de mesurer les dispersions de corps qu'on n'a qu'en petits fragments¹. On les taille en prisme dont on mesure l'angle, et l'on regarde à travers, un spectre projeté sur un écran par un prisme connu. On place le prisme à éprouver de manière à recomposer les couleurs (2576), et l'on s'éloigne peu à peu du spectre jusqu'à ce qu'on ne distingue plus que de la lumière blanche. Si les prismes sont dans la position newtonienne, et si leur angle est suffisamment petit, leurs dispersions seront en raison inverse de leurs distances à l'écran.

Depuis quelque temps, on fabrique des verres très réfringents à acide borique et à bases métalliques nouvelles. Il était important d'en connaître les dispersions. L'abbé Dutirou, au moyen de l'appareil cité plus haut (2551), a mesuré les indices des principales raies dans ces différents verres. Voici d'abord la liste de ces verres par ordre de pouvoirs réfringents, avec leur densité :

	Densité.		Densité.
1 Flint lourd jaune de Guinand à l'acide borique.	3,417	41 Verre de Venise.	2,713
2 Flint de Fraunhofer.	2,435	42 Crown de Guinand à l'a. borique	2,362
3 Flint de Bontemps.	2,011	43 Crown de Dollond.	2,484
4 Flint ordinaire de Guinand.	3,610	44 Verre à l'acide borique de Maës et Clémadot.	2,835
5 Flint de Guinand à l'a. borique.	4,322	45 Crown de Bontemps.	2,447
6 Autre, id.	3,559	46 Verre de Maës et Clémadot à base de soude et zinc.	4,951
7 Flint de Guinand, blanc.	2,622	47 Autre, id.	1,523
8 Verre de Guinand, à l'a. borique.	2,642	48 Verre de Saint-Gobain.	2,329
9 Autre, id.	2,613		
10 Crown ordinaire de Guinand.	2,484		

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXI, p. 513.

Dans le tableau qui suit sont réunis les rapports de *dispersions partielles* de quelques-uns de ces verres désignés par le numéro qu'ils portent dans la liste ci-dessus. $b, c, d, \dots, b', c', d', \dots$ représentent, pour les deux substances comparées, les indices des raies désignés par les capitales des mêmes lettres; b', c', d', \dots , correspondant, en général, à des crowns.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES prises deux à deux.	$\frac{h-g}{h'-g'}$	$\frac{g-f}{g'-f'}$	$\frac{f-c}{f'-c'}$	$\frac{e-d}{e'-d'}$	$\frac{d-c}{d'-c'}$	$\frac{c-b}{c'-b'}$	
N ^o 1 et 16.....	3,187	3,246	2,938	2,921	3,368	1,890	
1 et 12.....	3,185	2,092	2,979	2,721	2,831	2,019	
3 et 15.....	2,142	2,072	2,071	1,923	1,984	1,904	
4 et 11.....	2,616	1,951	1,889	1,797	1,924	1,409	
5 et 11.....	2,650	1,942	1,877	1,800	1,884	1,618	
6 et 10.....	2,061	1,943	1,747	1,938	1,758	1,727	
7 et 9.....	2,639	1,925	1,779	1,713	1,580	2,397	
6 et 12.....	2,035	1,946	1,972	1,837	1,812	1,660	
N ^o 9 et	16.....	1,129	1,128	1,102	1,154	1,182	0,663
	15.....	1,040	1,074	1,098	1,129	1,155	0,776
	13.....	0,949	1,115	1,087	1,079	0,980	1,057
	12.....	1,031	1,031	1,118	1,063	1,141	0,708
	11.....	0,293	1,008	1,042	1,030	1,182	0,663
10.....	1,044	1,028	0,991	1,122	0,918	0,744	
N ^o 8 et 9.....	1,042	1,031	0,975	0,980	0,983	1,342	

Ce tableau montre que : 1^o les rapports des dispersions partielles sont très-différents quand on passe, dans les substances comparées, de deux couleurs à deux autres; ce qui prouve que ces couleurs ne sont pas réparties de la même manière dans les différents spectres. — 2^o Pour les flints (sauf le n^o 9, qui est le moins réfringent de tous) comparés aux divers crowns, le rapport des dispersions partielles va assez souvent en diminuant, du violet au rouge; ce que l'on trouve également, quand on calcule les rapports de dispersion au moyen des nombres donnés par Fraunhofer. — 3^o Lorsque cela n'a pas lieu, le rapport $\frac{c-d}{e'-d'}$ est fréquemment plus grand, et quelquefois plus petit que celui qui le suit. Il en est de même, quoique moins souvent, du rapport $\frac{g-f}{g'-f'}$. — 4^o Les rapports $\frac{h-g}{h'-g'}$ et $\frac{c-b}{c'-b'}$ sont presque constamment, l'un *maximum*, et l'autre *minimum*. — 5^o Les rapports écrits dans la même ligne horizontale diffèrent peu, pour le flint n^o 9 comparé aux verres nos 12, 13, 14 et 15. Ceux-ci semblent donc mieux convenir que le flint et le crown ordinaire de Guinand, pour l'achromatisme, parce que si l'on ramène au

parallélisme deux des rayons colorés, les autres se trouveront aussi sensiblement parallèles.

2604. Influence de la température. — MM. Dale et Gladstone, dans leurs recherches sur les indices de réfraction des liquides (2562), ont étudié les *coefficients de dispersion* et les *pouvoirs dispersifs* de ces liquides entre 0° et 60°. Ils ont reconnu que le *coefficient de dispersion* diminue généralement quand la température augmente, et d'autant plus que le liquide disperse plus. Le *pouvoir dispersif* est tantôt augmenté, tantôt diminué par la chaleur, mais très-peu. Voici quelques résultats relatifs au *sulfure de carbone* :

Température.....	0°	10°	20°	30°	40°
Coefficient de dispersion..	0,0958	0,0937	0,0917	0,9901	0,0891
Pouvoir dispersif.....	0,1487	0,1477	0,1463	0,1457	0,1439

MM. Dale et Gladstone ont aussi mesuré la dispersion du phosphore, au moyen de phosphore coulé et solidifié dans un prisme de verre; ils ont trouvé 0,0238 pour le *coefficient de dispersion*, et 0,1781 pour le *pouvoir dispersif*, à 25°; nombres bien supérieurs à ceux du sulfure de carbone et des flints les plus dispersifs. Le coefficient diminue beaucoup, ainsi que l'indice de réfraction, quand le phosphore passe à l'état liquide; mais le *pouvoir dispersif* diminue très-peu; il devient 0,1745, et le coefficient, 0,1878.

M. Ch. S. Hastings a constaté, sur cinq espèces différentes de crown-glass et de flint-glass, que l'effet de la température est beaucoup plus prononcé sur le *pouvoir dispersif* que sur la réfraction.

2605. Premières recherches sur l'achromatisme. — Newton, à la suite d'expériences faites avec des prismes de verre, d'eau et d'essence de térébenthine, avait cru que la dispersion était proportionnelle à la réfraction, et que l'on ne pouvait recomposer la lumière blanche au moyen d'un second prisme, qu'en supprimant la déviation. Comme cette loi s'accordait avec l'explication de la réfraction dans le système de l'émission, il fit peu d'expériences à ce sujet. Cependant, il résulte de sa correspondance avec H. Oldenburgh, que ce dernier, en 1662, un siècle avant la réalisation de l'achromatisme, regardait comme possible de corriger les effets de la dispersion des lentilles, en interposant un liquide convenable entre deux ou plusieurs verres¹. Euler, en 1754, considérant que l'œil contient plusieurs milieux, et que les objets s'y peignent sans couleurs, pensa qu'il serait possible d'obtenir des lentilles achromatiques; mais il supposait que la relation entre la dispersion et la réfraction était la même pour tous les milieux. Il trouva, par le calcul, une loi répondant aux conditions du problème, et prouva qu'elle était la seule qui pût y satisfaire. Les artistes s'empressèrent aussitôt de faire des essais d'après les idées d'Euler; mais en vain. Cependant, un géomètre suédois, Klingenstriern, trouvait que les expériences de Newton

¹ Bibliothèque britannique (Sciences et arts), t. VII, p. 192.

conduisaient à un grand nombre de lois différentes et contradictoires, et ne pouvaient être exactes. Il communiqua son travail à Dollond, qui répéta alors ces expériences au moyen d'un prisme de verre, et d'un prisme d'eau à angle variable, et vit le rayon conserver une certaine déviation pendant que les rayons rouges et violets étaient ramenés au parallélisme. Il construisit alors un système achromatique, en associant un prisme de flint et un prisme de crown, et fabriqua ensuite des lentilles achromatiques, qu'il appliqua à ses lunettes grossissantes, et pour lesquelles il prit une patente. Alors Hall vint réclamer la priorité; il avait, en effet, construit des lunettes achromatiques, par un procédé qu'il gardait secret. On rapporte que, pour éviter qu'on ne devinât l'usage qu'il faisait de ses lentilles, il en confiait le travail à deux opticiens logés en deux points opposés de Londres; or, il arriva que ces deux opticiens faisaient tailler leurs verres par le même ouvrier, chez lequel Dollond vit des lentilles qui, réunies, ne donnaient pas de couleurs, ce qui le mit sur la voie de sa découverte. Quoi qu'il en soit, le Parlement donna gain de cause à Dollond, qui avait divulgué la manière d'achromatiser les verres, et l'on s'accorde à lui attribuer l'honneur de l'invention. Les lunettes achromatiques de Dollond eurent un très-grand succès, et une foule de géomètres s'empressèrent de calculer les angles des prismes, ou les courbures des lentilles satisfaisant aux conditions de l'achromatisme, pendant que les expérimentateurs s'appliquaient à mesurer les constantes qui entrent dans les formules.

II. Des prismes achromatiques.

2606. Un système de prismes est *achromatique* quand il dévie les rayons lumineux sans les colorer. La possibilité d'obtenir un semblable résultat ressort de ce qui précède; on peut aussi la mettre en évidence au moyen de l'appareil (*fig. 1857*). Cet appareil consiste en trois prismes à angle assez petit A, B, C : le premier, A, est en *crown*, et les deux autres, dont les sommets sont opposés à celui du premier, sont en *flint* et peuvent tourner autour du sommet du premier au moyen d'une charnière. Si on les relève et si l'on fait passer les rayons solaires à travers le prisme A, ces rayons sont déviés et irisés. Si on applique le prisme B sur le prisme A, il y a coloration sans déviation; et, si l'on relève le prisme B et qu'on abaisse C, il y a déviation sans coloration.

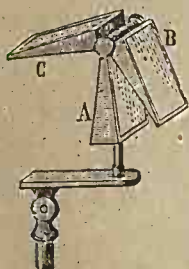


Fig. 1857.

2607. Conditions d'achromatisme d'un système de prismes. — Proposons-nous de trouver les angles que doivent avoir plusieurs prismes réunis, pour que le système dévie les rayons lumineux sans les colorer. Nous supposons que, ces angles étant très-petits, les rayons traversent à peu près perpendiculairement au plan bissecteur, auquel cas la déviation de chaque prisme est donnée par la formule $d = (n - 1) a$, (2509). Nous allons

d'abord calculer la déviation totale produite par le système des prismes sur chaque rayon coloré, et nous exprimerons ensuite que toutes les déviations totales sont égales.

Soient $a, a', a'' \dots$ les angles des prismes, et n, n', n'' leurs indices de réfraction pour un rayon particulier du spectre. Les déviations produites par les prismes successifs sont $(n - 1) a, (n' - 1) a', (n'' - 1) a'' \dots$, dont la somme sera la déviation totale D . On aura donc

$$D = (n - 1) a + (n' - 1) a' + (n'' - 1) a'' + \dots \quad [1]$$

Le premier terme étant positif, les autres le seront également pour les prismes dont l'angle est tourné du même côté que celui du premier prisme, et ils seront négatifs dans le cas contraire. Pour d'autres rayons, pour lesquels les indices sont $n_1, n'_1, n''_1 \dots, n_2, n'_2, n''_2 \dots$, on aurait de même les déviations-totales :

$$D_1 = (n_1 - 1) a + (n'_1 - 1) a' + (n''_1 - 1) a'' + \dots \quad [2]$$

$$D_2 = (n_2 - 1) a + (n'_2 - 1) a' + (n''_2 - 1) a'' + \dots \quad [3]$$

.....

Si l'on considère un nombre m de rayons, on aura ainsi les m déviations que leur fait subir le système des prismes. En égalant les $(m - 1)$ dernières à la valeur de D , pour exprimer que les déviations sont égales, on obtiendra $m - 1$ équations. — Si donc on forme un système de m prismes de nature différente, en se donnant l'angle du premier, on pourra calculer les angles que devront avoir les autres pour que les rayons émergents soient parallèles, et il restera à voir si la déviation n'est pas annulée. — Si l'on employait moins de m prismes, il y aurait moins d'inconnues que d'équations; certaines de ces dernières seraient donc des équations de condition, et il pourrait arriver qu'on ne pût pas y satisfaire avec les valeurs données de $n, n', n'' \dots; n_1, n'_1, n''_1 \dots; \dots$

2608. Cas de deux prismes. — Dans la pratique, on ne rend parallèles que deux rayons colorés, au moyen de deux prismes. La dispersion étant très-petite quand la déviation est faible, les autres rayons se trouvent alors sensiblement parallèles. On a, dans ce cas, les deux déviations

$$D = (n_r - 1) a + (n'_r - 1) a', \quad D' = (n_v - 1) a + (n'_v - 1) a';$$

écrivant que ces déviations sont égales, il vient

$$(n_r - 1) a + (n'_r - 1) a' = (n_v - 1) a + (n'_v - 1) a'; \quad \text{d'où} \quad \frac{a'}{a} = \frac{n_r - n_v}{n'_v - n'_r}.$$

L'angle a étant donné, on tire de là la valeur de l'angle a' du second prisme. Cette valeur est négative; car, si n'_v est plus grand que n'_r , n_v est plus grand que n_r . Le second prisme doit donc être renversé par rapport au premier.

Il faut aussi que la déviation $D = (n_r - 1)a + (n'_r - 1)a'$ ne soit pas nulle. Or, on peut écrire $\frac{D}{(n_r - 1)a} = 1 + \frac{n'_r - 1}{n_r - 1} \frac{a'}{a} = 1 + \frac{n'_j - 1}{n_j - 1} \frac{a'}{a}$, parce que l'on a sensiblement $\frac{n'_r - 1}{n_r - 1} = \frac{n'_j - 1}{n_j - 1}$. Remplaçant $\frac{a'}{a}$ par sa valeur ci-dessus, et désignant par p et p' les pouvoirs dispersifs $\frac{n_r - n_r'}{n_j - 1}$ et $\frac{n'_r - n'_r'}{n_j - 1}$ des substances des deux prismes, il vient

$$D = a(n_r - 1) \left(1 - \frac{p}{p'}\right),$$

valeur qui n'est pas nulle si les pouvoirs dispersifs p et p' des deux prismes sont inégaux, ce qui a lieu si on les choisit convenablement. On voit aussi que la déviation est d'autant plus prononcée, que p' est plus grand par rapport à p , et que n_r est aussi plus grand; le milieu qui disperse le moins doit donc être le plus réfringent possible.

Le *flint* et le *crown* satisfont aux conditions de l'achromatisme de deux couleurs, et l'on choisit ordinairement l'*orangé* et le *bleu*, qui sont les plus apparentes. Les autres couleurs se trouvent alors, par le fait, sensiblement achromatisées quand les angles sont petits; et, comme elles sont peu brillantes, ce qui en reste n'est pas distinct. Par exemple, supposons deux prismes faits du premier *flint* du tableau de Fraunhofer (2603) et du *crown* de la seconde ligne, les indices des raies G et D donnent $n'_r - n'_r' = 1,66028 - 1,63503 = 0,02525$; et $n_r - n_r' = 1,54165 - 1,52958 = 0,01207$; d'où $a' = a \cdot 2,09$, et, si nous supposons $a = 10^\circ$, il vient $a' = 20^\circ 54'$. La valeur de la déviation est alors $D = 19^\circ 12'$. — Si, au lieu de *crown*, on employait le cristal de roche, plus réfringent et moins dispersif, la déviation serait plus grande dans le rapport de 27 à 17, et, si l'on employait le diamant, dans le rapport de 39 à 17.

2609. Spectre secondaire. — Quand les angles des prismes ne sont pas très-petits, un de ces angles étant donné, on calcule l'autre approximativement par la méthode qui précède, et l'on achève par tâtonnement de lui donner la valeur convenable. Mais on ne peut alors détruire entièrement toutes les couleurs; on distingue généralement le vert et le jaune. Les couleurs qui restent ainsi forment ce qu'on appelle un *spectre secondaire*. Quand on achromatise trois rayons avec trois prismes, on a de même un *spectre tertiaire*. Dans ce dernier cas, on achromatise de préférence les rayons correspondant aux raies C, F et G. Si l'on connaissait deux substances dont les rapports de dispersion fussent égaux dans toutes les parties du spectre, on aurait un achromatisme parfait en réunissant deux rayons seulement. Nous avons vu que cette condition est à peu près remplie par certains verres étudiés par Dutirou (2603); ils conviendraient donc mieux que le *flint* et le *crown* ordinaires.

2610. Méthodes pratiques. — Dans la pratique, on évite les calculs en

faisant usage d'un prisme à angle variable en *flint-glass*, dont on modifie l'angle par tâtonnement, jusqu'à ce que l'on voie disparaître toute coloration, quand on regarde à travers ce prisme et celui que l'on veut achromatiser. On peut employer pour cela le prisme variable de Boscovich (2510); mais il est difficile de faire coïncider les surfaces cylindriques en contact, et le frottement ne tarde pas à les dépolir.

Diasporamètre de Rochon. — On emploie de préférence, pour le même usage, le *diasporamètre* de L. Rochon, dont voici le principe. Considérons deux prismes rectangulaires égaux ADB, ACB (fig. 1858), appuyés l'un sur l'autre par leur face hypothénuse, de manière que les faces BD et AC soient parallèles. Alors l'angle de ces faces est nul, et le système forme une plaque à faces parallèles. Si l'on fait tourner le prisme supérieur, de 180° autour de oa perpendiculaire à AB , il prend la position $AC'B$, et le système forme un prisme $C'AC$, dont l'angle en A est $2 \text{ BAC} = 2x$. Entre ces deux positions, le système formera un prisme dont l'angle sera intermédiaire entre zéro et $2x$.

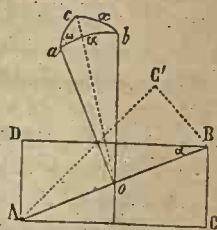


Fig. 1858.

On peut facilement calculer cet angle pour une rotation connue du prisme supérieur. En effet, soit ob une perpendiculaire à DB , et oc la position qu'elle prend quand le prisme supérieur tourne autour de oa d'une quantité angulaire ω . Si nous décrivons une sphère, du point o comme centre avec un rayon égal à l'unité, les trois plans aob, aoc, cob intercepteront sur sa surface un triangle sphérique abc , dans lequel l'angle cab n'est autre chose que l'angle de rotation ω , l'arc ab sert de mesure à l'angle x , et l'arc xc mesure l'angle cob de la face AC avec la face DB dans sa nouvelle position. Ce triangle donne :

$$\cos x = \cos^2 x + \sin^2 x \cos \omega.$$

Après avoir trouvé par tâtonnement la rotation ω , pour laquelle le prisme donné est achromatisé, on tire de cette formule la valeur de l'angle x .

La figure 1859 représente le *diasporamètre* en coupe et en perspective. Les deux prismes égaux, représentés à part en AA' , sont fixés au fond de tubes $r, t; r', t'$; dont un, r, r' , est fixé à un disque vertical porté par le pied de l'appareil, et l'autre t, t' , à un plateau a, a' garni de dents sur son contour, et pouvant recevoir un mouvement de rotation sur lui-même, au moyen du pignon, p, p' . L'angle de rotation se mesure au moyen d'un vernier, et d'une graduation gravée sur le disque fixe. Quand le zéro du vernier est au zéro de la graduation, l'angle du système des prismes est nul.

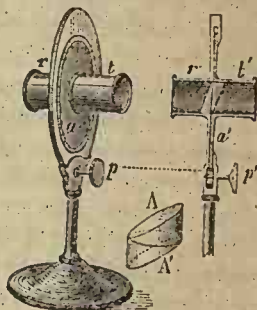


Fig. 1859.

La section droite du système des deux prismes changeant de position avec l'angle que forment leurs faces extérieures, il faut déplacer le prisme donné, de manière que sa section droite soit parallèle à celle du système. M. Duboscq a fait disparaître cet inconvénient, en fixant les deux tubes t' , t'' sur des plateaux mobiles garnis de dents latérales que commande un même pignon vertical. De cette façon, les deux prismes tournent en sens contraire, de quantités égales, et la section droite du système reste toujours dans le même plan.

2611. Diasporamètre de Brewster. — Cet instrument est plus précis que le précédent; en voici le principe. Si l'on regarde une ligne blanche sur un fond noir, ab (fig. 1860), à travers un prisme parallèle à cette ligne, on voit une bande irisée ceb , de largeur $ce = l$. Si l'on incline la ligne dans la position ab' , l'épanouissement ce dans le plan de réfraction restant le même, la largeur en de la bande sera moindre et égale à $l \cos \alpha$, en appelant α l'angle $b'ab$. Si, au

lieu d'incliner la ligne, on incline le prisme, le résultat sera le même, et la largeur de la bande sera proportionnelle au *cosinus* de l'angle qu'elle fait avec les arêtes du prisme; elle sera nulle pour $\alpha = 90^\circ$.

Cela posé, le prisme que l'on veut achromatiser est fixé en P (fig. 1860) dans un tube AA engagé dans un second tube BB fixé au pied de l'appareil. On fait tourner le tube AA, jusqu'à ce que les arêtes du prisme P soient parallèles à la mire linéaire, puis on serre la vis de pression u . Autour du tube AA tourne un manchon MM, portant un disque gradué DD, dont un vernier

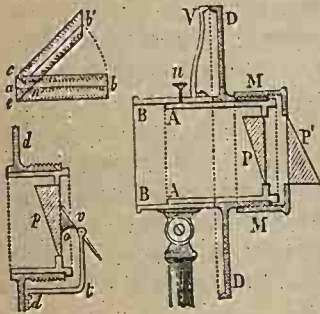


Fig. 1860.

fixe V indique les déplacements angulaires. Au manchon se visse une virole qui porte un prisme en flint P' , nommé *prisme-type*, et que l'on place d'abord parallèlement à la mire, mais dans une position inverse de celle du prisme P. On fait ensuite tourner le prisme P' , de α , jusqu'à ce que la coloration de la mire disparaisse. Si a est l'angle du prisme P' , et l la dilatation qu'il fait subir à la mire quand il lui est parallèle, cette dilatation ne sera que $l \cos \alpha$ quand on aura fait tourner ce prisme de α . Or, dans cette position, il dilate la mire comme le ferait un prisme de flint ayant pour angle $a \cos \alpha$, et qui serait parallèle à la mire; $a \cos \alpha$ sera donc l'angle qu'il faudra donner à un prisme de flint, pour achromatiser le prisme donné P.

Cet appareil peut servir aux liquides: après avoir enlevé le prisme P' , on applique sur le prisme fixe, représenté à part en p , une lame de verre à faces parallèles, v , soutenue par un support t fixé au disque dd dont le zéro coïncide avec celui du vernier, quand le bord de la lame est parallèle aux arêtes du prisme p . On engage une goutte de liquide dans l'angle o , où elle adhère par capillarité; et faisant tourner le disque dd , on cherche la position pour laquelle

il y a achromatisme. Dans ce mouvement, la lame v fait toujours le même angle, connu d'avance, avec la face antérieure du prisme p .

Les diasporamètres ont servi à calculer des tables donnant les angles que doivent avoir des prismes de substance connue, pour s'achromatiser mutuellement. Comme les verriers fournissent aujourd'hui des verres de composition constante, les opticiens trouvent dans ces tables, des nombres qui les dispensent le plus souvent d'avoir recours à de nouvelles expériences.

III. Lentilles achromatiques.

2612. Calcul des courbures d'un système de lentilles achromatiques. — Un système de lentilles est achromatique quand il ne présente pas d'aberration de réfrangibilité, c'est-à-dire quand les rayons différemment réfrangibles émanant d'un point lumineux, vont se réunir en un même foyer conjugué.

Nous allons chercher les courbures qu'il faut donner à plusieurs lentilles à

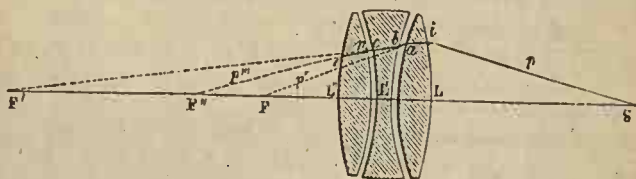


Fig. 1861.

petite ouverture appliquées les unes sur les autres, pour que le système réunisse tous les rayons colorés en un seul et même foyer. Nous supposons que l'épaisseur du système est négligeable.

Soit si un rayon incident simple (*fig. 1861*), et F le foyer conjugué du point s quand il n'y a qu'une lentille, L ; on aura, en posant $si = p$, $iF = p'$,

$$[1] \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$$

a étant la distance focale principale de la lentille pour l'espèce de rayons colorés considérée. Supposons une seconde lentille L' , dont une des faces coïncide avec une de celles de la première. Le rayon $siab$, arrivé en b , prendra la direction bcF' ; et comme le rayon partant de F' , sortirait de la lentille L' suivant ba , le point F , situé sur le prolongement de ba , est le foyer conjugué du point F' par rapport à la lentille L' . On a donc, en posant $F'c = p''$,

$$[2] \quad \frac{1}{p''} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{a'}. \quad \text{On aurait de même } \frac{1}{p'''} - \frac{1}{p''} = \frac{1}{a''},$$

si l'on avait une troisième lentille L'' ; le rayon parvenu en n se dévient

suivant neF'' , et le point F'' étant le foyer conjugué de F' , par rapport à la lentille L'' . Si l'on avait m lentilles, on aurait ainsi m équations, dont la m^e serait

$$\frac{1}{p_m} - \frac{1}{p_{m-1}} = \frac{1}{a_{m-1}}.$$

L'épaisseur du système étant supposée négligeable, p, p', p'', \dots, p_m peuvent être regardés comme représentant les distances des points F, F', F'', \dots au centre optique du système. En ajoutant ou retranchant ces égalités membre à membre, on élimine p', p'', \dots, p_{m-1} , et il reste

$$\frac{1}{p} \pm \frac{1}{p_{m-1}} = \frac{1}{a} \pm \frac{1}{a'} \pm \dots \pm \frac{1}{a_{m-1}},$$

qui donne la valeur de p_{m-1} , ou la distance du foyer au centre optique du système, en fonction de p et a, a', a'', \dots , qui sont eux-mêmes fonction des rayons $R, R'; R', R''; R'', R'''$... des lentilles, et de leurs indices de réfraction $n, n', n'' \dots$ pour le rayon coloré considéré, car on a (2524)

$$a = \frac{RR'}{(n-1)(R+R')}, a' = \frac{R'R''}{(n'-1)(R'+R'')}, a'' = \frac{R''R'''}{(n''-1)(R''+R''')} \dots$$

Si l'on considère de même une autre espèce de rayon simple, on aura une nouvelle équation qui donnera la distance du foyer formé, au centre optique, en fonction des rayons de courbure des lentilles et de leurs indices par rapport à cette nouvelle espèce de rayons. En considérant ainsi successivement m rayons, on aura m distances focales exprimées en fonction des $m+1$ rayons de courbure des m lentilles. Égalant une de ces distances aux $m-1$ autres, on obtiendra $m-1$ équations du premier degré, dans lesquelles il entrera $m+1$ rayons de courbure. Deux de ces rayons étant choisis arbitrairement, on calculera la valeur des autres, de manière à satisfaire aux équations, et l'on aura ainsi les courbures que devront avoir les faces de lentilles à indices connus, pour que tous les rayons colorés fassent leur foyer au même point, c'est-à-dire pour qu'il y ait achromatisme.

2613. Cas de deux lentilles. — Dans le cas de deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente, on n'achromatise directement que deux sortes de rayons. Ajoutons les équations [1] et [2], nous aurons

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p''} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}; \text{ puis } \frac{1}{p} + \frac{1}{p''_1} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a'_1},$$

en ajoutant les deux équations analogues pour un autre rayon. Les valeurs de p'' et p''_1 seront égales, si l'on a

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a'_1}. \quad [3]$$

Or, en appelant R, R' les rayons de courbure de la première lentille

supposée *bi-convexe*, et — R' et R'' ceux de la seconde, dont la face de rayon R' est alors *concave*; appelant enfin n_r, n'_r les indices des substances des lentilles par rapport au premier rayon, et n_e, n'_e leurs indices par rapport au second, nous aurons

$$a = \frac{RR'}{(n_r - 1)(R + R')}, \quad a' = \frac{R'R''}{(n'_r - 1)(R' - R'')};$$

$$a_1 = \frac{RR'}{(n_e - 1)(R + R')}, \quad a'_1 = \frac{R'R''}{(n'_e - 1)(R' - R'')}.$$

Substituant ces valeurs dans l'équation [3], on en tire

$$R'' = \frac{RR'(n'_e - n'_r)}{R(n'_e - n'_r) - (R + R')(n_e - n_r)}; \text{ qui devient } R'' = \frac{R(n'_r - n'_e)}{(n'_e - n'_r) - 2(n_e - n_r)},$$

quand les deux faces de la première lentille ont même courbure. On prend arbitrairement les rayons de courbure R, R' , et l'on donne la valeur R'' au rayon de courbure de la face extérieure de la seconde lentille. Cette face extérieure sera convexe ou concave, suivant que R'' sera positif ou négatif. La valeur de R'' étant indépendante de p , on voit que l'achromatisme existera, quelle que soit la position du point lumineux.

Dans la pratique, on emploie une lentille *bi-convexe* de *crown* et un ménisque divergent de *flint*, et l'on achromatise les rayons bleus et orangés; les autres rayons sont alors plus près d'être également achromatisés que si l'on opérât sur les rayons rouges et violets.

2614. Lentilles liquides. — Certaines des nouvelles espèces de verre étudiées par l'abbé Dutirou (2603) présentent toutes les conditions pour donner un bon achromatisme; mais, pendant longtemps, la difficulté de trouver des matières solides convenables a conduit à employer des lentilles liquides. On doit à Blair un grand travail sur ce sujet¹. Il formait un système achromatique au moyen de deux lentilles de *crown*; l'une plan-convexe, l'autre concave-convexe, dont les faces convexes, tournées l'une vers l'autre, retenaient un liquide maintenu par une bande circulaire réunissant les contours des deux verres. Après un grand nombre d'essais, Blair adopta pour ce liquide, qui formait ainsi une lentille bi-concave, une solution de chlorure d'antimoine dans l'acide chlorhydrique. Quand on fait varier les proportions d'acide, on modifie beaucoup plus le pouvoir dispersif que le pouvoir réfringent, de manière à pouvoir obtenir, par tâtonnement, un achromatisme satisfaisant.

Fresnel, Barlow ont aussi étudié les lentilles achromatiques à liquide. Le dernier plaçait à une certaine distance d'une lentille biconvexe de verre, une lentille biconcave formée de sulfure de carbone contenu entre deux verres de montre. En éloignant plus ou moins cette lentille liquide, il corrigeait l'aberration chromatique et même l'aberration de sphéricité. Quand la chaleur altérait

¹ Bibliothèque britannique (sciences et arts, 1798). t. VII, p. 477.

l'achromatisme, on la rétablissait en déplaçant un peu la lentille. — On n'a pas tardé à renoncer aux lentilles liquides; principalement, parce que les changements de température en détruisent l'homogénéité.

CHAPITRE V

ÉTUDE DES RADIATIONS

« 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. »
MELLONI.

§ 1. — EFFETS LUMINEUX ET CALORIFIQUES

I. Distribution de la lumière et de la chaleur dans le spectre.

2615. Définitions. — Les différents rayons colorés séparés dans la dispersion présentent des intensités *lumineuses* et *calorifiques* inégales, et produisent des effets *chimiques* et *phosphorogéniques* différents. Comme certains de ces effets se manifestent en dehors du faisceau lumineux qui produit le spectre visible, auquel cas le mot *rayon* ne peut plus guère s'appliquer, on a désigné sous le nom plus général de *radiations* toutes les directions partant du point d'émergence du pinceau dispersé, et sous lesquelles se produisent un ou plusieurs des effets que nous venons d'énumérer.

Nous allons, dans ce chapitre, étudier les effets des diverses radiations, à commencer par les actions *lumineuses* et *calorifiques*, et exposer les applications remarquables qu'on en a faites, particulièrement à l'*analyse spectrale* et à la *photographie*. Dans cette étude, nous verrons partout dominer le *principe de l'identité*, que nous avons déjà considéré en parlant de la dispersion de la chaleur (II, 889), et qui consiste en ce que tout pinceau isolé par le prisme et produisant à la fois les effets lumineux et calorifiques, est simple et non composé de rayons de lumière mêlés à des rayons distincts de chaleur. Nous rencontrerons, dans la suite, plus d'une confirmation de ce principe, et nous allons voir bientôt comment il s'étend et se complète quand on considère les actions chimiques et phosphorogéniques des radiations qui produisent à la fois plusieurs sortes d'effets.

2616. Propriétés calorifiques. — Nous avons vu (II, 882) que le spectre lumineux est accompagné d'un spectre calorifique qu'on a cru d'abord en être complètement indépendant; mais nous avons vu aussi comment on a prouvé que, partout où il y a en même temps lumière et chaleur, ce sont les mêmes rayons qui produisent à la fois les deux sortes d'effets. Rappelons encore que le *maximum* de chaleur ne se présente pas là où la lumière a le plus d'éclat, et que ce *maximum* change de place avec la nature du prisme. C'est que celui-ci est, le plus souvent, *thermochrôïque* (II, 874), et se comporte, par rapport aux rayons de chaleur, comme le ferait un prisme en verre coloré par rapport aux rayons lumineux, dont il absorberait une partie. Le *sel gemme* est athermochrôïque, et un prisme de cette matière donne un spectre calorifique et lumineux intact, c'est-à-dire dans lequel aucune radiation n'est sensiblement absorbée. Il existe un autre minéral, la *sylvine* (chlorure de potassium), qui jouit des mêmes propriétés que le sel gemme, et qui produit aussi le spectre normal.

Nous avons déjà vu que les rayons solaires donnent de nombreuses radiations calorifiques moins réfrangibles que les rayons rouges. Celles-là ne produisent pas l'effet lumineux; elles sont cependant les plus intenses, comme l'a prouvé M. Tyndall, qui a reconnu que le meilleur moyen d'obtenir un faisceau intense de chaleur obscure consiste à intercepter les radiations lumineuses d'un faisceau fourni par le soleil ou par la lumière électrique, au moyen d'une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone (II, 884). C'est à cause du grand nombre de ces radiations obscures que le foyer calorifique d'un *verre ardent* s'en trouve plus éloigné que le foyer lumineux, comme l'a reconnu, le premier, le P. Abat.

2617. Propriétés éclairantes. — Un simple coup d'œil suffit pour reconnaître que l'intensité lumineuse n'est pas la même dans tous les points du spectre. Herschell a constaté que le *maximum* se montre dans les parties jaune et verte. Il procédait en cherchant à quelle distance *maximum* il pouvait lire une page imprimée quand elle était éclairée successivement par les différentes parties du spectre. Le photomètre de Masson (2418) donne des résultats plus précis.

Fraunhofer a appliqué son photomètre chromatique (2417) à l'étude de la distribution de la lumière dans le spectre. Il a reconnu que la partie la plus brillante est placée à la limite du jaune, entre les raies D et E; mais les résultats ne sont pas très-sûrs, car, dans plusieurs expériences successives, ils ont différé notablement.

2618. Ordre des couleurs. Spectre anormal. — Les couleurs du spectre solaire sont disposées dans un ordre constant, les rayons violets étant les plus déviés, même lorsque le prisme est en verre de couleur, auquel cas certaines nuances sont remplacées par des espaces obscurs. Mais cela suppose que la matière du prisme est transparente à la manière ordinaire, réfléchissant la lumière dans les mêmes conditions que le verre, conditions que la théorie des ondulations nous apprendra plus tard à définir, et non dans les conditions des métaux, qui sont opaques et réfléchissent la lumière en prenant cet aspect

particulier qui constitue l'éclat métallique. Or, il existe certaines substances (dissolutions de permanganate de potasse, indigo, iode, la plupart des couleurs d'aniline, etc.) qui tiennent à la fois des substances transparentes et des métaux, réfléchissant certains rayons colorés, comme les premières, et d'autres, comme les seconds¹. M. Kundt les appelle *substances à couleurs superficielles*; elles présentent jusqu'à un certain point l'éclat métallique, et sont généralement fortement colorantes. M. Haidinger a remarqué que la lumière qu'elles réfléchissent est sensiblement complémentaire de celle qu'elles transmettent (2594).

La propriété la plus remarquable de ces substances est que leur dissolution dans divers liquides réfractent plus les rayons rouges que les autres rayons simples, de manière à donner un spectre *anormal*, dans lequel l'ordre des couleurs est changé. Déjà M. Leroux, en 1862, avait vu la vapeur d'iode dévier les rayons rouges plus que les violets, et M. Christiansen avait constaté qu'une dissolution concentrée de fuchsine donne des indices de réfraction augmentant du rouge au jaune, puis diminuant rapidement jusqu'à l'indigo, pour recommencer à croître. On ne connaissait que ces deux faits isolés, quand M. Kundt a montré la généralité de la dispersion anormale dans les dissolutions des corps à couleurs superficielles. Il formait un prisme en engageant une goutte de dissolution dans l'angle de deux lames de verre, et observant les rayons passant tout près de l'arête du prisme liquide, où il est transparent pour presque toutes les couleurs. Dans une dizaine de dissolutions, M. Kundt a vu les rayons rouges plus déviés que les violets. Dans plusieurs, le vert est le moins réfracté; par exemple, les dissolutions de cyanine, bleu et violet d'aniline, indigo-carmin, donnent la série vert, bleu, rouge. Les résultats dépendent du degré de concentration; toutes ces substances donnent un spectre normal quand elles sont très-étendues.

M. Soret obtient le spectre anormal avec des matières peu concentrées, et par conséquent transparentes, en les mettant dans un prisme creux plongé dans une auge à glaces parallèles remplie du dissolvant employé.

II. Des raies du spectre.

2619. Raies noires du spectre solaire. — La lumière parut à Newton répartie dans toute l'étendue du spectre solaire, de manière qu'il y eût des rayons de tous les degrés de réfrangibilité entre le rouge et le violet extrêmes. Un siècle plus tard, Wollaston, en 1802, ayant regardé à travers un bon prisme de verre, une fente très-étroite éclairée par la lumière du jour, aperçut dans le spectre formé quatre raies noires très-fines parallèles aux arêtes du prisme².

¹ *Ann. de Poggend.*, t. CXLII, p. 177, et *Journal de phys.* de M. d'Almeida, t. I, p. 39.

² *Bibliothèque britannique (Sciences et Arts)*, t. XXVI, p. 239.

Après avoir obtenu les mêmes résultats au moyen de prismes liquides, il observa quatre raies brillantes dans le spectre formé par la partie bleue de la flamme d'une bougie, et dans celui de la lumière électrique. — Quinze ans après, l'opticien Fraunhofer, qui ne connaissait pas les observations de Wollaston, ayant voulu comparer les indices des divers rayons colorés, chercha des repères qui pussent l'aider à viser toujours au même point. Il remarqua d'abord un trait jaune très-brillant, dans le spectre donné par la lumière d'une lampe; ce repère était unique, et il chercha s'il n'en existerait pas d'autres dans le spectre solaire. C'est alors qu'ayant opéré avec un prisme de flint, fixé à l'appareil (fig. 1818), il vit le spectre strié transversalement, d'une multitude de raies très-fines, sombres ou tout à fait noires; il put en compter 500 à 600, et le nombre était d'autant plus grand que la lunette avec laquelle il observait grossissait davantage. Ces raies sont réparties irrégulièrement dans toute l'étendue du spectre, et ne tombent pas généralement aux limites, d'ailleurs très-indécises, des couleurs principales. Pour se reconnaître au milieu de cette confusion, Fraunhofer choisit 8 raies principales, faciles à distinguer par leur position et leur intensité, et les désigna par les premières lettres de l'alphabet, en commençant par l'extrémité rouge du spectre. La figure 1867 représente les 8 raies principales de Fraunhofer, avec une multitude d'autres; les unes forment des groupes serrés, les autres sont plus ou moins espacées et distribuées très-inégalement dans les différentes couleurs. Parmi ces raies, il en est encore deux à remarquer : l'une dans le rouge *a*, formée de 8 lignes fines, l'autre située en *b* dans le vert, près de E, et formée de trois lignes fines dont les deux plus fortes sont séparées par un espace brillant.

Quand la fente lumineuse est remplacée par un petit trou circulaire, les raies conservent leur forme rectiligne parallèle aux arêtes du prisme; d'où l'on conclut qu'elles appartiennent bien à la lumière même, et qu'elles ne sont pas dues à un de ces effets que nous étudierons plus tard sous le nom de *diffraction*.

Conséquences. — Les raies du spectre solaire montrent que la lumière du soleil ne contient pas des rayons de tous les degrés de réfrangibilité entre le rouge et le violet; il y a une multitude de petites lacunes. L'aspect, l'ordre et les rapports de distance de ces raies restent les mêmes pour un prisme de même substance, quel que soit son angle. — Si la substance du prisme change, les distances relatives des raies sont seules modifiées, comme les espaces occupés par les diverses couleurs.



Fig. 1862.

Indépendamment de l'usage qu'il en a fait dans la mesure des indices (2552), Fraunhofer a tiré de la présence des raies un moyen original de distinguer l'origine des rayons lumineux. Par exemple, il a reconnu que la lumière d'une surface blanche éclairée par le soleil, celle des nuées, de la lune, des planètes, donne des raies noires disposées de la même manière que celles du spectre solaire, ce qui atteste leur origine commune; tandis que les étoiles donnent, comme nous le verrons, des raies distribuées autrement que celles de la lumière solaire, et d'une manière différente quand on passe d'une étoile à une autre. Les étoiles sont donc des sources lumineuses indépendantes les unes des autres.

2620. Manière d'observer les raies. — Il faut d'abord un prisme bien homogène, exempt de stries, et présentant un angle assez grand pour que le spectre soit bien pur et bien étalé. On emploie ordinairement des prismes de flint-glass, de cristal de roche, de sulfure de carbone. On fait tomber sur le prisme les rayons solaires, ou la lumière du ciel entrant dans la chambre noire par une fente étroite, et l'on reçoit le faisceau dispersé, dans une lunette grossissante bien achromatique. On dispose cette lunette, en enfonçant plus ou moins l'oculaire, de manière à voir d'abord nettement la fente, que l'on vise ensuite à travers le prisme; les raies sont grossies, et l'on en distingue d'autant plus que la lunette est plus forte. Si la lunette n'est pas parfaitement achromatique, il faut la raccourcir un peu plus pour voir les raies dans le violet que pour apercevoir celles du rouge. La position du prisme la plus favorable est celle du *minimum* de déviation (2511). Si l'on augmente l'angle d'incidence, les raies disparaissent, et, pour les retrouver, il faut raccourcir un peu la lunette; si l'on diminue cet angle, les raies disparaissent encore, et on les retrouve en allongeant légèrement la lunette. — Un trait lumineux de 1 à 2^{mm} d'épaisseur, laisse voir les raies les plus fortes; mais il ne doit avoir que $\frac{1}{4}$ ^{mm} pour les plus fines.

Il existe des raies en deçà de la ligne A dans le rouge, et au-delà du violet. Les premières ont été observées par Brewster dans un espace égal à la distance AB (*fig.* 1862); les autres, par J. Herschell dans un espace de couleur gris-lavande, qui s'étend au-delà du violet. Pour apercevoir ces raies, il faut employer des précautions multipliées, intercepter tous les rayons autres que les rayons rouges ou violets, et tapisser de velours noir l'intérieur de la lunette. Brewster rendait sa vue plus perçante, en dissolvant, au moyen du gaz ammoniac, le fluide trop épais qui lubrifie la surface de l'œil. Au moyen de ces précautions, et en employant un prisme d'huile de cassia, qui disperse beaucoup la lumière, il a pu distinguer jusqu'à 2000 raies.

Fraunhofer déduisait les distances angulaires des raies, des déviations qui leur correspondaient, au moyen de son appareil (*fig.* 1818), à la place duquel on peut employer le goniomètre de Babinet. Fraunhofer a aussi mesuré les distances absolues des raies, au moyen d'une lunette à réticule pouvant glisser sur une règle parallèle au spectre, de manière à recevoir successivement les différentes couleurs. Une vis micrométrique indiquait les distances des raies, coïncidant successivement avec le fil du réticule.

On peut observer à l'œil nu les principales raies. Voici les précautions que prend M. F. Bernard pour en distinguer plus de cent : les rayons solaires sont réfléchis dans la chambre noire, à travers une fente verticale de 1^{mm} de largeur au plus. On place l'œil à 3 mètres environ de la fente et très-près d'un prisme bien vertical que l'on fait tourner peu à peu. Quand on approche du *minimum* de déviation, les raies apparaissent nettement. Pour distinguer celles du violet, il faut mettre l'œil très-près du sommet du prisme; et il faut que le spectre soit très-brillant; la lumière du disque solaire légèrement voilé par des nuages, convient très-bien. Pour distinguer les raies des autres couleurs, il faut se rapprocher du *minimum* de déviation et employer une lumière moins vive; par exemple, la lumière du ciel passant directement par la fente. Du reste, la position la plus favorable du prisme n'est pas tout à fait la même pour divers observateurs et paraît dépendre de la conformation de l'œil.

On peut aussi distinguer une quarantaine des raies les plus prononcées, dans un spectre projeté sur la surface blanche d'un papier fin bien tendu, ou d'une lame de verre dépoli. Les rayons solaires traversent deux fentes à 4 ou 5 mètres l'une de l'autre; contre la seconde, est placé le prisme de flint dans la position du *minimum* de déviation, et que l'on fait tourner peu à peu jusqu'à ce que les raies apparaissent sur l'écran placé à 1 ou 2 mètres du prisme; on obtient un résultat encore meilleur en disposant une lentille achromatique à long foyer derrière le prisme, pour avoir un spectre plus pur et plus brillant.

Enfin, en associant plusieurs prismes que les rayons traversent successivement, chacun d'eux écarte davantage les rayons simples séparés par les premiers, et en étalant ainsi le spectre permet de distinguer un plus grand nombre de raies. — Nous décrirons bientôt, sous le nom de *spectroscopes*, des appareils au moyen desquels on peut voir des milliers de raies, avec une netteté merveilleuse¹.

2621. Influence des gaz colorés sur la formation des raies. — On n'avait aucune idée de la cause des raies du spectre solaire, lorsque Brewster, en 1832, fit une expérience capitale qui a permis d'entrevoir une explication de leur formation². Il fit passer à travers un prisme de cristal de roche de 78°, les rayons de la flamme d'une lampe, et obtint un beau spectre, sans raies, les flammes ordinaires n'en donnant pas, comme nous le verrons (2623). Il plaça alors dans le trajet des rayons, de la vapeur d'acide hypo-azotique contenue dans un cylindre fermé par deux glaces; aussitôt, il vit les parties violettes et bleues se couvrir de raies, ou de bandes obscures, qui s'étalaient de plus en plus à mesure que la densité du gaz augmentait, et finissaient par se réunir, de manière à faire disparaître tous les rayons violets. En même temps, des bandes

¹ Divers physiciens avaient cru observer dans le spectre solaire, des raies longitudinales perpendiculaires à celles de Fraunhofer. Mais on a reconnu bientôt que ce phénomène n'a rien de constant et qu'il est dû à des grains de poussière déposés aux bords de la fente; quand on les enlève, les raies longitudinales disparaissent.

² *Transactions philosophiques d'Édimbourg*, t. XII.

se montraient dans le jaune, et finissaient par s'étendre jusque dans le rouge; ce que l'on obtenait aussi, sans augmenter la densité de la vapeur, en élevant fortement sa température.

Peu de temps après, H. Miller et Daniell répétèrent ces expériences au moyen des vapeurs d'iode et de brome, qui donnent des résultats très-nets, et avec lesquelles les raies ne sont pas distribuées de la même manière qu'avec l'acide hypo-azotique. Suivant Miller, elles se montrent d'abord dans le vert et le jaune, puis dans l'orangé et le commencement du rouge; elles ont l'apparence de cannelures; les unes sont tout à fait noires, les autres forment des bandes sombres. En les étudiant, au moyen du spectroscopie (2632), on voit qu'elles sont formées par la réunion d'une foule de raies noires très-fines.

Si l'on opère avec la lumière solaire et si l'on fait passer la vapeur colorée de plus en plus dense devant la fente par laquelle entrent les rayons, les raies, faibles d'abord, s'assombrissent et finissent par empêcher de distinguer les raies directes du spectre solaire. On remarque que ces deux sortes de raies sont indépendantes les unes des autres, excepté pour l'acide hypo-azotique, avec lequel les deux systèmes semblent en partie coïncider, d'après Brewster.

M. E. Robiquet avait avancé que le chlore sec, même sous une épaisseur de 4^m,50, ne produisait pas de raies; mais Morren en a obtenu un grand nombre au moyen des rayons solaires et de 5 prismes en flint. L'absorption était surtout prononcée du violet au bleu.

Il est à remarquer que les raies éprouvent, quand la densité des gaz varie, des changements de distance pouvant aller jusqu'à 30"; leur épaisseur, comme l'a remarqué M. A. Weiss, augmentant du côté des rayons les plus réfringibles plus que du côté opposé. Il résulte de là que ces raies d'absorption ne peuvent servir de repères dans la mesure des indices de réfraction.

On peut, jusqu'à un certain point, remplacer les vapeurs colorées par les liquides qui les produisent¹. M. Kundt, en 1870, a obtenu de 3 à 5 raies d'absorption, au moyen de l'acide hypo-azotique liquéfié; et M. D. Gerner, un plus grand nombre, en refroidissant le liquide, ce qui le rend beaucoup plus transparent; il a reconnu, en outre, que les raies coïncident toujours avec celles que produit la vapeur. Le même acide, anhydre et dissous dans un liquide anhydre (benzine, nitro-benzine, sulfure de carbone, chloroforme, etc.), donne les mêmes bandes d'absorption que l'acide, et il suffit de très-peu de cet acide dans le dissolvant pour qu'elles se montrent. Les acides chlorureux et hypochloriques produisent les mêmes effets, et d'une manière encore plus prononcée.

2622. De la cause des raies du spectre solaire. — La production de bandes sombres lors de l'interposition des vapeurs colorées, s'explique naturellement par l'absorption de certains rayons colorés (2581). On est donc porté à attribuer les raies du spectre solaire à une absorption semblable par l'air atmosphérique, qui, faiblement coloré, ne donnerait que des raies très-fines. Les raies

¹ Journal de physique de M. d'Almeida, t. I, p. 60.

devraient donc être d'autant plus nombreuses et plus marquées que le soleil serait plus près de l'horizon ; et, en effet, on a constaté que l'aspect de certaines d'entre elles dépend de cette circonstance et de l'état de l'atmosphère. Par exemple, M. F. Bernard en a vu, principalement dans le rouge, présenter une netteté remarquable, quand le soleil était très-bas.

Longtemps auparavant, Brewster avait remarqué, dans le spectre du soleil couchant, des bandes sombres vers les raies B, C, D, bandes que M. Janssen a pu résoudre, au moyen d'un appareil à plusieurs prismes, en une multitude de raies très-déliées, dont une partie coïncidait avec des raies de Fraunhofer. Ces bandes s'affaiblissent quand le soleil monte et quand on observe sur de hautes montagnes. On doit donc les attribuer à l'absorption de l'air. M. Janssen, qui les a nommées *raies atmosphériques* ou *telluriques*, a démontré qu'elles sont dues principalement à la vapeur d'eau que contient l'air¹. Car, sur le Faulhorn (2683^m), par un temps très-sec, il les a vues disparaître, tandis qu'elles augmentaient d'intensité pour le spectre de rayons partant d'une grande flamme et ayant rasé la surface du lac de Genève, mais seulement quand la distance était suffisante. En outre, le même physicien a prouvé directement, dès 1855, la faculté absorbante de la vapeur d'eau, en faisant passer à travers un long tuyau de 37 mètres de longueur, entouré de sciure de bois et rempli de vapeur à plusieurs atmosphères de pression, la lumière de plusieurs becs de gaz. Il vit le spectre strié de plusieurs raies, dont la position était celle des raies du spectre du soleil près de son coucher ; tandis que le spectre de la flamme du gaz est habituellement dépourvue de raies noires. — Cette absorption des rayons lumineux par la vapeur d'eau est semblable à celle qu'elle exerce sur les rayons calorifiques (II, 868).

Ces faits nouveaux peuvent servir à lever l'objection faite à l'existence des *raies telluriques* par M. Glaisher, qui, dans une ascension aérostatique, en 1863, vit, à une hauteur de 7,250^m, le spectre solaire strié de raies beaucoup plus nombreuses qu'à la surface du sol ; mais il eût fallu prouver que l'air n'était pas très-humide autour de l'aérostat. — Ajoutons qu'on a observé des raies telluriques dans le spectre de l'étoile *Sirius* très-rapprochée de l'horizon.

Si certaines raies doivent être attribuées à l'action de l'atmosphère, il en est d'autres en plus grand nombre, notamment celles qu'a décrites Fraunhofer, qui, indépendantes de l'état de l'air et de la hauteur du soleil, ont une toute autre origine. Brewster ayant remarqué qu'elles sont distribuées comme celles que produisent les vapeurs nitreuses, a supposé que certains rayons sont absorbés par un milieu qui se comporte comme ces vapeurs. Ce milieu ne pouvant être l'atmosphère terrestre, il eut l'idée de le chercher dans l'atmosphère du soleil. Pour vérifier cette hypothèse, M. Forbes et M. Matthiessen, pendant des éclipses de soleil, ont observé le spectre produit par les rayons venant du bord de l'astre, pensant que ces rayons, traversant une plus grande épaisseur d'atmosphère

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIII, p. 274.

solaire, donneraient des raies plus prononcées; mais ils n'ont remarqué aucune différence, ce qui peut tenir à la très-grande épaisseur de cette atmosphère. Nous verrons bientôt (2644) à quelles conséquences merveilleuses l'hypothèse de Brewster, convenablement modifiée, a conduit les physiciens.

2623. RAIES DES SOURCES ARTIFICIELLES. — La lumière des corps *solides* ou *liquides incandescents* donne un *spectre continu*, c'est-à-dire complètement dépourvu de raies. M. Draper a, l'un des premiers, constaté cette loi importante, au moyen de fils de platine portés au rouge par un courant électrique, et L. Foucault, au moyen des cônes de charbon rouge-blanc de l'arc voltaïque. Elle a été ensuite confirmée par Masson, puis par E. Robiquet, qui a opéré sur 9 métaux différents : *fer, argent, or, aluminium, cuivre, sodium, potassium, chrome*¹. Ces métaux étaient volatilisés par un courant, que l'on supprimait ensuite; et l'incandescence des parcelles entraînées subsistait quelques instants pendant lesquels on observait le spectre². M. E. Robiquet a conclu de ses expériences, que les métaux incandescents donnent des spectres sans raies, quand, en se volatilisant, ils ne produisent que des vapeurs transparentes et incolores; mais si les vapeurs sont lourdes, colorées, ou se condensent facilement, elles se comportent comme les gaz colorés et l'on voit apparaître des raies sombres.

Les *flames*; dont la lumière est due à des particules incandescentes de charbon (II, 1289), donnent, comme les corps solides, un spectre sans raies, pourvu qu'elles ne contiennent pas de gaz ou de vapeurs incandescentes, auquel cas elles peuvent produire des raies brillantes, comme nous le verrons (2627).

2624. RAIES DANS LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE. — Fraunhofer a vu des raies *brillantes* dans le spectre de la lumière bleuâtre produite par l'écoulement de l'électricité d'une machine le long d'un fil très-fin. Une de ces raies, située dans le vert, tranchait surtout sur le spectre, qui était peu brillant. Wheatstone a fait de nombreuses expériences sur ce sujet, au moyen des étincelles de la pile, ou des machines ordinaires et d'induction, qui lui ont donné de semblables raies. — Ces raies *brillantes* dépendent de la nature des électrodes et donnent un système particulier pour chaque métal dont celles-ci sont formées. Si elles sont composées d'un alliage, on obtient les systèmes de raies propres à chacun des métaux qui entrent dans cet alliage. Il en est de même quand les deux électrodes sont formées de métaux différents. Nous verrons que les raies brillantes sont dues à des *vapeurs* métalliques incandescentes. Elles sont tellement constantes que Wheatstone en a déduit un moyen de faire l'analyse *qualitative* d'un alliage, sans le dissoudre, et en n'en détachant que des parcelles imperceptibles.

Masson a fait de nombreuses expériences sur les raies du spectre électrique, dans son travail sur la photométrie électrique³. L'étincelle était fournie par un

¹ Il y a exception pour la *terbine* et l'*oxyde de didyme*, qui, portés à une haute température, donnent un spectre strié de raies brillantes.

² *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XLIX, p. 606.

³ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXI, p. 296.

condensateur *c* (fig. 1863), dont on pouvait changer à volonté la surface. L'armature supérieure communiquait avec une machine électrique positive et avec l'une des boules isolées *e*, par le fil *f*; et l'armature et la boule inférieures, avec le sol, par le fil *f'*. Au devant des boules *e*, était placée la fente du collimateur d'un goniomètre de Babinet, au centre duquel était fixé verticalement un prisme en flint de Guinand, ou en sulfure de carbone. Les boules *e* pouvaient être renfermées dans divers vases, dans lesquels on pouvait faire le vide ou introduire des gaz ou des liquides. Voici les principaux résultats trouvés :

1^o Le spectre électrique présente toutes les couleurs du spectre solaire, et est sillonné de raies brillantes, qui semblent blanches quand elles sont très-éclatantes, mais apparaissent avec la couleur de la partie du spectre qu'elles occupent quand la lumière est moins vive, tout en se détachant, par un plus vif éclat, sur le fond général irisé.

2^o La position de ces raies est indépendante de l'intensité de la décharge ;

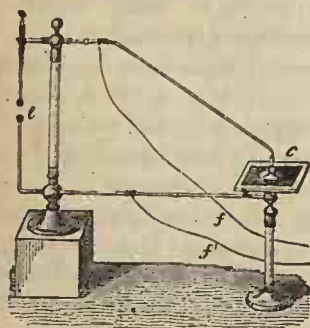


Fig. 1863.

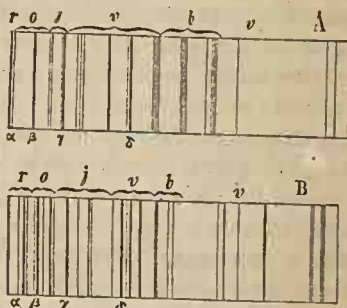


Fig. 1864.

résultat déjà constaté par Despretz sur un arc voltaïque donné par 100 couples, puis par 600, arrangés en série ou par groupes de 10.

3^o Le nombre et l'aspect des raies brillantes dépendent de la matière des électrodes ; mais, quelle que soit cette matière, il y a certaines raies constantes dans un même milieu ; elles sont désignées par les lettres α , β , γ , δ dans la figure 1864, qui représente les systèmes de raies formées dans l'air par des électrodes de charbon, A, et de cadmium, B, dessinées à la chambre claire. D'autres expériences ont été faites sur des électrodes d'antimoine, bismuth, plomb, étain, fer, cuivre.

4^o Dans le vide, les raies et les couleurs s'affaiblissent sans se déplacer ; on ne les distingue plus avec la lunette, il faut les observer à l'œil nu.

5^o Les résultats restent les mêmes, sauf l'intensité, quel que soit le moyen par lequel est engendrée la lumière électrique.

6^o Dans les liquides, la lumière de l'arc voltaïque produit entre deux charbons, ne donne pas de raies ; ce qui semble provenir de l'absence de particules.

transportées. La longueur de l'étincelle n'était que de 3^{mm} environ, excepté dans l'essence de térébenthine, où elle atteignait une longueur de 10^{mm}. Il pourrait se faire qu'avec des décharges plus intenses, il y eût transport de particules et production de raies. Ce qui confirme cette manière de voir, c'est que, Masson ayant employé dans l'alcool des électrodes de laiton, le métal fondu, le liquide se remplit d'une matière noire, probablement de l'oxyde très-divisé, et le spectre présenta aussitôt de belles raies brillantes.

2625. Influence du milieu. — Il résulte des expériences de Masson qu'il existe dans le spectre électrique, des raies brillantes indépendantes des électrodes, et d'autres qui en dépendent. Celles-ci s'observent commodément en formant l'arc voltaïque entre deux charbons verticaux, dont l'inférieur positif et un peu creusé, reçoit le métal à étudier. L. Foucault avait employé ce moyen pour étudier les spectres donnés par les métaux. — M. Angstrom ayant opéré dans divers gaz, a trouvé que les raies indépendantes des électrodes changent avec le milieu dans lequel jaillit la lumière; ce que M. Vander-Willingen a confirmé¹ en opérant sur l'étincelle d'une bouteille de Leyde chargée continuellement par une bobine de Ruhmkorff, et donnant spontanément des décharges très-rapprochées. Les électrodes étaient des fils métalliques de 1^{mm} de diamètre, pénétrant, par des boîtes à cuir, dans un récipient à robinet. Le prisme, en flint, était installé sur un goniomètre de Babinet, au moyen duquel on relevait la position des raies. Pour le chlore, l'appareil était tout en verre.

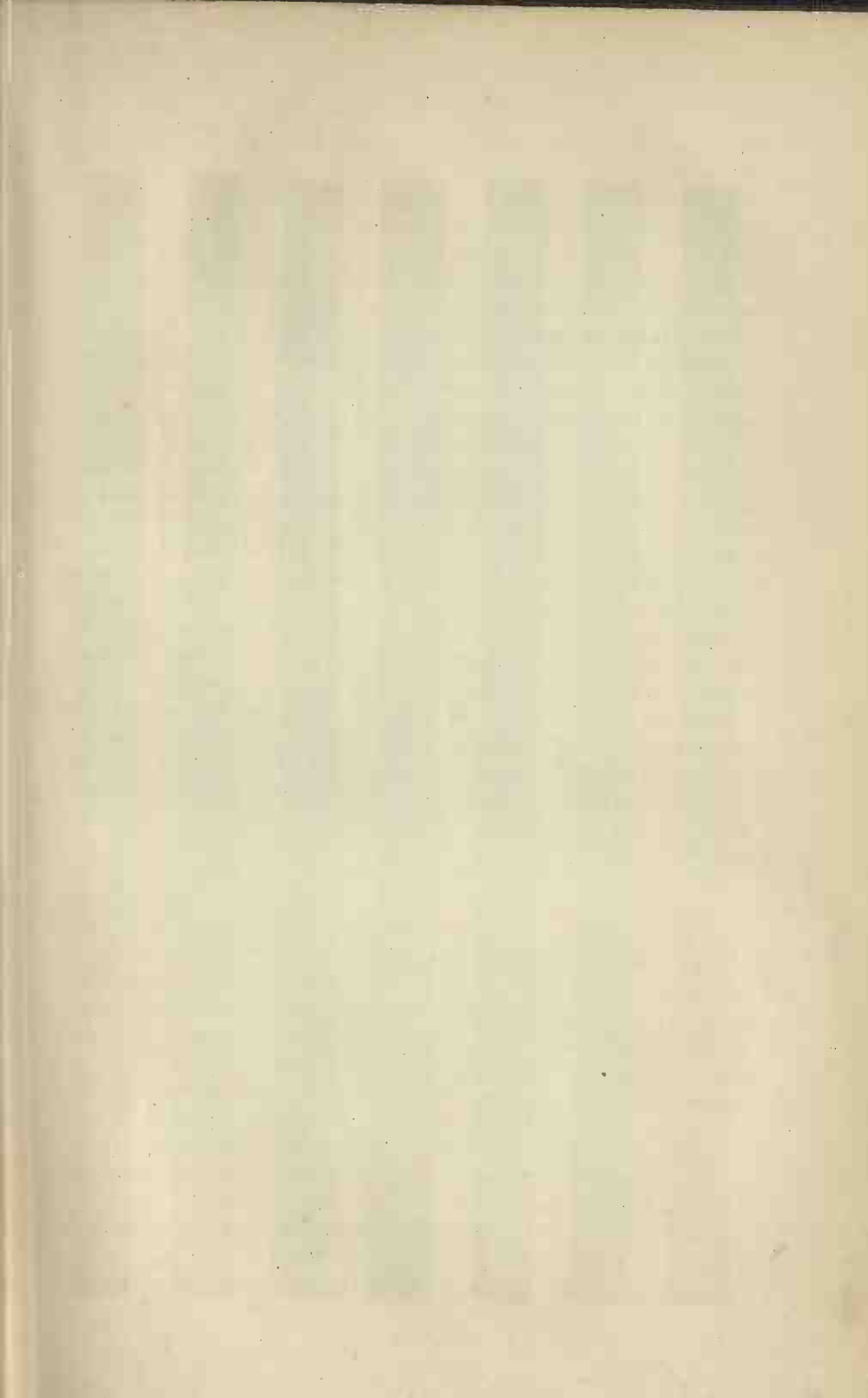
Quand les électrodes sont très-rapprochées, on ne voit bien que les raies caractéristiques du métal; celles qui sont dues à la présence du gaz disparaissent presque entièrement. Si l'on éloigne peu à peu les électrodes, ces dernières raies deviennent de plus en plus brillantes, et les autres s'affaiblissent graduellement. Avec des électrodes de platine, fer, coke, on ne voit, dans l'air, que les raies propres à ce gaz, et tout au plus une ou deux raies des électrodes.

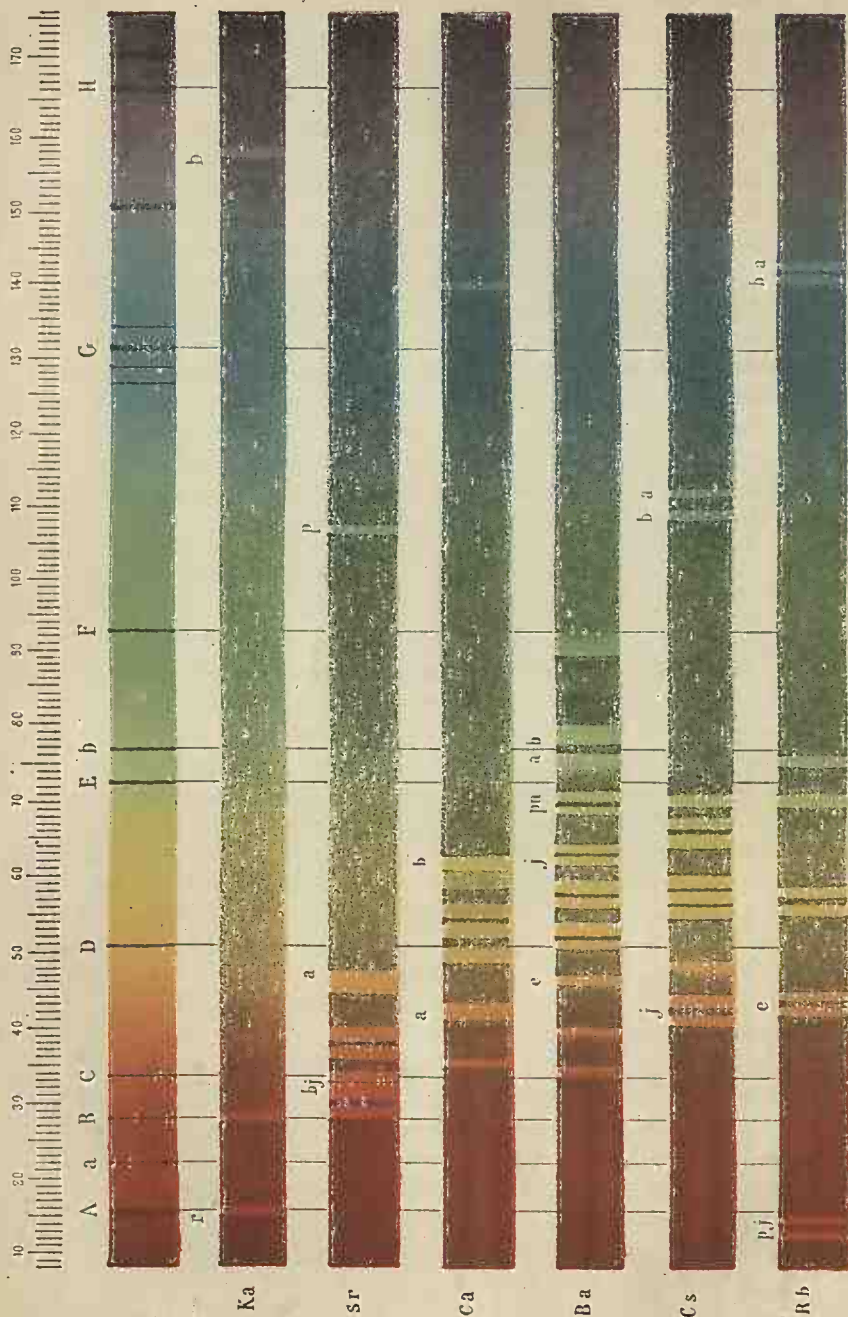
Dans les divers gaz, les raies sont différentes et différemment espacées. Cependant, on remarque dans la plupart des spectres, quelques-unes des raies les plus brillantes de l'air; ce qui semble tenir à la présence de quelques traces de ce gaz; car ces raies communes tendent à disparaître à mesure que les gaz sont plus purs, et se dessinent plus nettement quand on introduit un peu d'air. Il semble aussi résulter de là que la pression du gaz n'a pas d'influence, pourvu que l'électricité passe toujours par étincelles. Le protoxyde et le bioxyde d'azote donnent les mêmes raies que l'air.

Quand les électrodes sont humides, le spectre est comme voilé par un brouillard, et l'on aperçoit, outre les raies propres au gaz, deux des raies brillantes et caractéristiques de l'hydrogène; ce qui provient de la décomposition de l'eau. — Dans la plupart des expériences, on voit la raie D du sodium, que l'on attribue à la présence du sel marin.

Quand la pression est assez faible pour que l'électricité passe sous forme

¹ *Ann. de Pogg.*, t. CVI, 610, et CVII, 473; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e s., t. LVII, 367.





d'airéte, le spectre n'a plus de raies brillantes, mais on y voit des bandes alternativement sombres et lumineuses, à peu près équidistantes, et se fondant les unes dans les autres. L'aspect du spectre est différent suivant qu'on observe l'auréole qui enveloppe le fil négatif, ou le point brillant qui se montre autour du fil positif.

On voit par ce qui précède, que la lumière électrique donne trois spectres superposés. Le premier est *continu*, produit par les parcelles solides arrachées aux électrodes (III, 1720) et forme le fond irisé sur lequel se détachent les deux autres; le deuxième, formé de raies brillantes, est produit, comme nous allons le voir, par le rayonnement des vapeurs incandescentes fournies par les électrodes; et le troisième, formé aussi de raies brillantes, est dû au gaz ambiant rendu incandescent, et se rapporte par conséquent à la même cause que le deuxième.

2626. Des trois espèces de spectres. — Il résulte de ce qui précède qu'il faut distinguer trois sortes de spectres : 1^o le spectre *continu*, donné par les solides lumineux, ou *spectre de première espèce*; 2^o celui de *deuxième espèce*, composé de certains rayons seulement, épars, formant des raies brillantes et qui va nous occuper tout spécialement; 3^o le spectre strié de fines raies, comme celui du soleil, et qui constitue le *spectre de troisième espèce*.

III. Analyse spectrale.

2627. Spectre des vapeurs et gaz incandescents. — Les vapeurs et les gaz incandescents, c'est-à-dire assez chauds pour répandre de la lumière, donnent un spectre *discontinu*, formé de bandes ou raies *brillantes* présentant la couleur du spectre aux points où elles apparaissent. Ces raies, séparées par de larges espaces obscurs, sont les images, de couleur simple, de la fente limitant le faisceau qui donne le spectre. La lumière des gaz ne contient donc que certains rayons colorés; les autres, en grand nombre, manquant. C'est principalement sur les composés métalliques volatilisés dans une flamme très-chaude, mais peu éclairante par elle-même, que ce phénomène a été étudié. Avec les métaux alcalins, les raies sont peu nombreuses et bien détachées. La planche ci-jointe représente les spectres formés par les vapeurs incandescentes de quelques-uns de ces composés, et l'on voit combien les bandes brillantes sont écartées les unes des autres. Le fond légèrement irisé sur lequel elles se détachent provient d'un peu de lumière étrangère qui se mêle à celle que rayonne la vapeur.

2628. Production de la vapeur incandescente. — 1^o On peut, comme le faisait M. Miller, dissoudre la substance dans l'alcool d'une lampe, ou simplement en saupoudrer la mèche. Mais la température de la flamme d'alcool n'étant pas en général assez chaude pour volatiliser et décomposer la substance, on emploie, le plus souvent, la lampe de Bunsen (II, 1297) dont on règle la flamme de manière à ce qu'elle éclaire le moins possible. On cache même la

partie la plus éclairante, au moyen d'une enveloppe de fer, comme on le voit en M (*fig.* 1866), dont le support peut s'élever plus ou moins le long d'un pas de vis qui enveloppe le bec. Un fil de platine qu'on a trempé dans la dissolution de la matière qui doit fournir la vapeur, ou dans cette matière pulvérulente, est introduit dans la flamme. Ce fil est soudé à un petit tube de verre, que l'on engage dans un bras *o* porté par un support N, sur lequel il peut être placé à différentes hauteurs.

2° On a aussi beaucoup employé l'arc voltaïque, comme nous l'avons dit plus haut (2625), ou la lampe Drummond, dont le crayon est creusé d'une cavité dans laquelle on met la matière dont on étudie le spectre. C'est en opérant avec l'une de ces deux sources qu'on projette le spectre à raies brillantes, au moyen de la lanterne à projection (2543), devant la fente de laquelle sont disposés le prisme et sa lentille, comme on le voit (*fig.* 1865).

3° M. Plucker, vers 1857, a imaginé et employé avec M. Hittorf une méthode destinée aux vapeurs et aux gaz qui ne deviennent pas suffisamment incandescents par les méthodes précédentes¹. Il se sert de tubes de Geissler (III, 2260) présentant une partie étroite terminée par deux boules, et dans lesquels il laisse des traces de diverses vapeurs, ou les produit en chauffant quelques parcelles de matière introduites dans le tube avant d'y faire le vide. Le spectre obtenu est formé par la lumière du gaz rendu incandescent par le passage de l'électricité. Pour l'oxygène, le chlore, le bichlorure d'étain, la vapeur d'iode, les électrodes étaient en aluminium.

2629. Raies calorifiques. — D'après le principe de l'identité (2615), la chaleur du spectre des gaz doit se trouver dans les raies brillantes, entre lesquelles les espaces obscurs doivent être relativement *froids*. Ce résultat se constate au moyen d'une pile de Melloni, dont les soudures forment deux séries linéaires parallèles à la fente de la lanterne de projection. Cette pile est tantôt fixée sur une règle mobile autour d'un axe dirigé suivant le prolongement du prisme, disposition imaginée par M. P. Desains; tantôt portée par une règle divisée fixe sur laquelle elle peut glisser en obéissant à une vis micrométrique ou à un pignon denté, de manière à pouvoir être présentée dans les diverses régions du spectre.

La figure 1865 représente l'ensemble d'un appareil combiné par M. J. Duboscq, au moyen duquel on peut montrer, par projection, les mouvements de l'aiguille aimantée du rhéomètre transparent, provoqués par le passage des raies brillantes sur la pile de Melloni. La lanterne de projection, contenant un foyer de lumière Drummond, porte deux ouvertures latérales; l'une munie d'une fente laisse passer le pinceau que disperse le prisme, et qui envoie des rayons calorifiques sur la pile linéaire figurée à droite, quand elle est convenablement dirigée; l'autre ouverture, placée sur le côté antérieur de la lanterne, éclaire par réflexion le rhéomètre transparent de la pile, et en projette l'image, comme il a

¹ *Ann. de Pogg.*, t. CVII, p. 368; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e série, t. LVII, p. 497.

été expliqué plus haut (2544), de manière à montrer les déviations qu'éprouve son aiguille.

2630. Applications aux analyses chimiques. — Une loi très-importante, c'est que, à chaque métal correspond, dans le spectre, un système caractéristique de raies brillantes, quelle que soit la combinaison dans laquelle ce métal puisse être engagé. Dès 1822, J. Herschell¹ en avait fait la remarque sur les flammes colorées par les sels de chaux, de strontiane et de cuivre, et les sels de soude et de potasse. En 1826, Fox Talbot avança que la disposition des raies du spectre d'une flamme colorée pouvait servir à y découvrir les plus faibles traces de certaines substances². Wheatstone, en 1835, était arrivé, comme nous l'avons vu, à un résultat analogue, en se servant de la lumière

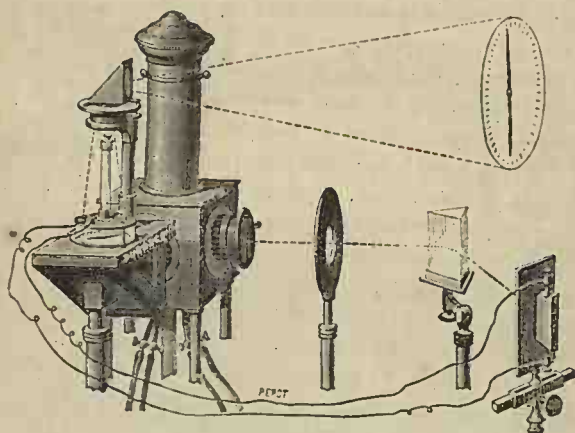


Fig. 1865.

électrique (2624). Avant 1847, M. l'abbé Moigno, après avoir répété les expériences de L. Foucault sur les spectres des corps introduits dans l'arc voltaïque, et les avoir rendues plus saisissantes par la méthode des projections, affirma plus explicitement encore la possibilité de reconnaître par les raies brillantes la nature des éléments d'une vapeur incandescente³.

On voit, d'après ce qui précède, que, dès 1822, on avait reconnu que l'observation du spectre des flammes pouvait y faire reconnaître la présence de traces de diverses substances. Une nouvelle méthode d'analyse qualitative par l'inspection du spectre était donc dès lors créée, méthode merveilleuse, d'une sensibilité exquise, et qui, rapidement développée, a conduit à des résultats admirables,

¹ Transactions philosophiques d'Edimbourg (1822), t. IX, p. 433.

² Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. LXII, p. 18.

³ La Lumière, par J. Tyndall; traduction de M. l'abbé Moigno, préface, p. vii.

non-seulement en ce qui concerne les matières de notre globe, mais encore dans le domaine de l'astronomie, en nous donnant le moyen d'étudier la nature chimique de quelques-uns des éléments qui entrent dans la composition des astres les plus éloignés de nous. La science nouvelle ainsi mise au jour a reçu le nom de *chimie spectrale*, ou *analyse spectrale*. Elle permet de constater en un instant la présence, dans un corps, des moindres traces d'éléments que les procédés ordinaires ne déceleraient qu'après de longues et minutieuses recherches et en opérant sur de grandes masses de matières, tandis qu'ici il suffit de quelques parcelles imperceptibles.

2631. Expériences de MM. Kirchhoff et Bunsen. — La méthode spectrale n'avait pas encore excité toute l'attention qu'elle méritait, lorsque, en 1859, MM. Kirchhoff et Bunsen publièrent un Mémoire remarquable, dans lequel ils firent comprendre l'importance et la merveilleuse fécondité de cette méthode, qu'ils se sont, pour ainsi dire, appropriée par les développements qu'ils lui ont donnés.

Les deux physiciens d'Heidelberg se sont appliqués avant tout à prouver que *la combinaison dans laquelle un métal est engagé, et la nature des flammes et leur température, n'apportent pas de modifications dans les raies brillantes appartenant à chaque métal*¹. Les expériences ont été faites sur les flammes de soufre, sulfure de carbone, alcool, oxyde de carbone, hydrogène, gaz tonnant, la partie non éclairante du gaz d'éclairage, l'étincelle électrique excitée entre des électrodes formées des métaux à étudier. Les raies sont d'autant plus distinctes que la flamme est plus chaude, et la combinaison d'un même métal, plus volatile. Quand plusieurs métaux sont introduits dans une flamme, chacun d'eux produit les raies qui le caractérisent, comme s'il était seul.

MM. Kirchhoff et Bunsen, en partant de cette loi, que nous aurons à discuter (2638), ont confirmé et établi sur une base solide la méthode d'*analyse qualitative* par le spectre, et dans la même année, lui ont donné un grand retentissement par la découverte inattendue de nouveaux métaux, comme nous l'expliquerons plus loin (2637).

2632. SPECTROSCOPES. — Pour appliquer la méthode d'analyse spectrale, on a imaginé des appareils assez nombreux désignés sous le nom de *spectroscopes*. On observa d'abord les raies par la méthode de Fraunhofer (2620). M. Swan, en 1847, imagina d'employer une disposition qui rappelle celle du goniomètre de Babinet (2447) et construisit ainsi le premier spectroscopé². Les rayons lumineux entrant par la fente d'un collimateur étaient rendus parallèles par une lentille, traversaient le prisme et entraient dans une lunette dont la première lentille formait à son foyer principal les images, de différentes couleurs, de la fente. Ces images étaient observées au moyen de l'oculaire faisant fonction de loupe, et, en déplaçant la lunette, on pouvait explorer successivement les diverses régions du spectre pour en étudier les raies. On opérait ainsi dans un

¹ Ann. de Pogg., CX, 161; et Ann. de ch. et de ph., 3^e s., LXII, LXIV et LXXVIII.

² Transactions philosophiques d'Édimbourg, t. XVI.

espace restreint et au moyen d'un instrument portatif et de petites dimensions.

La figure 1866 représente l'ensemble du *spectroscope* le plus ordinairement employé, tel que le construit M. J. Duboseq, et la figure 1867 en donne une projection horizontale sous une plus petite échelle. En P (fig. 1866) est placé le prisme, dans un tambour à trois larges ouvertures. B est le collimateur à lentille, devant la fente L duquel se place la flamme à étudier (2628). A est la lunette, dite *analyseur*, qui reçoit le faisceau dispersé; elle peut tourner autour de l'axe de l'appareil, et recevoir un léger mouvement de bascule dans le plan vertical, au moyen de la vis L. Pour voir nettement les raies, on déplace l'oculaire, pour *mettre au point*, au moyen du bouton *k*¹. — Pour relever la position

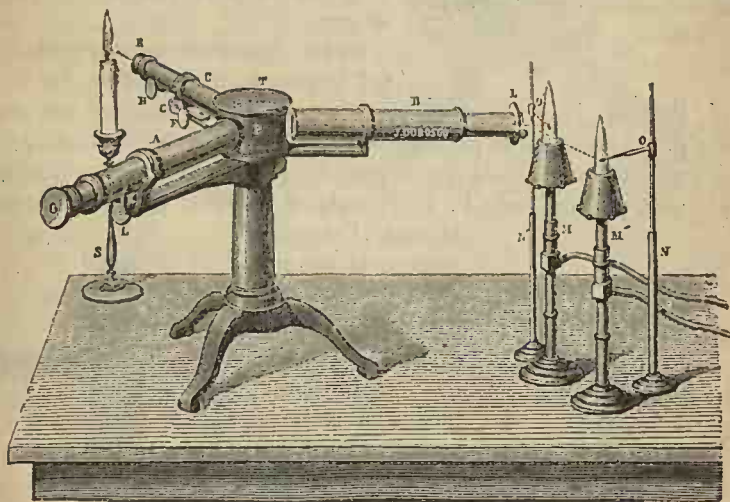


Fig. 1866.

des raies, on emploie un tube C, mobile comme la lunette, et muni en R d'un micromètre horizontal tracé en traits blancs sur un fond translucide et éclairé par une bougie. Les rayons émis par ce micromètre sont rendus parallèles par une lentille, puis réfléchis sur la face d'émergence du prisme, comme on le voit (fig. 1867), où *m* est le micromètre, et *so* le collimateur. Ces rayons réfléchis donnent, dans la lunette L, une image du micromètre, superposée au spectre dont les raies correspondent à certaines de ses divisions. On peut ensuite marquer les positions de ces raies sur une échelle tracée d'avance sur une feuille de papier, et qui est la reproduction de celle du micromètre.

¹ L'oculaire doit être différemment enfoncé pour voir nettement les raies dans les différentes régions du spectre, ce qui rend impossible la *photographie* du spectre en une seule épreuve. Nous verrons plus tard comment on a levé la difficulté.

La fente est représentée à part en F. On peut en modifier la largeur en agissant sur la vis *v*. La partie inférieure est couverte par un petit prisme *p*, au moyen duquel on peut comparer les spectres de deux sources; l'une d'elles est placée latéralement en M' (fig. 1866), et les rayons qui en partent éprouvent la réflexion totale dans le petit prisme, et forment, en traversant le prisme P, un spectre qui se trouve immédiatement au-dessus de celui que forment les rayons qui passent directement par la partie libre de la fente, et qui peuvent être des rayons solaires.

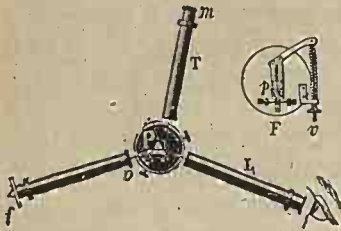


Fig. 1867.

2633. Spectroscopie verticale. —

Cet instrument, très-commode, est dû à M. J. Duboscq. En *f* (fig. 1868 et 1869) est la fente munie de son petit prisme *p*. Les rayons qui en partent sont rejetés verticalement, par la réflexion totale dans un prisme *q*, sont rendus parallèles par la lentille achromatique *O*, et pénètrent dans le prisme *P*, dont l'angle est de 30° et qui est mobile sur

lui-même. Ces rayons rencontrent normalement en *n* la face inférieure, qui est argentée, se réfléchissent, et reviennent sur eux-mêmes après avoir éprouvé la même dispersion que s'ils eussent traversé un prisme de 60° . Le spectre est observé au moyen d'un oculaire *o* à réticule *r*, qui, avec la lentille *O*, forme une lunette grossissant environ

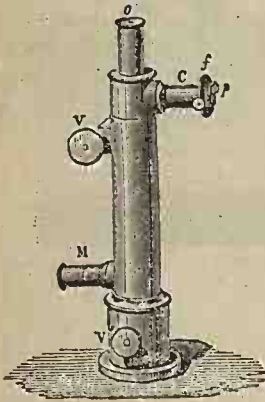
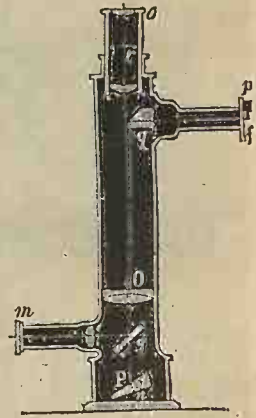


Fig. 1868.

Fig. 1869. — $1/6$.

4 fois. — Le micromètre qui sert à relever les positions des raies, est placé en *m*; il est éclairé extérieurement, et son image, réfléchi par une glace sans tain *g*, se projette sur le spectre.

2634. Spectroscopie à plusieurs prismes. — Dans certaines recherches, on a besoin d'étaler énormément le spectre, pour en distinguer les plus fines raies et même les décomposer en plusieurs autres. M. Kirchhoff a imaginé pour cet objet des spectroscopes à plusieurs prismes. La figure 1870 représente la projection horizontale d'un appareil à 6 prismes muni d'un cercle

gradué, et dont la lunette se déplace au moyen d'une vis de rappel v . Les rayons de la source s traversent le collimateur fo , pénètrent en a dans la série des 6 prismes, sort du dernier, en e , et est reçu dans la lunette L . En m est le micromètre, dont l'image réfléchie sur la surface d'émergence m se projette sur le spectre observé. Les prismes peuvent être un peu déplacés simultanément sur eux-mêmes, au moyen d'un secteur qui agit sur de petits leviers adaptés à leur base, pour leur donner la position du *minimum* de déviation, qui n'est pas la même pour les différentes couleurs.

La figure 1871 représente en perspective un spectroscope à 4 prismes construit par M. J. Duboscq. La lunette et le collimateur sont à peu près parallèles. Mais on évite la gêne occasionnée par la proximité de la flamme, en plaçant celle-ci latéralement et se servant du prisme à réflexion totale appliqué sur la fente. On peut aussi, en déplaçant le collimateur, ne faire usage que d'un, de deux ou de trois prismes.



Fig. 1870.

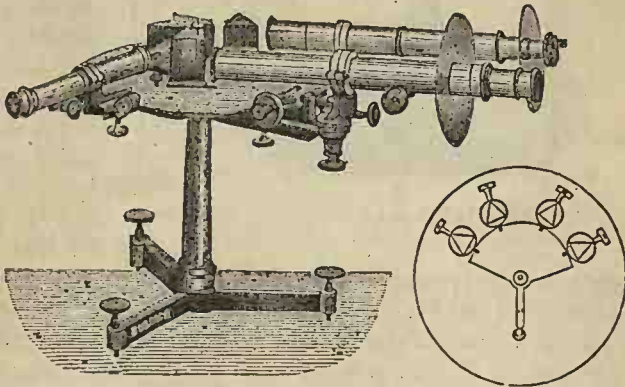


Fig. 1871.

M. Janssen et M. Littrow fils, en faisant réfléchir les rayons sur la face e du dernier prisme, de manière à les faire revenir sur eux-mêmes, obtient une dispersion double. — Au moyen de prismes creux remplis de sulfure de carbone, dont la dispersion est très-forte, on a obtenu des spectres d'une longueur étonnante. M. Rood, avec 6 prismes, on a obtenu un de 3 mètres, permettant de

distinguer une foule innombrable de raies, et dans lequel la raie D se décompose en *neuf* traits extrêmement déliés.

M. Cassiot, au moyen de 11 prismes semblables, a décomposé la même raie D, en 15 autres, dont deux principales bordées en dehors de deux raies très-fines, et embrassant 11 raies assez nettes.

2635. Spectroscopes directs. — On nomme ainsi les spectroscopes avec lesquels on vise dans la direction de l'axe du collimateur. La figure 1872 représente le spectroscope direct de M. Janssen, construit au moyen d'un système

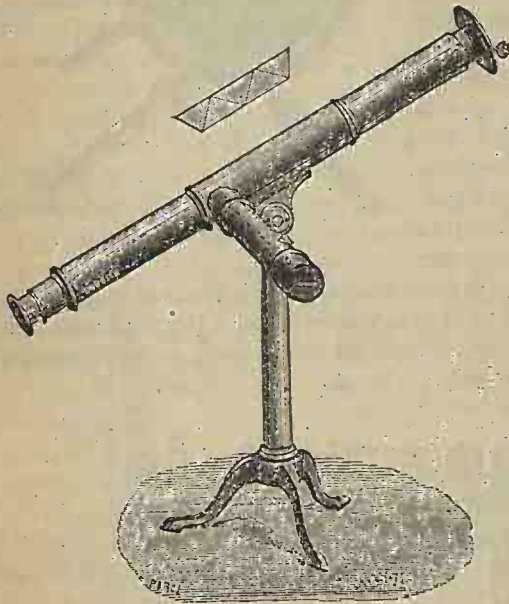


Fig. 1872. — $\frac{1}{6}$.

de prismes imaginé par M. Amici et perfectionné par M. Hoffmann. Cet instrument consiste en une série de prismes, alternativement en flint et en crown, comme on le voit au haut de la figure, et disposés de manière à produire un effet inverse de celui des systèmes achromatiques ; c'est-à-dire supprimant la déviation et conservant la dispersion. Considérons, par exemple, deux de ces prismes. La déviation D_j des rayons moyens devant être nulle, on aura $D_j = (n_j - 1) a + (n_j - 1) a' = 0$ (2608). D'où l'on ti-

rera l'angle a' du second prisme, l'angle a du premier étant donné. Alors l'angle de dispersion, qui est égal à la différence des déviations des rayons extrêmes, ne sera pas nul ; car il serait nul si la déviation moyenne ne l'était pas (2608). Si, au lieu d'un système de deux prismes, on en prend plusieurs, dans chaque système, la déviation moyenne sera nulle et les dispersions augmentant, on pourra obtenir un spectre très-étalé.

Dans la figure 1872, qui représente un modèle de spectroscope à vision directe combiné par M. Duboscq, le système des prismes est placé vers le milieu d'un tube composé de trois parties vissées les unes aux autres. La partie de droite est un collimateur portant sa fente et sa lentille, et la partie de gauche, une lunette analysatrice à réticule pouvant recevoir, au moyen d'une vis latérale qui ne se

voit pas dans la figure, un léger mouvement autour du point d'émergence des rayons sortant des prismes, de manière à permettre d'explorer successivement les diverses régions du spectre. On voit en avant, le micromètre, dont l'image, réfléchi par la face d'émergence du système de prismes, se projette sur le spectre.

M. Hoffmann a imaginé, pour certaines applications industrielles et astronomiques, des spectroscopes à vision directe portatifs, dits *spectroscopes de poche*.

2636. Spectroscope-Thollon. — Le spectroscope direct est d'un usage commode et s'applique facilement à l'observation du spectre des astres. Mais il ne donne pas une dispersion comparable à celle des appareils à plusieurs prismes. D'un autre côté, ceux-ci produisent une déviation énorme, et font perdre aux rayons une partie notable de leur intensité, par absorption et par les réflexions aux faces d'entrée et d'émergence de chacun d'eux. M. Thollon, par une disposition ingénieuse, a obtenu, avec un petit nombre de prismes, un spectroscope à *vision directe* d'une puissance remarquable¹.

Chaque prisme est composé de trois autres, d'après le principe de M. Amici (2635), qui applique sur le prisme principal deux prismes renversés en crown détruisant la déviation, mais en ne conservant qu'une partie de la dispersion. En diminuant l'angle des deux prismes de crown, M. Thollon trouve que la dispersion peut être augmentée considérablement, sans que la déviation, qui reparait, soit trop grande. Ce système de prismes avait déjà été trouvé, de son côté, par M. Rutherford, et aussi par M. Grubb, comme le fait remarquer M. Thollon.

La figure 1873 représente l'ensemble d'un spectroscope-Thollon construit par M. Laurent, dans lequel le prisme principal de chaque groupe est composé d'une cuve remplie de sulfure de carbone et dont deux parois sont formées par des prismes minces de crown, dont les angles sont calculés de manière à donner une énorme dispersion. — Le pinceau lumineux arrivant du collimateur à lentille C, traverse d'abord, vers le haut, le prisme vertical P, puis le demi-prisme Q, dont il sort perpendiculairement à la face d'émergence. Il revient ensuite en sens contraire, après avoir éprouvé une double réflexion totale dans un prisme à arêtes horizontales, R, comme on le voit à part en A, disposition imaginée par M. Young et par M. Grubb. Ce rayon traverse une seconde fois les prismes Q et P, vers le bas, et pénètre dans la partie supérieure d'un système de prismes P', Q', R' disposé symétriquement au système PQR, mais placé plus bas. Le pinceau revient en sens contraire, après avoir éprouvé la double réflexion totale en R', et sort de P' dans une direction sensiblement parallèle à l'axe du collimateur C, pour entrer enfin dans la lunette analysatrice L.

Pour observer les raies des diverses régions du spectre, il faut imprimer aux différents prismes, des mouvements simultanés de manière à faire coïncider avec le fil vertical du réticule, la raie qu'on veut observer, tout en donnant aux rayons qui lui correspondent le *minimum* de déviation dans chaque prisme. Pour obtenir

¹ *Journal de physique*, t. VII, p. 141, et *Nature*, 7^e année (2), p. 223.

ce résultat, les prismes sont fixés sur des plaques métalliques articulées entre elles et avec des leviers n, n qui sont articulés eux-mêmes à une bande, que la vis micrométrique V peut faire glisser dans une coulisse. Les dimensions relatives des pièces sont calculées de manière que le rayon coloré qui tombe sur le fil vertical de la lunette traverse chaque prisme en éprouvant le *minimum* de déviation. Deux ressorts, r, r , agissent sur le système mobile de manière à éviter tout ballonnement. Cette disposition permet de relever les positions des raies, au moyen de tours et fractions de tours que l'on fait faire à la vis pour amener successivement ces raies sous le fil de la lunette. — On peut aussi enregistrer la position de ces raies avec sûreté et rapidité, sur un ruban de papier sans fin appliqué sur la tête de la vis, et tendu en bas par une poulie mobile légèrement chargée. Quand une raie a été amenée à coïncider avec le fil de la lunette, on marque un trait sur le ruban, au moyen d'un style, s , que l'on fait mouvoir en

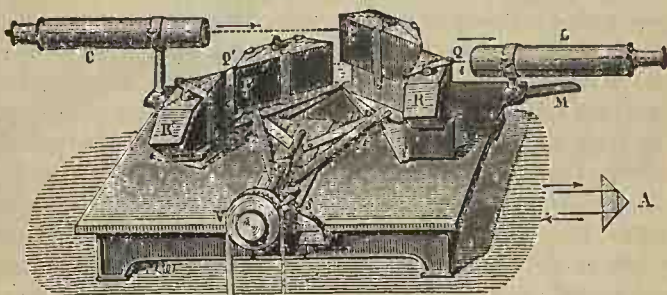


Fig. 1873.

agissant sur la manette M . Par ce moyen, M. Thollon, en profitant du ciel pur de l'Italie, a pu, en trois mois, faire la carte détaillée du spectre solaire, et y relever les positions d'environ 4,000 raies.

Le spectroscopie-Thollon donne des résultats extraordinaires : le spectre entier n'a pas moins de 15 mètres de longueur, et la raie D s'étale au point de soutendre un angle de $12'$, et d'occuper un espace de 15^{mm} . Une foule de raies regardées jusque-là comme simples ont pu être dédoublées au moyen de ce puissant appareil.

2637. Résultats relatifs aux métaux. — MM. Kirchhoff et Bunsen ont d'abord appliqué la méthode spectroscopique aux métaux alcalins et alcalino-terreux, et ont dessiné le système des raies caractéristiques de ces métaux. Ils opéraient au moyen d'une flamme intense, d'un seul prisme, d'un faible grossissement, et d'une fente assez étroite pour laisser distinguer les principales raies du spectre solaire; *sous d'autres conditions, l'aspect des raies pourrait être différent.* Ces raies se désignent par des lettres grecques placées à la suite du

signe chimique du métal considéré; ainsi $\text{Ca}\beta$ indique une des raies caractéristiques du calcium Ca . Pour les métaux usuels on éprouve plus de difficulté, à cause du très-grand nombre de raies brillantes; par exemple le fer en donne 70 principales et 380 moins importantes.

On voit dans la planche ci-jointe les raies caractéristiques de quelques métaux alcalins. AB est le spectre solaire avec ses principales raies, et Ka , Sr , Ca , Ba les spectres du *potassium*, du *strontium*, du *calcium* et du *barium*.

Le *sodium* est caractérisé par une raie jaune, brillante, *coïncidant exactement avec la raie D du spectre solaire*, circonstance dont nous verrons bientôt l'importance (2646). Ce moyen de déceler la présence de ce métal est tellement sensible, qu'il suffit de faire détoner 3 milligrammes de chlorate de soude dans une chambre de 60 mètres cubes, pour que cette raie apparaisse, et cependant il n'y a pas plus de $\frac{1}{20\ 000\ 000}$ de milligramme de sel dans les 50 centimètres cubes d'air qui traversent la lampe de Bunsen pendant 1 seconde. Comme notre globe est recouvert en grande partie d'eau salée, on conçoit que l'air contienne presque toujours quelques parcelles de sel marin; aussi voit-on très-souvent apparaître la raie caractéristique du sodium. Il suffit d'épousseter un livre à côté de l'appareil, pour qu'elle apparaisse; un fil de platine qu'on a fait rougir et qui, plongé dans la flamme, ne produit pas cette raie, la fait apparaître, après un séjour de quelques heures dans l'air.

On voit combien la méthode spectrale est sensible. Aussi a-t-elle conduit à reconnaître l'extrême diffusion de certaines substances dans la nature. Par exemple, l'apparition fréquente des raies caractéristiques du *lithium* et du *strontium* prouve que ces métaux sont universellement répandus, comme le sodium et le potassium, quoique en proportions extrêmement faibles.

La méthode du spectroscope a été illustrée par la découverte de métaux nouveaux, dont l'existence a été signalée par l'apparition de certaines raies brillantes n'appartenant à aucun métal connu. Deux ont été découverts dès l'année 1859, par MM. Kirchhoff et Bunsen. Le *rubidium* Rb (voir la planche), caractérisé par deux belles raies rouges d'où lui vient son nom, a été trouvé dans la lépidolithe de Saxe, et le *cæsium*, Cs (de *cæsus*, bleu), dont le spectre présente une double raie bleue, dans les eaux mères des salines de Durkheim. Ces métaux ont de grandes analogies avec le potassium. M. Lamy, en 1862, a découvert le *thallium*, soupçonné par M. Crookes, métal qui ressemble au plomb par ses propriétés physiques, et est caractérisé par une raie unique qui est verte ($\theta\alpha\lambda\lambda\omega$, *verdir*). Un 4^e métal, l'*indium*, dont le zinc contient habituellement 0,001, a été découvert en 1863, par MM. Reech et Litter; il est caractérisé par une raie *indigo*, d'où vient son nom, et se rapproche du cadmium. Enfin, en 1875, M. Lecoq de Boisbaudran, en examinant le spectre de petites étincelles électriques jaillissant sur quelques gouttes de dissolution de blende, a découvert un nouveau métal, le *gallium*, caractérisé par deux raies violettes, et qui, liquide par surfusion, ressemble au mercure. Tous ces nouveaux métaux ont pu être isolés et obtenus en petites masses, par les procédés purement chimiques.

Il a été fait quelques applications industrielles de la spectroscopie; par exemple, dans la préparation de l'acier par le procédé Bessemer, pour suivre les transformations de la matière dans le *convertisseur*, et, d'après l'apparition successive des raies brillantes dans le spectre de la flamme sortant de l'énorme cornue, juger du moment où il convient de procéder à certaines opérations.

On a fait aussi divers essais pour appliquer le spectroscopie à des analyses *quantitatives*. MM. Champion, Pellet et Grenier sont parvenus à doser les proportions de sodium contenues dans un composé, par une méthode dont voici le principe : On fait varier l'intensité de la raie jaune du sodium, en faisant passer devant la fente du spectroscopie, une bande de verre bleu en forme de prisme à angle très-aigu, jusqu'à ce que cette raie présente le même éclat que celle d'une flamme auxiliaire constante, formée par un bec de Bunsen, et dans laquelle est un petit creuset de platine contenant du carbonate de soude. Les rayons de la flamme auxiliaire sont renvoyés par réflexion dans le collimateur. La matière à analyser est déposée sur un fil de platine tendu horizontalement entre deux montants et qu'un mouvement d'horlogerie à pendule conique fait glisser dans la flamme aplatie d'une lampe de Bunsen; de manière que la lumière émise soit constante pendant tout le temps de l'expérience. Des expériences préalables faites avec des liqueurs *titrées*, permettent de comparer le titre du liquide essayé à celui d'une de ces liqueurs, quand on connaît la position du prisme de verre bleu qui produit l'égalité d'éclat. Avec cet appareil nommé *spectronalromètre*, le sodium est dosé avec une approximative de 3 à 5 centièmes en poids¹.

M. Lockyer emploie le spectroscopie à l'analyse *quantitative* des alliages d'or et d'argent employés à la Monnaie de Londres. L'alliage est placé dans une cavité du charbon inférieur d'un arc voltaïque obtenu au moyen de 30 couples de Grove. La lumière est concentrée par une lentille sur la fente du spectroscopie, et le spectre est projeté sur une surface préparée pour la photographie. Des alliages de *titres* connus, sont photographiés de même, en faisant passer leur lumière par d'autres points de la fente, de manière que les spectres photographiés soient juxtaposés. On compare ainsi facilement leurs raies, et l'alliage a la même composition que celui qui a donné des raies aussi identiques que possible à celles de son propre spectre.

2638. Remarques. — Quoique ne remontant qu'à une vingtaine d'années, la méthode spectrale a déjà donné lieu à une multitude de recherches importantes; mais dont le plus grand nombre est relatif à la chimie, et ne doit pas trouver place ici. La pratique en est assez délicate et exige une certaine habitude, la précision des résultats dépendant d'une foule de conditions, comme la largeur de la fente, l'état chimique des substances, l'intensité de la chaleur et la manière de la produire. Quand on emploie l'électricité, le spectre peut être compliqué de raies étrangères, fournies par des matières mêlées aux électrodes ou par le milieu ambiant et les impuretés qu'il peut contenir. Quand on opère

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXVI, p. 401.

dans les tubes de Plücker, le verre même peut intervenir. Ainsi M. Wülner, en faisant passer dans le tube, des décharges d'une machine de Holtz munie d'un condensateur, a d'abord obtenu le spectre du gaz intérieur raréfié, quand les décharges étaient faibles; mais quand elles allaient en croissant, il voyait se dessiner la raie du sodium, puis les raies du calcium; provenant de traces de soude et de chaux arrachées au verre.

Quand plusieurs composés métalliques sont mélangés, ils donnent ordinairement les systèmes de raies appartenant à chaque métal; de sorte qu'il suffit de quelques traces d'un métal étranger dans la substance essayée, pour que son spectre contienne des raies qui ne lui appartiennent pas. Cependant, il peut arriver qu'un métal en grande proportion dans un mélange, empêche les raies d'un autre métal d'apparaître. Par exemple, Nicklès a vu la raie du thallium disparaître en présence du sodium en excès; M. Heintz, la raie du rubidium s'éteindre en présence d'un grand excès de carbonate de cæsium; A. Mitscherlich, le spectre du potassium s'efface dans des vapeurs de carbonate d'ammoniaque mêlées d'acide chlorhydrique, etc.

La température de la vapeur a aussi une influence dont il faut tenir compte; plus elle est élevée, plus le spectre se complique. C'est ce que MM. Wolff et Diacon ont reconnu dans le spectre du sodium, et M. Mascart et M. A. Miller, dans celui du thallium obtenu au moyen de l'étincelle électrique.

2639. Cartes spectrales. — Pour constater sûrement la présence d'un métal, par l'examen du spectre, il faut connaître d'avance les raies caractéristiques de ce métal. Aussi, MM. Kirchhoff et Bunsen, et plusieurs autres physiciens, se sont-ils appliqués à dessiner les spectres de tous les métaux connus, avec leurs raies. Quand on opère avec la lampe de Bunsen, l'emploi d'un fil de platine trempé dans la dissolution (2628) étant peu commode à cause du peu de durée de la flamme, M. A. Mitscherlich verse la dissolution dans un tube de verre dont la partie inférieure, capillaire et coudée horizontalement, laisse sortir un faisceau de fils de platine fins, à travers lesquels suinte le liquide. En mêlant de l'acétate d'ammoniaque à ce liquide, on empêche les espaces capillaires de s'obstruer par dépôt de sel.

Quand on veut opérer avec l'étincelle électrique, on la fait jaillir à la surface de la dissolution contenue dans un tube vertical fermé, dont le fond est traversé par un fil de platine. Mais, quand l'étincelle est forte, elle se bifurque ou change continuellement de place. MM. Delachanal et Mermet évitent cet inconvénient, au moyen d'un petit appareil (*fig. 1874*) qu'ils nomment *tube fulgurator*. La dissolution est versée par la tubulure *o*, dans le tube *t*, capillaire en *c*, et traversé par une électrode de platine, qui laisse passer le liquide par gouttes rapides dans le réservoir *r*. On fait jaillir les étincelles à travers les gouttes, entre cette électrode et le fil de platine *f* dont on l'écarte plus ou moins. L'excédant de liquide s'écoule dans un second réservoir B, d'où on l'extrait au moyen d'une pipette à poire en caoutchouc *p*, pour le reporter dans le tube *t*.

Les raies tracées sur les cartes spectrales ont été d'abord rapportées aux

divisions du micromètre du spectroscope (2632). Mais, comme les résultats changent avec l'instrument et avec la position des pièces d'un même instrument, il vaut mieux rapporter ces raies à celles d'un spectre solaire juxtaposé à celui que l'on étudie. On a construit, pour faciliter cette comparaison et pour d'autres usages dont nous parlerons (2646), des cartes très-détaillées des raies du spectre solaire. MM. Kirchhoff et Hoffmann en ont dessiné allant de la raie A à la raie G, qui ont été continuées par M. Thalén jusqu'à H. M. Angstrom a publié, à Upsal, un atlas de six cartes in-folio, dont les six bandes réunies représentent un spectre de près de 2 mètres de longueur. Les positions des raies y sont indiquées par les longueurs d'ondulation, λ , qui leur correspondent d'après le système des ondulations, et en s'appuyant sur une relation qui existe entre λ et l'indice de

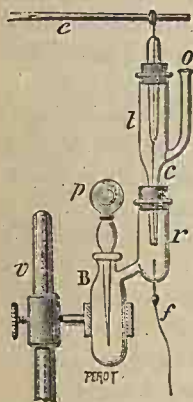


Fig. 1874.

réfraction. L'unité adoptée est de un dix-millionième de millimètre, et une longueur de 1^{mm} sur le spectre contient 10 de ces unités. Le spectre était fourni, non par des prismes, mais par un *réseau*, instrument que nous étudierons plus tard et qui consiste en une petite lame de verre, striée de traits parallèles équidistants et très-serrés¹, et qui donne un spectre par *diffraction*, dit *normal*, parce que la dispersion y est régulière et ne dépend pas de la substance, comme eela a lieu avec les prismes. Les cartes de M. Angstrom vont jusqu'à la raie H, et ont été étendues au-delà par M. Cornu. Nous avons vu comment M. Thollon a pu les réviser et les compléter, au moyen du puissant spectroscope enregistreur que nous avons décrit (2636).

On doit à M. Thalén des cartes détaillées des spectres des métaux, dans lesquelles les raies sont aussi indiquées par leurs longueurs d'ondulation, mode d'indication généralement adopté aujourd'hui.

2640. Spectre des combinaisons. — Quand on veut obtenir le spectre d'un métal engagé dans une combinaison, il est essentiel d'opérer à une température suffisamment élevée pour que le métal soit mis en liberté. S'il n'en était pas ainsi, le spectre serait celui de la combinaison; car celle-ci possède un spectre propre. C'est ce que M. A. Mitscherlich a d'abord montré sur divers chlorures métalliques volatilisés dans une flamme saturée d'acide chlorhydrique², puis M. Diacon, sur de nombreux composés³. Comme les chlorures sont rapidement réduits dans une flamme oxydante, M. Diacon opérait dans la flamme d'un chalumeau alimenté par un mélange de chlore et d'hydrogène, au milieu duquel la substance étudiée ne pouvait recevoir d'oxygène. Les divers chlorures

¹ Les réseaux employés par M. Angstrom avaient 83, 133 et 224 traits par millimètre.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXIX, p. 169.

³ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. VI, p. 5.

essayés ont donné généralement des spectres différents de celui de leur métal, et dans lesquels on distinguait cependant les raies spéciales à ce métal. Les chlorures, iodures, bromures, fluorures du même métal ont fourni des spectres différents. M. Dibbits a trouvé, de son côté, que les gaz composés ont aussi un spectre caractéristique, tout comme les gaz simples. On voit donc que les spectres de métaux publiés par divers physiciens ne sont caractéristiques de ces métaux que dans les conditions où les expériences ont été faites, et particulièrement à la température qu'ils ont employée.

2641. Spectre des métalloïdes. — L'influence de la température et celle de l'état de combinaison sont surtout à considérer dans les recherches sur les raies caractéristiques des métalloïdes. Il faut opérer à de hautes températures pour détruire les combinaisons étudiées, ou celles qui peuvent être mélangées accidentellement à la substance simple. On opère le plus souvent sur des vapeurs, dans les tubes de Plücker, que l'on fait traverser par les décharges d'une bobine d'induction ou d'une machine de Holtz avec ou sans condensateur. Citons d'abord quelques cas de métalloïdes habituellement à l'état solide.

Carbone. — Le spectre de la vapeur de carbone a été l'objet de nombreuses discussions et divers physiciens en ont donné des dessins très-différents; cela tient à ce qu'on l'obtient ordinairement au moyen de combinaisons carbonées, et alors le spectre du carbone est souvent compliqué de celui de la combinaison employée, ou de quelque autre formée accidentellement. M. Lielegg a fait remarquer que le spectre, qui change avec la nature du composé carboné, présente souvent une partie constante qui doit être attribuée à la vapeur de carbone. Ainsi, il a vu, au moyen de décharges d'induction dans un tube de Plücker, du gaz oléfiant très-raréfié donner le spectre constant, plus celui de l'hydrogène; et de l'oxyde de carbone, donner ce même spectre, plus celui de l'oxygène. MM. Angstrom et Thalén ont prouvé qu'il n'y a qu'un spectre du carbone, qu'ils obtiennent en faisant passer de fortes étincelles à travers un composé carboné, principalement l'acide carbonique¹. Ce spectre est formé de lignes brillantes, dont la plus marquée est dans l'indigo, et d'une dizaine d'autres distribuées, de l'indigo au rouge. Suivant les mêmes physiciens, les divers spectres formés de bandes cannelées et ombrées de fines raies noires, qu'on avait attribués à la vapeur de carbone, et qui donnent leur propre spectre. Celui de l'hydrogène carboné apparaît souvent, l'hydrogène étant fourni par de l'humidité qu'il est presque impossible d'écarter complètement. Les spectres brillants observés par Atfield et par Morren seraient ainsi dus à la présence de ce composé. Morren lançait les décharges d'une puissante bobine d'induction, dans un tube de Geissler contenant du cyanogène ou d'autres gaz carburés.

M. G. Salet, qui a retrouvé ce même spectre compliqué, a mesuré la longueur d'ondulation de ses principales raies, et a fait de même pour les spectres de

¹ *Nova acta Reg. soc. Sc. Upsal* (3), t. IX, et *Journ. de phys.*, t. V, p. 125.

divers autres métalloïdes¹; par exemple, pour le *silicium*, qui était traité comme les métaux simples dans l'arc voltaïque.

Soufre. — M. Salet introduit le soufre dans un tube de Geissler spécial, le réduit en vapeur pendant que le vide est fait, et scelle le tube à la lampe. Il supprime les électrodes qui pourraient fournir des corps étrangers, et l'électricité est introduite par des gaines en platine enveloppant les extrémités renflées du tube, qui représente ainsi un système de deux bouteilles de Leyde, dont la vapeur raréfiée remplace l'armature intérieure. Pendant l'expérience, le tube est chauffé pour volatiliser le soufre. M. Salet a obtenu ainsi deux spectres : l'un observé déjà par MM. Plücker et Hirtoff, composé de bandes et qu'on retrouve avec l'hydrogène sulfuré et l'acide sulfureux, l'autre formé de raies isolées. Le premier apparaît quand on emploie une bobine d'induction, et le second, quand on fait passer de fortes décharges d'une machine de Holtz ou d'une bouteille de Leyde. Ce que nous avons dit relativement au spectre du carbone, et ce que nous allons voir pour celui de certains gaz, conduit à soupçonner que le premier spectre du soufre est dû à des combinaisons que les décharges trop faibles ne peuvent détruire complètement.

Phosphore. — MM. Christoffe et Beilstein ayant introduit quelques parcelles de phosphore dans un vase d'où se dégagait de l'hydrogène, et ayant enflammé ce gaz à l'extrémité d'un tube terminé par un bec de platine, ont obtenu une belle flamme verte, qui, examinée au spectroscope, leur a donné trois raies vertes caractéristiques. Le résultat est resté le même quand ils ont remplacé le phosphore par un peu d'acide phosphoreux ou hypo-phosphoreux. Cette réaction est très-sensible, et peut servir à la recherche du phosphore dans les empoisonnements. — M. G. Salet l'a rendue plus sensible encore en opérant dans un tube de Plücker, au moyen de l'étincelle d'induction.

2642. Spectre des gaz. — Les gaz donnent des lignes brillantes, observées d'abord dans l'arc voltaïque (2624). On les étudie le plus souvent dans le tube de Plücker. Leur aspect dépend de la température et de la pression; elles s'élargissent quand celles-ci augmentent; et, comme l'ont constaté MM. Franckland, Lockyer, Cailletet, quand la pression est de plusieurs atmosphères, les raies se joignent et forment un spectre continu. M. G. Salet remarque que l'influence de la pression rentre dans celle de la température; car si la pression augmente, la conductibilité du gaz diminue, de sorte qu'il faut employer des décharges plus fortes et par conséquent dégagant plus de chaleur.

Hydrogène. — Le spectre de l'hydrogène, qui a été découvert par M. Angstrom, se compose de trois raies brillantes, rouge, verte et indigo, occupant la place des raies C, F, et *h* du spectre solaire. Plusieurs physiiciens ont avancé qu'il y avait un second spectre de l'hydrogène formé de bandes, et se montrant quand la température n'est pas trop élevée. Mais MM. Angstrom et Thalén ont montré que ce dernier spectre est dû à de l'acétylène qui se forme aux dépens

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXVIII, p. 5.

de quelques traces de carbone; ce que M. Salet a confirmé, en faisant passer des décharges faibles d'une bobine, à travers un de ses tubes à gaines dans lequel il avait fait préalablement circuler un courant d'oxygène pendant qu'il était chauffé au rouge, pour détruire toute trace de carbone; il n'obtint alors que le spectre de lignes.

Azote. — L'azote donne 11 lignes brillantes principales : 3 orangées, 2 tout près de la raie D de Fraunhofer, 1 jaune, 2 vertes, 1 bleue et 2 indigo. L'azote donne, en outre, un beau spectre cannelé, strié de raies noires très-fines, qu'on avait attribué à des traces de protoxyde d'azote; car, en débarrassant le tube de Plücker de toute trace d'oxygène, au moyen de sodium chauffé, on n'avait plus trouvé qu'un spectre de lignes. Mais nous devons dire que ces résultats ont été contestés, de manière qu'on ne peut pas affirmer que l'azote n'ait pas deux sortes de spectres.

Oxygène. — Le spectre de l'oxygène est un spectre de lignes. Il a été étudié par MM. Huggins, Plücker, Hittorff; M. Angstrom en avait donné les principales raies dans son spectre de l'air. Certaines de ces raies, vues dans un tube de Geissler par plusieurs observateurs, n'ont pas été retrouvées par d'autres, particulièrement par M. Salet, qui a préparé l'oxygène avec un soin scrupuleux; on est donc conduit à regarder ces raies comme dues à des impuretés.

2643. Remarques. — Nous n'avons cité qu'un petit nombre des métalloïdes étudiés par les physiciens. L'oxygène, l'hydrogène et l'azote, gaz qui entrent dans la composition de l'atmosphère plus ou moins humide, étaient surtout à considérer. D'après les observations de M. Kundt et de M. H. Vogel, on distingue quelques-unes de leurs raies brillantes dans le spectre des éclairs vifs. — On pouvait s'attendre à les trouver également dans le spectre de la lumière des aurores boréales. M. Angstrom, en 1868, y a signalé principalement une raie jaune-vert qu'il a aussi trouvée dans la *lumière zodiacale*, mais qui ne lui parut pas correspondre à une de celles des gaz contenus dans l'air. Une dizaine d'autres raies ont été remarquées depuis par divers physiciens, entre autres par M. Vogel, qui a avancé qu'on les retrouve toutes dans les spectres des gaz atmosphériques; ce qui a été contesté, sauf pour deux raies, les autres étant considérées jusqu'à présent comme ayant une origine inconnue.

M. Chautard a constaté que les spectres de diverses vapeurs, observés dans un tube de Plücker placé entre les pièces polaires d'un électro-aimant, changent d'aspect pendant l'aimantation de ce dernier. L'éclat des raies diminue pour le soufre, le sélénium; et augmente pour le chlore, le brome, en même temps que de nouvelles lignes très-fines se dessinent. Ces phénomènes se rapportent évidemment aux actions que le magnétisme intense exerce sur les gaz et les vapeurs (III, 2364).

D'après M. Angstrom et beaucoup d'autres physiciens, les corps simples, solides, liquides ou gazeux, n'ont qu'un seul spectre, qui est un spectre de lignes, quand on opère à une température suffisamment élevée, produite ordinairement par l'électricité. Les spectres de bandes plus ou moins cannelées, qui

se produisent quand la température est moins élevée, seraient dus à des traces de matières composées. En effet, les combinaisons donnent habituellement de semblables spectres, leurs molécules complexes étant plus aptes à engendrer des ondulations de rapidités très-variées. C'est pour cela que les décharges d'une même bobine donnent souvent un spectre de lignes dans la partie étroite du tube de Plücker, où la chaleur est la plus forte, et un spectre de bandes, dans les parties renflées.

Cependant, certains corps simples pouvant présenter plusieurs états allotropiques, s'il en est qui puissent conserver un de ces états à la plus basse température de l'incandescence, ces corps pourront avoir plusieurs spectres, le plus compliqué correspondant à la molécule agglomérée, et le spectre de ligne à l'atome simple, isolé par la plus forte chaleur. M. G. Salet est arrivé à une semblable conclusion, en faisant remarquer, en outre, que la plus basse température d'incandescence peut être obtenue au moyen de décharges électriques, en graduant convenablement l'intensité. Du reste, sur ce sujet des spectres multiples d'un même corps simple, la science n'a pas encore dit son dernier mot.

IV. Renversement du spectre. — Spectroscopie sidérale.

2644. Spectre renversé. — Nous avons expliqué comment certains gaz absorbent divers rayons colorés et peuvent rendre discontinu le spectre d'un solide lumineux (2622). On ne sera donc pas étonné de voir les vapeurs incandescentes absorber aussi certains rayons. Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est qu'elles absorbent précisément les rayons qu'elles émettent, c'est-à-dire ceux qui forment les raies brillantes de leur spectre. C'est l'application aux gaz incandescents, de la loi des *pouvoirs émissifs égaux aux pouvoirs absorbants* (II, 915). Euler exprimait cette loi, dans le langage du système des ondulations, en disant qu'*un corps absorbe la série des oscillations qu'il peut produire lui-même*, de même que, suivant la comparaison de M. Stokes, quand un système d'ondes sonores se présente pour traverser un espace rempli de cordes tendues, les ondes qui correspondent aux vibrations que peuvent rendre certaines de ces cordes, leur cèdent leur force vive et ne passent pas outre; et les ondes qui sont ainsi interceptées sont précisément celles que ces cordes peuvent engendrer.

Pour mettre cette loi en évidence dans le cas de la lumière, on forme le spectre à raies brillantes d'une vapeur incandescente, puis on fait passer à travers cette vapeur les rayons d'une source beaucoup plus intense : rayons solaires, lumière Drummond, fil de platine incandescent, lampe ordinaire. On voit alors des *raies sombres* aux endroits mêmes où étaient les *raies brillantes*, les rayons de la source de même réfrangibilité que les rayons moins intenses de la vapeur, étant absorbés par celle-ci. Si la source était à peine plus brillante que la vapeur, les raies resteraient colorées, mais moins distinctes qu'en l'absence de la source; car elles ne paraissent sombres que parce que la lumière y est moins vive que dans celle-ci.

Les raies brillantes ainsi transformées en raies sombres sont dites *renversées*, et le spectre de la source, sur lequel les raies brillantes de la vapeur sont remplacées par des raies sombres, se nomme le *spectre inverse* ou *renversé* de cette vapeur.

Le renversement de la raie jaune du sodium, observé en 1849 par L. Foucault qui avait remarqué que la vapeur de ce métal absorbe précisément les rayons de l'espèce qu'elle émet, peut se constater facilement. Il suffit d'interposer une flamme d'alcool salé entre une flamme ordinaire et la fente du spectroscope; on voit une raie noire à la place où apparaît la raie jaune du sodium en l'absence de la flamme. M. Coulier opère sur la vapeur même du sodium en remplaçant la lampe à alcool salé par un ballon rempli d'hydrogène, et dans lequel on chauffe un globule de sodium. Dès que la vapeur du métal se produit, on voit apparaître la raie noire. On peut aussi prouver directement l'absorption des rayons par une flamme de l'espèce de celle qui les émet: On place devant une flamme d'alcool salé une autre flamme semblable qui en cache une partie; cette partie paraît sombre, les rayons qui en émanent étant absorbés par la flamme qui est en avant. Il en serait de même des flammes contenant de l'indium, qui sont aussi à peu près monochromatiques.

Dans l'expérience de M. Wülner (2638), quand les décharges sont très-fortes, la raie du sodium est sombre, les vapeurs très-abondantes de ce métal absorbant les rayons émis par la partie incandescente qu'elles enveloppent. Un effet semblable s'observe dans l'arc voltaïque, quand on place un globule de sodium sur le charbon positif; la vapeur épaisse qui enveloppe le noyau central produit le renversement de la raie brillante qui apparaît quand les vapeurs sont rares, fait remarqué d'abord par L. Foucault. Dans cette expérience, d'autres métaux peuvent être substitués au sodium.

2645. Phénomène des coïncidences. — En comparant le spectre des vapeurs incandescentes à celui du soleil, on a remarqué que certaines raies, brillantes du premier et noires du second, occupent exactement la même position et présentent la même structure. Dès 1849, L. Foucault avait remarqué une semblable coïncidence entre la raie jaune du *sodium* et la raie D du spectre solaire. Brewster avait aussi signalé des coïncidences de raies entre ce dernier spectre et ceux de diverses flammes colorées; résultats que M. Angstrom avait confirmés et généralisés¹. Ces coïncidences, bien faites pour étonner, n'avaient pas reçu d'explication, lorsque M. Kirchoff parvint, non-seulement à en rendre compte, mais encore à expliquer l'origine des raies noires du spectre solaire, au moyen d'une théorie remarquable, d'une portée scientifique immense et qui a ouvert des voies nouvelles à l'astronomie. Cette science, après s'être longtemps renfermée dans l'étude des mouvements et des distances des astres, puis avoir

¹ M. Mascart a tiré parti de cette coïncidence pour déterminer l'indice de réfraction de certaines raies peu distinctes du spectre solaire, en opérant sur des raies brillantes occupant les mêmes positions.

appris de Newton le moyen d'en comparer les masses, avait reçu une vive impulsion par l'invention du télescope, au moyen duquel les astronomes peuvent évaluer les volumes de certains corps célestes et acquérir de rares notions sur la constitution physique extérieure de quelques-uns des plus rapprochés. Aujourd'hui, au moyen du spectroscope, les physiciens et les astronomes peuvent s'élever à la connaissance des principales matières qui entrent dans la composition chimique du soleil, des étoiles, des comètes, et même de ces mystérieuses nébuleuses disséminées aux confins des espaces accessibles à nos investigations. Nous allons entrer dans quelques détails sur cette admirable application de la spectroscopie.

2646. Explication des raies noires du spectre solaire. — Nous avons vu (II, 1246) que le soleil est formé à l'extérieur, d'une couche lumineuse, nommée *photosphère*, composée de particules incandescentes produites par précipitation et enveloppées de vapeur non précipitée. Cette vapeur forme une couche relativement mince capable d'absorber les diverses radiations de la photosphère, comme le prouvent la moindre intensité des rayons calorifiques, lumineux et chimiques qui partent des bords du disque, par rapport à ceux qui viennent du milieu (II, 1255). La température de cette couche est assez élevée pour maintenir en vapeur la plupart des métaux, car les 3000° du convertisseur Bessemer (2637) suffisent pour qu'on distingue dans le spectre de la flamme qui s'en échappe, les raies du sodium, du carbone, du calcium, du magnésium...

La photosphère seule donnerait un spectre continu; mais comme les rayons qui en émanent traversent les vapeurs contiguës, certains rayons sont absorbés, et le spectre est strié de raies noires. Les rayons absorbés étant précisément ceux que ces vapeurs incandescentes peuvent émettre, on a ainsi leur *spectre renversé* (2644). Or, M. Kirchoff¹ a reconnu dans ce spectre les raies caractéristiques de divers métaux avec leur position et leur aspect, et il en a conclu que ces substances existent dans les vapeurs de la photosphère. On a trouvé ainsi, par une étude attentive, pour laquelle les cartes spectrales ont principalement été construites (2639), que l'enveloppe du soleil contient les matières suivantes : *hydrogène, sodium, potassium, calcium, baryum, strontium, magnésium, aluminium, fer, cobalt, nickel, manganèse, zinc, plomb, cuivre, titane, cadmium, sérium, uranium,.....*

On a donc fait ainsi l'analyse *qualitative* de l'enveloppe solaire, car on ne peut attribuer au hasard, des coïncidences aussi nombreuses, même pour un seul métal, comme le fer, pour lequel MM. Angstrom et Thalén en ont trouvé jusqu'à 460. De plus, les raies brillantes et obscures qui coïncident dans les deux spectres comparés présentent la même structure et se dédoublent de la même manière dans les appareils puissants. Ajoutons enfin que la présence des vapeurs métalliques dans les couches absorbantes est prouvée par les raies brillantes qu'elles produisent, ainsi que l'a constaté M. Young, lors de l'éclipse

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LVIII, LXII et LXVIII.

totale de 1870 ; il vit dans son spectroscopie, du côté où le soleil allait reparaitre, une multitude de raies brillantes aussitôt effacées par la lumière solaire, reparaissant en donnant ses raies noires ordinaires.

On n'a pas, jusqu'à présent, trouvé dans le spectre solaire les raies caractéristiques du mercure, de l'antimoine, de l'argent, du platine, de l'or ; on peut donc admettre, jusqu'à nouvel ordre, que les vapeurs de ces métaux n'existent pas à la surface du soleil. Parmi ces métaux, se trouvent les moins volatils, or, platine, et il pourrait se faire que leurs vapeurs existent, mais soient trop rares pour produire une absorption sensible. Il est à remarquer aussi que, parmi les métalloïdes, on n'a trouvé, jusqu'à présent, que l'oxygène, récemment découvert par M. Draper, et l'hydrogène, que l'on est porté, il est vrai, à considérer comme un métal gazeux (II, 978).

On trouve donc dans l'enveloppe solaire les éléments de l'eau. L'absence de l'azote, si abondant à la surface de notre globe, est faite pour surprendre ; peut-être ce gaz sera-t-il découvert plus tard, comme l'oxygène, qui est resté si longtemps ignoré.

Le spectre solaire étant un spectre de lignes, on voit que les vapeurs absorbantes sont formées de matières simples, la température étant trop élevée pour que des combinaisons puissent s'y maintenir sans se décomposer.

2647. Téléspectroscope. — Quand on se propose d'étudier à part les différentes régions de la surface du soleil ou de l'atmosphère qui l'enveloppe, on ne peut plus procéder en recevant simplement un faisceau de rayons sur la fente du spectroscopie ; il faut pouvoir isoler des autres les rayons émis par la région à étudier. C'est ce que l'on fait en projetant sur le plan de la fente du spectroscopie, l'image réelle du soleil formée par une lentille convergente à long foyer. On emploie ordinairement l'objectif achromatique d'un équatorial, lunette montée sur un pied *parallactique* et menée par un mouvement d'horlogerie, de manière à suivre l'astre dans son mouvement apparent autour de l'axe du monde. La figure 1875 représente l'appareil spectroscopique employé par le P. Secchi dans ses études sur le soleil. En O, est l'extrémité du tube porte-oculaire d'un équatorial, dont l'objectif a 25^{cm} de diamètre. Dans ce tube s'en enfonce un autre *tt* qui porte tout le système spectroscopique *tPQL*. Ce système peut tourner autour de l'axe du tube O, quand on agit, au moyen du bouton *b*, sur une roue dentée renfermée en *RR'*. La fente, sur laquelle l'objectif de l'équatorial projette l'image solaire, est en *fe* ; on fait varier sa largeur au moyen du bouton *f*, et

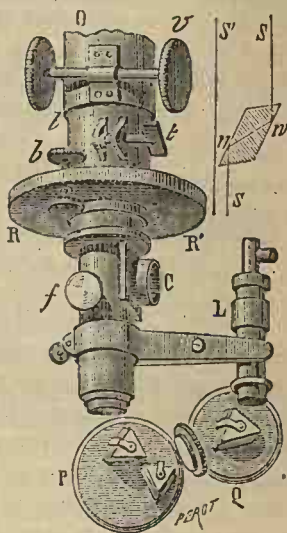


Fig. 1875.

On vérifie la netteté de l'image projetée, par une ouverture latérale *c*. En P et Q, sont des plateaux qui soutiennent les prismes, dont le mécanisme de réglage n'est pas représenté sur la figure. Enfin, L est la lunette à réticule, dans laquelle on peut introduire des prismes à vision directe d'Amici (2635), pour augmenter encore la dispersion. Un prisme à réflexion totale renvoie latéralement les rayons, pour la commodité des observations.

Pour comparer deux points éloignés, de la surface du soleil, on tourne la roue RR' de manière que les images de ces deux points se projettent sur la fente, et l'on obtient deux spectres parallèles. Pour les comparer facilement, M. Hastings les juxtapose en rapprochant les rayons *ss* (fig. 1875) partant d'un des points, de ceux *s'*, qui partent de l'autre, les premiers subissant une double réflexion totale dans un parallélépipède de verre, comme on le voit à part en *sn'ns*. — Quand on veut observer des régions peu étendues, comme des taches solaires, on amplifie l'image formée par l'objectif, au moyen d'une seconde lentille convergente achromatique, placée à une distance de cette image moindre que le double de sa longueur focale; et c'est l'image agrandie que l'on projette sur le plan de la fente.



Fig. 1876.

2648. Résultats. — Au moyen de cet appareil, le P. Secchi a fait de très-nombreuses observations¹, dont les résultats ont été confirmés par MM. Lockyer, Young et Donati. — On a reconnu d'abord que les rayons émanant du bord du disque solaire donnent des raies plus marquées que ceux qui viennent de points plus rapprochés du centre; de plus, ces raies sont un peu diffuses, ce qui montre que les rayons traversent une plus grande épaisseur de la couche absorbante, et rectifie certains résultats négatifs obtenus antérieurement (2622). Ces particularités ne se manifestant que tout près du bord; on en doit conclure que la couche absorbante est comparativement très-mince. Ce qui résulte aussi de l'observation de M. Young sur les raies brillantes de cette couche, ces raies ne s'étant montrées qu'un instant avant le dégagement du bord du soleil (2646). On évalue à 2'' ou 3'' l'angle soutendu par l'épaisseur de la couche absorbante, ce qui correspond à 2,000 kilomètres environ.

Taches. — Quand on projette l'image d'une tache sur la fente du spectroscopie, on voit le spectre traversé longitudinalement par une bande sombre (fig. 1876), correspondant à la tache, et traversée par des raies noires qui sont sur le prolongement de celles du spectre normal. Certaines de ces raies, *a*, *c*, vont en s'épaississant d'un bord à l'autre de la pénombre, ce qui montre que les vapeurs sont de plus en plus abondantes à mesure qu'on se rapproche du noyau obscur. Les bords de ces raies renflées restent nets, sauf pour la raie D du sodium qui devient diffuse, ce qui indique que la vapeur de ce métal est très-comprimée (2642). D'autres raies disparaissent sur la bande sombre; et enfin on y distingue, parfois, des raies brillantes, principalement celles de

¹ *Le Soleil*, par le P. A. Secchi (1875), t. I.

l'hydrogène; ce qui indique que les vapeurs incandescentes qui s'échappent de l'immense gouffre qui forme la tache sont plus brillantes que le fond sombre de celle-ci. De semblables raies brillantes se voient souvent aussi sur les facules qui se montrent auprès des taches, facules sur lesquelles on voit aussi les raies noires de l'hydrogène paraître faibles, disparaître ou même devenir brillantes.

2649. Protubérances. — Les protubérances roses qui se remarquent à l'aide du télescope au-dessus de la *chromosphère* pendant les éclipses totales, n'ont été étudiées qu'à partir de l'éclipse de 1842. On en avait cependant signalé dès 1239, car elles peuvent atteindre des hauteurs de plusieurs minutes et être visibles à l'œil nu. M. Rayet, M. le capitaine Herschell, M. Janssen, lors de l'éclipse de 1868, ont reconnu, au moyen du spectroscope, qu'elles sont formées presque entièrement de gaz hydrogène, dont elles présentent la couleur telle qu'on l'observe dans les tubes de Geissler. Indépendamment des quatre raies brillantes de ce gaz, on distingue aussi assez souvent la principale raie du magnésium, et une raie brillante jaune, placée près de la raie D, signalée par M. Lockyer, et répondant à une substance inconnue à laquelle on a donné provisoirement le nom d'*hélium* (η λιζς, soleil). La *chromosphère* présente la même composition, et l'immense *couronne* ou auréole, traversée par des aigrettes irrégulières, changeantes, dont la longueur dépasse souvent le diamètre du soleil, est aussi composée principalement d'hydrogène. La lumière qu'elle rayonne, et qui s'observe pendant les éclipses totales, lui appartient en propre; cependant une partie provient de la photosphère par réflexion, car cette lumière est en partie *polarisée*, et M. Janssen y a distingué quelques raies sombres du spectre solaire, notamment la raie D. Ajoutons que la photographie ne reproduit que les parties les plus basses de la couronne, sur lesquelles les protubérances ressortent avec une grande netteté.



Fig. 1877.

Les résultats obtenus pendant l'éclipse de 1868 étaient incomplets, et il semblait qu'il fallut, pour les compléter, attendre l'éclipse suivante, lorsque M. Janssen, frappé de l'éclat des raies protubérantielles qu'il avait observées, pensa qu'il pourrait les distinguer en l'absence d'éclipse; ce qu'il réalisa aussitôt. Cette découverte capitale, qui illustra l'éclipse de 1878 et la ville de Guntoor (Inde) où observait M. Janssen, était faite en même temps par M. Lockyer, à Londres.

Depuis cette époque, les astronomes et les physiciens peuvent étudier les protubérances d'une manière suivie. Voici comment on procède : On fait tomber l'image du soleil S (fig. 1877) sur la moitié de la fente du spectroscope, de manière que celle-ci soit perpendiculaire au bord du disque. On aperçoit alors un spectre brillant avec ses raies noires, ss' , et à côté, un autre spectre très-faible III formé par la lumière réfléchie dans notre atmosphère. S'il y a une

protubérance sous la fente *Sf*, ce second spectre présente les raies brillantes de l'hydrogène, C, *d*, F, avec une longueur proportionnée à la hauteur qu'a l'image de la protubérance sur la fente; la lumière émise par ce gaz étant tout entière concentrée dans quelques raies, tandis que celle qui vient de l'atmosphère, distribuée dans toute l'étendue du spectre *HH'*, est assez affaiblie pour ne pas éclipser ces raies. On s'attache à la plus brillante, C, et l'on déplace la fente parallèlement à elle-même, de manière à obtenir successivement la raie C en différents points de la protubérance, dont on obtient ainsi des *ordonnées*, que l'on peut reporter sur un plan, comme on le voit en *p* (*fig. 1878*), pour tracer ensuite le contour de cette protubérance. — Au lieu de mettre la fente perpendiculaire au contour de l'image du soleil, on peut la placer tangentiellement, et, en l'éloignant à différentes distances, obtenir des raies brillantes coupant parallèlement la protubérance, *h* (*fig. 1878*). M. Rayet¹ préfère cette dernière méthode, les raies perpendiculaires étant effilées, ce qui empêche d'en saisir facilement l'extrémité.



Fig. 1878.

Cette méthode est longue et pénible. MM. Huggins, Zollner et A. Herschell ont imaginé, chacun de leur côté, d'opérer avec une fente assez large (de $\frac{1}{2}$ à 1^{mm}), de manière que les rayons *simples* correspondant à une raie brillante, et partant de l'image réelle de la protubérance *projetée* sur cette fente, forme, dans la lunette analysatrice, une nouvelle image brillante de

celle-ci, avec son contour à peine déformé si les prismes sont tous dans la position du *minimum* de déviation (2573).

Depuis qu'on sait observer chaque jour les protubérances, elles sont l'objet d'études assidues. On a construit des observatoires spéciaux destinés à en suivre les manifestations, et une société, dite *spectroscopique italienne*, a été fondée, dont l'objet est d'explorer chaque jour le contour du soleil.

On a reconnu d'abord que les protubérances naissent et disparaissent très-irrégulièrement et que leur nombre est très-variable, ainsi que leur hauteur, qui peut atteindre $\frac{1}{15}$ du rayon solaire. Elles affectent la forme de flammes, de tourbillons, de panaches gigantesques, dans lesquels on distingue des stries longitudinales plus ou moins contournées, et se terminant souvent en nuages arrondis, ce qui atteste une résistance opposée à leur essort. On s'accorde, en général, à les regarder comme le résultat de violentes éruptions gazeuses venant d'une certaine profondeur, et refoulant la photosphère de manière à produire un immense vide. La vapeur absorbante qui remplit ce vide forme une *tache*. On a constaté, en effet, que les protubérances sont en relation de position avec les taches, une protubérance apparaissant presque toujours quand une forte tache arrive tout au bord du disque solaire.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXIV, p. 5.

Les jets gazeux éprouvent des fluctuations continuelles, et leurs formes peuvent changer notablement en quelques minutes. Par exemple, une protubérance présentant la forme P (fig. 1879) a pris au bout de 15 minutes la forme C, sous les yeux du P. Secchi, qui a fait, sous le beau ciel de Rome, des observations multipliées sur le soleil, et a publié un grand nombre de dessins de protubérances¹.

2650. Spectre des étoiles. — Fraunhofer avait observé les raies spectrales de quelques étoiles (2619); mais, avant l'invention des spectroscopes perfectionnés, ces sortes d'observations étaient tellement pénibles qu'on y avait à peu près renoncé. Elles furent reprises, vers 1860, par M. Donati, puis poursuivies avec persévérance par MM. Huggins, Miller, Rutherford, Vogel, d'Arrest, Secchi... Pour observer le spectre des étoiles, on concentre le peu de lumière qu'elles donnent, au foyer de l'objectif d'un équatorial (2647); et, comme le spectre serait tellement étroit qu'on n'y pourrait rien distinguer, on dispose après le foyer brillant, et parallèlement aux arêtes des prismes, une lentille cylindrique convergente qui donne une image réelle de ce foyer, en forme de trait brillant. Cette image, qui remplace la fente, est placée au foyer principal de la lentille du collimateur. La lunette analysatrice ne doit pas être forte, pour ne pas trop affaiblir la lumière; et même il peut y avoir avantage à la supprimer et à regarder à l'œil nu.



Fig. 1879.

En comparant les spectres stellaires, dans lesquels on peut distinguer souvent plus de 80 raies, à ceux des métaux, on a reconnu, dans une foule d'étoiles, la présence d'éléments terrestres et le plus souvent de l'hydrogène, du sodium, du magnésium, si abondants dans les eaux des océans de notre globe. — Le P. Secchi, qui a fait une revue générale des étoiles, les a rapportées, d'après leur spectre, à 4 types principaux :

1° Les étoiles blanches ou un peu azurées, comme *Véga*, *Sirius*, *Castor*,..... donnent un spectre où le bleu et le violet dominant, et présentant des raies noires, épaisses, diffuses et peu nombreuses. Parmi les principales raies, on remarque les 4 raies renversées de l'hydrogène. Les étoiles de ce type sont les plus nombreuses; l'épaisseur des raies semble indiquer une très-haute température et une très-forte pression (2642). Ce sont des astres qui semblent être arrivés à un état de refroidissement moins avancé que le soleil.

2° Le type solaire, qui appartient aux étoiles jaunes (*Chèvre*, *Arcturus*, *α de la Grande-Ourse*,.....). Leur spectre est strié de nombreuses raies fines, comme le spectre solaire, et beaucoup des raies les plus importantes (plus de 30 pour *Arcturus*) coïncident avec celles du spectre du soleil, indiquant que ces étoiles sont dans une phase de refroidissement semblable.

¹ Voyez le *Soleil*, par le P. A. Secchi, t. II.

3° Dans le troisième type, comprenant les étoiles orangées et rouges (*Antarès*, α d'*Orion*, β de *Pégase*,.....), on distingue les mêmes principales raies que dans le type précédent, mais il y a de plus environ 9 bandes nébuleuses, ou colonnes, rappelant des cannelures, dont le côté le plus lumineux est tourné vers l'extrémité rouge du spectre. Les raies principales qui séparent ces bandes sont aux mêmes places pour toutes les étoiles de ce type, et l'on y trouve celles du magnésium, du sodium, du fer et de l'hydrogène. Le spectre de bandes semble indiquer une décomposition incomplète des vapeurs (2643) et l'existence d'une vaste atmosphère absorbante.

4° Le quatrième type, le moins nombreux jusqu'à présent, comprend de petites étoiles rouge-sang, dont le spectre présente aussi des bandes sombres mais avec de larges interruptions; celles qui subsistent tournent leur côté le plus lumineux vers l'extrémité violette. Le P. Secchi attribue les interruptions à des vapeurs de carbone.

Après ces 4 types, entre lesquels s'intercalent les spectres d'une foule d'étoiles, qui s'en rapprochent plus ou moins et font le passage des uns aux autres, on a remarqué, comme exception, le spectre de *Cassiopeé*, qui présente les raies de l'hydrogène *non renversées*, c'est-à-dire *brillantes*. MM. Wolf et Rayet ont trouvé, dans le Cygne, 3 petites étoiles donnant aussi des raies brillantes.

Un fait très-important, signalé par le P. Secchi, c'est que les divers types dominent séparément dans certaines régions du ciel, ce qui semble provenir d'une distribution première de la matière dans l'espace. Par exemple, le type solaire abonde dans la Baleine, Céphée, le Dragon; le premier type dans la Lyre, la Grande-Ourse, le Taureau, les Pléiades, Orion. Mais, dans les spectres des étoiles de cette dernière constellation (sauf α), le vert domine, le rouge et le jaune existent à peine, et les raies sont d'une finesse extrême. M. Huggins a reconnu, en outre, par une méthode que nous expliquerons bientôt (2653) que, dans certains groupes, toutes les étoiles d'un même type se déplacent dans le même sens; ainsi, dans la Grande-Ourse, toutes celles du premier type se meuvent dans un sens, et l'étoile α , qui appartient au second type, marche en sens opposé.

Les *étoiles variables* à période régulière, comme *Algol*, dont la période est de 44^h 48^m, donnent constamment le même spectre, ce qui est d'accord avec l'hypothèse d'un corps opaque les éclipsant périodiquement; et, en effet, pour *Algol*, le passage de la deuxième à la quatrième grandeur ou *vice versa* se fait en 3^h $\frac{1}{2}$, et l'éclat reste constant pendant les 13^h qui séparent ces passages. *Mira* ou \circ de la Baleine, à période irrégulière d'environ 334 jours, donne un spectre du troisième type, mais qui se modifie notablement pendant la période; ce qui semble indiquer que les variations d'éclat sont produites par des crises violentes, qui se reproduisent à peu près périodiquement.

Les *étoiles temporaires* sont celles qui, habituellement très-faibles, ou même invisibles, brillent subitement d'un grand éclat pendant quelque temps, pour s'éteindre ensuite. Ce sont des astres dans lesquels se produisent de violentes

convulsions, dont la lumière nous apporte le témoignage, après un nombre d'années qui dépend de la distance de l'astre. Parmi les plus célèbres de ces étoiles, on cite celle qui apparut du temps d'Hipparque, 125 ans avant notre ère, et l'étoile que Tycho-Brahé observa en 1572, et qui présenta l'éclat de Vénus, devint ensuite jaune, puis rouge, et disparut après avoir brillé pendant près d'un an et demi. A cette époque, on ne connaissait ni le télescope, ni le spectroscopie. En mai 1866, ce dernier instrument a été appliqué par MM. Huggins et Miller à une étoile à peine visible qui répandit une vive lumière pendant quelques jours, dans la Couronne boréale. Le spectre observé était formé de deux autres superposés; l'un analogue à celui du soleil, l'autre composé d'un petit nombre de raies brillantes, indiquant une atmosphère incandescente dans laquelle dominait l'hydrogène.

2651. Nébuleuses. — Le spectre des nébuleuses, leurs diffuses dont la plupart ne sont visibles qu'au télescope, s'observe par les mêmes moyens que celui des différents points de la surface solaire (2647). Beaucoup de nébuleuses présentent un spectre à raies noires; ce sont celles qui sont *résolubles*, c'est-à-dire dans lesquelles le télescope fait distinguer une multitude de petites étoiles. Quant aux nébuleuses *non résolubles*, M. Huggins a reconnu que le plus grand nombre donne un spectre formé de 4 raies brillantes dont une, la moins réfrangible et la plus vive, existe toujours et paraît coïncider avec la raie principale de l'azote. Deux autres raies appartiennent à l'hydrogène. Ce n'est donc pas à cause de l'impuissance des télescopes qu'on n'a pas pu résoudre en points brillants ces sortes de nébuleuses. La grande nébuleuse d'Orion présente en tous ses points les raies de l'hydrogène, surtout la raie verte, ce qui explique la teinte de cette nébuleuse, qui, chose remarquable, se trouve dans une constellation dont les étoiles donnent un spectre où le vert domine (2650).

2652. Planètes; comètes. — Le spectre des *planètes*, comme l'avait reconnu Fraunhofer, donne les principales raies du spectre du soleil, auquel elles empruntent leur lumière; mais on y a distingué depuis des raies d'absorption dues à l'atmosphère qui les enveloppe. M. Vogel, entre autres, a reconnu que les atmosphères de *Jupiter, Saturne, Mars, Vénus, Mercure*, contiennent les éléments de l'atmosphère terrestre, car plusieurs de leurs raies coïncident avec les raies telluriques. — La lune ne donne que les raies solaires, ce qui confirme l'absence d'atmosphère autour de ce satellite.

Certaines *comètes* ont donné un spectre réduit à trois bandes lumineuses : bleue, verte, orange, allant en diminuant d'éclat du côté le plus réfrangible. M. Huggins, en comparant ce spectre à celui du carbone observé dans le gaz oléfiant, a reconnu que le noyau de ces comètes est principalement composé de vapeur de carbone. La chevelure paraît être formée de particules solides réfléchissant les rayons solaires; car la lumière qui en émane donne un faible spectre continu, et est *polarisée* à la manière de la lumière réfléchie.

Nous avons voulu, dans ce qui précède, donner une idée des problèmes variés, et en apparence inabordables, que la spectroscopie a permis de résoudre

au moins en partie. Cette science à peine née a déjà conduit à des résultats des plus importants pour la cosmologie. Elle a montré qu'un grand nombre des matières répandues à la surface de la terre se retrouvent dans les régions les plus profondes de l'espace, ce qui indique entre tous les corps de l'univers connu, une communauté d'origine dont tous les systèmes cosmogoniques devront nécessairement tenir compte. Nous allons, pour terminer, indiquer une dernière application du spectroscopie et montrer comment il fournit le moyen de reconnaître avec quelle vitesse se rapprochent ou s'éloignent de la terre certains astres tellement éloignés de nous que la simple proposition d'une semblable recherche eût été regardée, il y a quelques années, comme un signe de folie.

2653. Translation des astres évaluée par le spectroscopie. — Nous avons vu (I, 577) comment le déplacement d'un corps sonore vers un observateur fait que le son lui paraît plus-aigu, comme si la longueur d'ondulation diminuait, tandis que le son paraît plus grave, quand le corps s'éloigne. D'après le système des ondulations, un effet semblable doit se produire avec la lumière; si le point lumineux s'approche de l'observateur avec une vitesse suffisante, la longueur d'ondulation est raccourcie, la couleur se rapproche de celle des rayons violets, et, les rayons devenant plus réfrangibles, les raies qui leur correspondent se rapprochent de l'extrémité violette du spectre. Elles s'écartent, au contraire, si le point lumineux s'éloigne.

Pour calculer la vitesse, v , avec laquelle ce point se rapproche, par exemple, de l'observateur, remarquons que, pendant une vibration de durée θ , ce point s'avance de $v\theta$; la longueur d'ondulation λ est donc raccourcie de $v\theta$, et devient $\lambda' = \lambda - v\theta$, ou $\lambda' = \lambda - \frac{v\lambda}{V}$, en remplaçant θ par sa valeur donnée par la relation $\lambda = V\theta$, dans laquelle V est la vitesse de la lumière. On tire de là $v = \frac{V}{\lambda}(\lambda - \lambda')$. — On voit que ce résultat ne dépend pas de la distance de la source lumineuse.

C'est M. Doppler qui a le premier fait remarquer l'influence du mouvement du centre d'ébranlement sur la hauteur du son et sur la couleur des rayons lumineux. M. Buys-Baillet a le premier fait l'expérience sur le son, et M. Fizeau a signalé, comme conséquence relativement à la lumière, le déplacement des raies. M. Huggins a fait les premières tentatives pour saisir un déplacement de raies dans le spectre d'étoiles ou de nébuleuses. Il employait un spectroscopie puissant pouvant mesurer une différence de déviation égale à l'écart des deux principaux traits qui composent la raie D. Sirius seul lui a donné un déplacement sensible, et il a trouvé que cette étoile, que l'astronomie avait déjà classée parmi celles dont le déplacement est le plus rapide (I, 39), s'éloignait de la terre, de 47 kilomètres environ par seconde. La vitesse de la terre dans son orbite est environ 6 fois et demi plus grande.

Pour faire l'expérience, on marque, comme repère, dans un spectroscopie très-sensible, une raie fixe, prise, par exemple, dans le spectre d'un tube de

Plücker, et existant dans celui de l'astre considéré. On vise ensuite cet astre, on voit si la raie considérée coïncide avec le repère, et l'on mesure l'écart, s'il y a lieu.

M. Zollner rend sensible le plus petit écart, au moyen de son *spectroscope à reversion*¹. Les rayons de la source, réunis au foyer linéaire d'une lentille cylindrique horizontale, puis rendus parallèles dans le collimateur, traversent deux prismes horizontaux placés bout à bout et dans une position renversée, de manière à donner deux spectres verticaux dans lesquels les couleurs sont en ordre opposé. Ce double spectre est observé au moyen d'une lunette disposée comme un *héliomètre*, c'est-à-dire dont l'objectif est partagé en deux suivant un diamètre vertical. Si l'on abaisse une des moitiés en la faisant glisser contre l'autre, on voit dans la lunette deux doubles spectres, et l'on peut faire en sorte, en prenant pour source un tube de Plücker, par exemple, que deux raies de même nom coïncident dans deux spectres inverses. On vise ensuite l'étoile, et si elle se meut, ces raies ne coïncident plus, et leur déplacement se faisant en sens inverse, l'écart observé est double de ce qu'il est dans un seul spectre. Pour mesurer l'écart, on rétablit la coïncidence en faisant glisser dans un sens convenable la moitié mobile de l'objectif, d'une quantité donnée par une vis micrométrique; de cette quantité, on déduit l'écart au moyen d'une formule.

L'appareil de M. Zollner a été appliqué, de la manière suivante, par MM. Vogel et O. Lohse à la mesure de la vitesse de rotation du soleil. La coïncidence pour une raie ayant d'abord été établie en visant un point du bord du soleil, on vise le bord opposé. Si les deux points visés sont peu éloignés des pôles de rotation, la coïncidence persiste; mais si ces deux points sont voisins de l'équateur solaire, on observe un écart. En opérant sur une fine raie voisine de F, la vitesse à l'équateur fut trouvée de $2\frac{1}{2}$ à 3 kilomètres par seconde, nombres 3 ou 4 fois plus grands que les erreurs possibles d'observation, mais trop forts, la véritable valeur étant de 2 kilomètres.

D'autres physiciens ont étudié la même question, au moyen d'appareils divers. M. A. Young, entre autres, a trouvé le nombre très-approché $2^k, 28$. Il opérait sur un spectre de *diffraction*, obtenu au moyen d'un *réseau* (2639) qui donne une série de spectres distribués de chaque côté de la fente, et de plus en plus étendus, ainsi que les distances entre les raies. Nous verrons que, si d est la déviation pour une raie, et λ la longueur d'ondulation correspondante, on a, $d = k\lambda$, k étant une constante. Si λ devient λ' , on aura $d' = k\lambda'$; d'où $d - d' = k(\lambda - \lambda')$. M. Young observait, sur le huitième spectre, la distance des deux raies principales qui forment le groupe D, en visant successivement deux points opposés du bord du soleil, pris sur son équateur.

En opérant sur la raie B, il n'y eut aucun changement dans les déviations; c'est que cette raie est *tellurique* (2622).

Les résultats obtenus sur le soleil confirment le principe de la méthode de

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XVIII, p. 475, et t. XXVI, p. 274.

mesure des vitesses sidérales par le spectroscope, et l'on peut compter que cette méthode merveilleuse convenablement appliquée, conduira un jour à des découvertes importantes pour l'astronomie et la cosmologie.

§ 2. — EFFETS CHIMIQUES DES RADIATIONS — PHOTOGRAPHIE

I. Photochimie.

2654. Actions chimiques de la lumière. — Les radiations lumineuses produisent certaines actions chimiques que la chaleur obscure seule ne peut provoquer. Par exemple, la lumière détermine la combinaison du chlore et de l'hydrogène; elle décompose les sels d'argent, d'or, de platine, qui abandonnent une partie de leur métal; elle détermine une action chimique entre le chlore et les divers carbures d'hydrogène, et produit l'oxydation à l'air des huiles grasses, de la résine de gaiac, etc. Tout le monde connaît l'action des rayons solaires sur les matières colorantes d'origine organique, qui, appliquées sur les tissus, les papiers de tenture, pâlissent rapidement au soleil. On blanchit les toiles écruës, la cire, en les exposant au soleil dans des conditions convenables. La lumière est nécessaire aux actions chimiques qui ont leur siège dans le tissu des feuilles des plantes pendant l'acte de leur respiration; à la formation de la matière colorante des feuilles, des fleurs. A l'ombre, les végétaux s'étiolent, se développent mal; les parties que l'on tient dans l'obscurité restent d'un blanc jaunâtre, et sont plus tendres que celles qui croissent au grand jour. Les animaux ont aussi besoin de l'action de la lumière; dans l'obscurité, ils languissent, le visage de l'homme pâlit, tandis qu'il brunit peu à peu par l'exposition fréquente au soleil. Les coquilles, les poissons plats, ne présentent que des couleurs pâles du côté habituellement tourné vers le fond de la mer.

Les effets que la lumière peut produire dans les corps consistent : 1° dans des décompositions chimiques, comme la décomposition des sels, la décoloration des substances végétales; 2° dans des combinaisons, comme celle du chlore, du brome, de l'iode avec l'hydrogène, de la résine de gaiac avec l'oxygène. La lumière produit aussi des effets physiques sans changement de composition chimique, comme des modifications d'arrangement des molécules; nous les étudierons à part.

2655. Activité chimique des divers rayons. — Toutes les sources de lumière n'excitent pas les actions chimiques avec la même énergie; la lumière solaire l'emporte de beaucoup sur toutes les autres. De plus, les divers rayons simples n'ont pas à cet égard la même puissance. Scheele, qui a découvert, vers 1770, l'action de la lumière sur le chlorure d'argent, avait observé l'inégalité d'action des divers rayons du spectre sur cette substance, et reconnu que les plus efficaces sont surtout les rayons violets. Seebeck a constaté de plus que l'action décroît de ces rayons aux rayons rouges. Ritter et Wollaston décou-

vrèrent, en 1801, que le chlorure d'argent est fortement noirci dans l'espace obscur qui s'étend au-delà du violet; ce qui avait conduit à distinguer, dans la partie visible du spectre, des *radiations chimiques*, que l'on a cru d'abord différentes des rayons lumineux.

Bérard ayant rassemblé au foyer d'une lentille, les rayons du spectre compris entre le vert et le rouge, puis ceux qui s'étendent du vert au violet, trouva que le chlorure d'argent placé au foyer éblouissant des premiers, n'avait éprouvé, au bout de deux heures, aucune coloration, tandis qu'il avait noirci en quelques minutes, au foyer très-peu brillant des autres. — Gay-Lussac et Thénard ont vu le mélange de chlore et d'hydrogène détoner sous l'influence des rayons violets et n'éprouver aucune action sous celle des rayons rouges¹. Seebeck ayant introduit le mélange sous des cloches en verre bleu et en verre rouge placées sur l'eau, vit ce liquide remplir la cloche bleue en moins d'une minute, par l'absorption de l'acide chlorhydrique formé, tandis que l'eau ne montait qu'avec une extrême lenteur dans la cloche rouge.

Dans les actions physiologiques sur les végétaux, ce sont les rayons les plus brillants, jaunes, orangés, verts, qui sont les plus efficaces pour développer la *chlorophylle*, qui donne aux feuilles leur couleur verte, et aussi pour leur faire dégager le plus d'oxygène dans l'acte de la respiration. On sait que les plantes s'inclinent généralement vers la lumière; dans ce cas, ce sont les rayons bleus et violets qui sont les plus efficaces.

L'avènement de la photographie, en 1839, a fortement attiré l'attention sur les actions chimiques de la lumière, et a provoqué les recherches de divers physiciens, parmi lesquels MM. J. Herschell, Draper, Moser, Matteucci, Niepce de Saint-Victor, E. Becquerel,.....

2656. Expériences de E. Becquerel². — Dans ces expériences, les actions chimiques des rayons du spectre ont été appréciées, soit par les changements de teinte de certaines substances, soit par les courants électriques engendrés par ces actions. Occupons-nous d'abord du premier moyen.

Le spectre pur et rendu fixe au moyen d'un héliostat, était fourni par un prisme en flint, de 60°, noirci partout où la lumière ne devait pas le traverser. On distinguait un grand nombre de raies, et l'on pouvait faire varier l'éclat de ce spectre en déplaçant la lentille placée près du prisme (2580). Voici les principaux résultats obtenus :

1° Les actions chimiques n'ont pas lieu, pour les diverses substances, dans les mêmes parties du spectre. Ainsi, le chlorure d'argent commence à noircir à l'extrême violet entre les raies H et G, et la coloration s'étend peu à peu presque jusqu'en F, et du côté opposé *bien au-delà du violet visible*. Les autres sels d'argent, iodures, bromures, les plaques daguerriennes, se comportent de la

¹ *Rech. physico-chimiques*, t. II, p. 189, et *Ann. de ch. et de ph.*, 1^{re} s., t. LXXXII, 328.

² *Ann. de ch. et de physique*, 3^e série, t. IX, et *La Lumière*, ses causes et ses effets, par M. E. Becquerel, t. II.

même manière, seulement la coloration ne s'étend pas à la même distance au-delà du violet, et le *maximum* n'occupe pas tout à fait la même position. On voit en A'II' (fig. 1880) les principales raies du spectre solaire, et en Ar, depuis F jusqu'à P le *spectre chimique* formé sur le chlorure d'argent, c'est-à-dire les teintes plus ou moins foncées correspondant aux différents points du spectre lumineux. Pour d'autres substances, le *maximum* ne se montre pas au même endroit; par exemple, le bichromate de potasse, dont l'acide chromique se change en oxyde de chrome, et dont on voit le spectre chimique Ch, se colore de F à I. Un papier enduit d'une dissolution alcoolique de résine de gaïac, Ga, bleuit à partir de H jusqu'en P, et le *maximum* correspond à M. Si l'on emploie le gaïac bleui d'avance par les rayons solaires, GB, on le voit

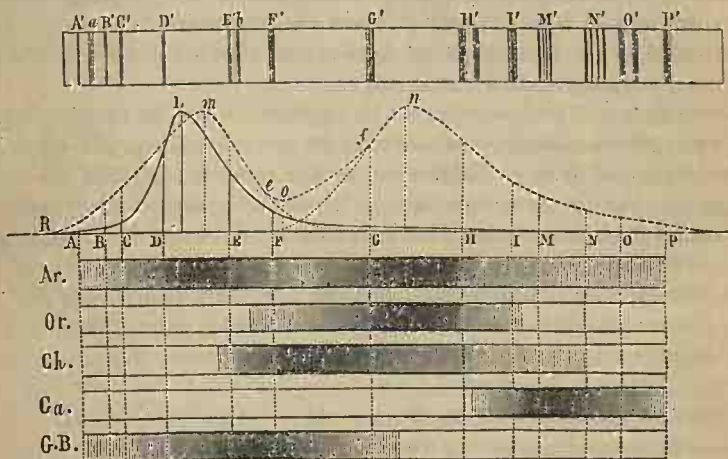


Fig. 1880.

blanchir dans le spectre, de A en H, le *maximum* étant vers la raie F. La lumière agit donc de deux manières sur le gaïac, comme Wollaston l'avait reconnu : les rayons les plus réfringibles le font passer au bleu en l'oxydant, et les moins réfringibles détruisent l'oxydation et le ramènent au blanc jaunâtre. — Sur le chlorure d'or, Or, l'action est très-lente et s'étend de E à I. Mais Seebeck ayant trouvé qu'une fois l'action commencée elle continue d'elle-même dans l'obscurité, on peut, au bout d'une heure d'exposition dans un spectre brillant, enlever le papier et le laisser dans l'obscurité pendant plusieurs jours, au bout desquels l'effet est très-marqué. — Grothius, puis Herschel ont remarqué que les rayons qui décolorent une substance végétale, ont très-souvent une couleur complémentaire de la sienne.

2° Le *spectre chimique* présente des raies, de la même couleur que la substance avant qu'elle n'ait été impressionnée, et occupant précisément la place des raies

de Fraunhofer. On en distingue un grand nombre au-delà du violet, quand l'action chimique s'y étend. On voit en A'P' (fig. 1880) les principales raies du spectre chimique; ce sont celles de Fraunhofer, auxquelles on a ajouté celles qui sont distribuées de H' en P'.

3° Rayons continueurs. — Si du chlorure d'argent préparé dans une obscurité complète, a été exposé un instant à la lumière diffuse avant d'être soumis à l'action des rayons dispersés, on voit l'action se manifester en même temps dans toutes les parties du spectre, même dans le rouge extrême. Les rayons les moins réfrangibles ont donc la propriété de continuer l'action une fois qu'elle est commencée; M. E. Becquerel les nomme *rayons continueurs*, par opposition au nom de *rayons excitateurs* qu'il donne aux rayons capables de commencer l'action. Il résulte de ce qui précède que les rayons *excitateurs* pour une substance ne sont pas toujours les mêmes que pour une autre.

Dans la figure 1880, la partie AF du spectre chimique Ar formé sur le chlorure d'argent, est produite par les rayons continueurs.

2657. Actinomètre électro-chimique.

— Cet appareil, destiné à comparer les effets chimiques des rayons du spectre, par les intensités des courants électriques produits, consiste en une petite cuve rectangulaire, *ab* (fig. 1881), remplie d'eau rendue légèrement conductrice par un peu de sulfate de soude ou d'acide sulfurique ou nitrique, et pouvant glisser sur une table, le long d'une règle divisée. Deux lames *l, l'*, d'argent pur, recouvertes, par le procédé de Daguerre (2664),

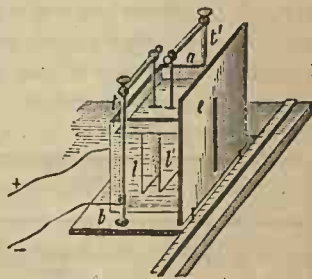


Fig. 1881. — 1/6.

d'une mince pellicule de *chlorure*, de *bromure* ou d'*iodure d'argent*, sont plongées parallèlement l'une à l'autre dans le liquide, et sont soutenues par des colonnes *t, t'* qui les font communiquer avec un rhéomètre de 3000 tours au moins. Les deux plaques sont aussi identiques que possible, de manière que le courant, qui ne manque pas de se produire au moment où on les plonge, cesse bientôt. Le côté sensible d'une des lames est tourné vers une face transparente de la cuve, les autres faces étant opaques. Au-devant de la première est un écran *e* muni d'une fente verticale à largeur variable.

L'appareil ayant été disposé dans l'obscurité la plus complète, on fait tomber sur l'écran un spectre fixe formé par un prisme vertical, et l'on place la cuve de manière que la fente laisse passer les rayons que l'on veut éprouver; rayons dont on constate la couleur en glissant un écran blanc derrière la fente. On enlève ensuite cet écran, et les rayons tombent sur une des lames sensibles. Aussitôt l'aiguille du rhéomètre est déviée, de manière à indiquer que la lame impressionnée prend l'électricité positive; ce qui devait être, puisqu'il se fait une décomposition (III, 1838). On observe l'angle d'impulsion, puis, déplaçant

la cuve, on opère avec d'autres rayons. On sait, au moyen de la règle divisée, quelles sont les raies qui se projettent sur la plaque.

On reconnaît ainsi, en commençant par l'extrémité violette, que le courant, et par conséquent l'action chimique, augmente à partir de P, atteint son *maximum* entre les raies H et G, et devient très-faible à partir de F, comme l'indique la courbe PnF (fig. 1880). Si, après avoir fait passer successivement toutes les parties du spectre par la fente, on fait revenir la cuve en sens inverse, on trouve des déviations prononcées dans la partie AF, avec un *maximum* entre D et E, comme l'indique la courbe emR; tandis que les actions restent les mêmes qu'auparavant dans la partie FP. C'est que les rayons compris entre F et A, tombant sur une surface qui a reçu l'action des rayons excitateurs lors de la première expérience, agissent alors comme rayons continuateurs. Si l'on ramène la fente dans le violet, puis, qu'on la reporte dans les rayons continuateurs, l'action, invariable dans les premiers, est plus vive encore dans les derniers, leur effet étant d'autant plus prononcé que la lame a déjà été plus fortement impressionnée. Le tableau qui suit renferme les principaux résultats obtenus par ce moyen sur les sels d'argent, comparés aux intensités lumineuses évaluées par Fraunhofer au moyen de son photomètre chromatique (2417). Partout, les *maximum* sont pris pour unité.

COULEURS DU SPECTRE	INTENSITÉ LUMINEUSE	RAMES	INTENSITÉ DU COURANT	RAYONS
Extrême rouge.	Insensible.	A	0,05	Rayons continua- teurs.
	0,0320	B	0,20	
Orangé.	0,0940	C	0,32	
	0,6400	D	0,68	
Jaune.	1, maximum : à 0,1 de DE à partir de D.		1, maximum ; à 0,6 de DE à partir de D.	Rayons excita- teurs.
Vert.	0,4800	E	0,75	
Commencement du bleu. .	0,1700	F	0,25	
			0,20, minimum, près de F.	
Indigo.	0,0310	G	0,56.	
Violet extrême.	0,0056	H	1, maximum ; à 0,4 de GH à partir de G.	
»	»		0,72	
»	»	I	0,40	
»	»	M	0,27	
»	»	N	0,17	
»	»	O	0,13	
»	»	P	0,05	

Si l'on représente les intensités électriques par des ordonnées, on obtient la courbe RmonP (fig. 1880), présentant deux *maximum*, en m et n; mais il ne faut pas oublier que la partie Rmo représente des effets qui n'ont lieu qu'après que la surface a été impressionnée d'avance. L'arc ef semble formé par la réunion de deux portions de courbe, eG et fF correspondant, l'une aux rayons

excitateurs agissant seuls, l'autre aux rayons continueurs. La courbe RLI représente les intensités lumineuses.

Ces résultats, ainsi que ceux qui suivent, ont été retrouvés sur une couche de chlorure obtenue par décomposition électro-chimique de l'acide chlorhydrique, et recuite à 150° ou 200°. Cette couche, dont nous indiquerons plus loin les curieuses propriétés (2679), n'est impressionnée que par les parties visibles du spectre; elle est sensible aux rayons de la flamme d'une bougie, et assez épaisse pour que l'action chimique produite en un point par les rayons d'une lampe Carcel, reste constante pendant plusieurs heures. On pouvait donc observer les positions d'équilibre de l'aiguille du rhéomètre, au lieu des arcs d'impulsion. — Il ne faut pas oublier que tous ces résultats ne s'appliquent qu'aux plaques mises en expérience, puisque les actions chimiques changent avec la nature des substances (2656).

2658. Photomètre électrochimique. — M. Egoroff¹ a complété la théorie de l'actinomètre électrochimique en montrant que l'intensité du courant produit est proportionnelle à la largeur de la fente, et varie en raison inverse du carré de la distance de la source lumineuse à l'appareil. Il procédait par comparaison, au moyen d'un appareil composé de deux actinomètres de M. E. Becquerel placés l'un au-dessus de l'autre dans une boîte commune. Les fentes, à largeur variable et placées l'une au-dessus de l'autre, pouvaient se déplacer horizontalement pour opérer sur différents endroits des plaques d'argent iodurées. Les fils partant des deux couples de plaques, s'enroulaient sur un rhéomètre différentiel.

M. Egoroff a conclu de ses expériences qu'il y a proportionnalité entre l'intensité de la lumière et celle du courant produit; de sorte que l'appareil différentiel peut être considéré comme un *photomètre* très-délicat.

2659. Influence, sur les actions chimiques, du pouvoir absorbant des substances sensibles. — M. Draper², après avoir insisté sur les propriétés excitatrices de tous les rayons du spectre, suivant la nature des substances impressionnées, a montré que l'action exercée par un rayon sur une couche donnée dépend du pouvoir absorbant de celle-ci pour ce rayon. Par exemple, les rayons qui déterminent la combinaison du chlore et de l'hydrogène sont ceux que le chlore absorbe; car la combinaison ne se fait pas, dans un tube de verre placé dans une cloche remplie de chlore qui absorbe les rayons qui auraient agi. — Si l'on expose une lame d'argent aux vapeurs d'iode, la lame prend successivement les couleurs jaune-pâle, jaune-d'or, rouge, bleu, lavande,..... et la plus sensible de ces couches est la jaune-d'or. Si ensuite on fait tomber sur une semblable couche des rayons qui ont été réfléchis par quelques-unes des autres, on voit que les rayons réfléchis par les surfaces les moins sensibles sont ceux qui agissent le plus fortement sur la plaque jaune-d'or. Les

¹ *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. V, p. 283.

² *American Journ.*, 3^e sér., t. V, pp. 25 et 91, et *Journal de phys.*, t. V.

surfaces les moins attaquées sont donc celles qui absorbent le moins de lumière.

2660. Absorption des rayons chimiques par les lames transparentes. — Biot, le premier, a reconnu que les effets chimiques sont, en général, retardés par l'interposition de lames transparentes et incolores¹, et Malaguti, par des couches de divers liquides. — M. E. Becquerel a opéré sur un grand nombre de substances : *eau, alcool, acides, sels solides ou dissous, huiles, essences, verres*, etc. La surface sensible était, tantôt celle d'une lame d'argent ioduré, rendue plus sensible par le chlore et le brome; tantôt une feuille de papier sensible de M. Talbot, propre à la photographie (2666), et que l'on plongeait, après qu'elle avait subi l'action de la lumière, dans une solution d'acide gallique, qui la colorait partout où la lumière avait agi. La surface sensible recevait, dans la chambre noire, deux spectres parallèles horizontaux, donnés par deux faisceaux de rayons solaires passant par deux trous circulaires d'un écran placés sur une même verticale. Une lentille de 1 mètre de foyer, placée derrière le prisme en flint, permettait de distinguer les principales raies. La lame transparente était placée derrière le trou inférieur, et l'on comparait les effets chimiques produits par les deux spectres. Une lame de flint fermant le trou supérieur faisait éprouver par double réflexion sur ses faces, au faisceau qui la traversait, les mêmes pertes que le faisceau inférieur éprouvait sur les faces de la lame en expérience. Il fallait 10^m à 15^m pour observer les effets des rayons excitateurs, et une heure au moins pour les rayons continuaturs. Voici les principaux résultats obtenus avec des lames incolores :

1^o L'interposition des *lames incolores*, solides ou liquides, ne modifie pas les actions chimiques dans la partie du spectre comprise entre les raies A et H ;

2^o de H à P (*fig. 1880*), les actions restent aussi les mêmes, avec *l'eau, l'alcool, l'acide sulfurique*, etc.; mais elles sont affaiblies, avec d'autres substances liquides ou solides, à partir de l'extrémité P, jusqu'à un point plus ou moins rapproché de la raie H; c'est-à-dire que les rayons chimiques les plus réfrangibles sont le plus absorbés, et qu'ils le sont dans la partie invisible HP du spectre, où les actions chimiques sur les sels d'argent sont assez faibles. Les effets s'arrêtent à la raie N avec *l'acide azotique, l'essence de citron*, etc., et à la raie H, avec *la créosote, l'essence d'amandes amères*, la solution aqueuse faible de *sulfate de quinine*.

3^o La position du *maximum* n'est pas sensiblement changée par l'interposition de la lame incolore;

4^o Avec les autres substances sensibles, c'est toujours dans la partie HP que la différence des deux spectres se manifeste. Ainsi, l'enduit de gaïac, qui ne bleuit que dans la partie HP, reste incolore quand les rayons traversent une couche de créosote ou de sulfate de quinine. Au contraire, les lames interposées n'ont aucun effet sur les substances qui, comme le gaïac bleui, ne sont impressionnées que de A en H.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. VIII, p. 345.

5° Il est à remarquer que les rayons *lumineux* compris dans l'espace HP, sont aussi absorbés par les couches de *créosote*, d'*essence d'amandes amères*, de solution de *quinine*; mais ces rayons sont tellement faibles que ces liquides n'en paraissent pas moins incolores.

Des expériences faites avec l'actinomètre, ont conduit aux mêmes résultats. On relevait d'abord les intensités des courants dus à l'action des différentes parties du spectre direct, puis ces intensités, quand le faisceau avait traversé la lame incolore. Les résultats restent sensiblement les mêmes quand au lieu d'être en flint, le prisme est fait de sel gemme, d'alun ou d'eau. Mais, avec des prismes formés d'autres liquides, ou de verre ordinaire, il n'en est plus de même; ces substances absorbant une partie des rayons chimiques les plus réfrangibles. — M. E. Becquerel a fait aussi beaucoup d'expériences avec des lames colorées; verres rouges, jaunes ou bleus, solutions de tournesol, de persulfocyanure de fer..... La surface sensible était formée d'iodure d'argent..... Il a reconnu, comme effet général, que les rayons lumineux et les rayons chimiques sont absorbés dans les mêmes points du spectre.

2661. Identité des radiations chimiques et lumineuses. — M. E. Becquerel a conclu de ses expériences, qu'il n'y a pas lieu de distinguer en un même point du spectre, des *rayons chimiques* spéciaux, et que ce sont les rayons lumineux même qui produisent les effets chimiques. En effet, les rayons qui produisent les actions chimiques se réfléchissent et se réfractent comme les rayons lumineux de même réfrangibilité; les spectres lumineux et chimiques sont interrompus par les mêmes raies; les corps qui absorbent les rayons lumineux absorbent aussi les rayons chimiques de même réfrangibilité. De plus, MM. Fizeau et Foucault ont reconnu que les actions chimiques exercées au foyer d'une lentille par la lumière de l'arc voltaïque et la lumière Drummond, sont dans le même rapport que leurs intensités lumineuses; et la grande différence de nature entre ces deux sources leur a permis de généraliser pour toutes les lumières blanches. Il n'y a donc pas de rayons chimiques *mêlés* aux rayons lumineux, et distincts de ces rayons. Mais, pour arriver à cette conclusion, il a fallu tenir compte des différences dans les intensités chimiques et lumineuses *aux mêmes points*, et remarquer que, si l'intensité lumineuse est trop faible pour que l'œil soit impressionné, l'action chimique peut néanmoins se manifester au bout d'un certain temps, temps qui n'a pas d'influence sur l'effet produit dans l'œil.

2662. De quelques effets chimiques de la lumière. — Niepce de Saint-Victor ayant exposé aux rayons solaires, de l'amidon en suspension dans l'eau et additionnée d'une petite quantité d'un sel métallique, particulièrement d'azotate d'urane, a vu cet amidon se transformer en sucre de raisin et même, paraît-il, en sucre de canne. Ce phénomène donne la clef d'une foule de transformations produites par la lumière dans les matières organiques; telles que la formation du sucre pendant la maturation des fruits, l'altération des fibres végétales des toiles que l'on fait blanchir au soleil, etc,

Activité persistante de la lumière. — Niepce de Saint-Victor ayant exposé au soleil une feuille de papier trempée dans l'acide tartrique ou dans l'azotate d'urane, la renferma dans une boîte de fer-blanc hermétiquement close, pendant plusieurs mois, et trouva que le papier avait la propriété de décomposer l'azotate d'argent, comme s'il eût acquis et conservé les propriétés de la lumière qui l'avait éclairé. Cette interprétation du phénomène n'a pas été admise par tout le monde. M. l'abbé Laborde explique le résultat par l'effet d'une émanation dégagée du papier par la lumière, et qui n'a pu se dissiper pendant qu'il était renfermé. En effet, ayant enlevé le papier insolé, d'un cylindre dans lequel il avait séjourné pendant 4 heures, et ayant placé un papier sensible au couvercle du cylindre, refermé aussitôt, ce papier noircit comme si la feuille insolée était restée en sa présence. D'un autre côté, Thénard ayant fait passer un courant d'oxygène ozoné sur du papier ordinaire, lui a trouvé toutes les propriétés des papiers insolés. Le phénomène serait donc purement chimique, et la lumière ne ferait que provoquer les émanations qui doivent produire l'action. Quoi qu'il en soit de l'interprétation de ces phénomènes, ils méritent toute l'attention des physiciens.

II. Photographie.

2663. Historique. — Le problème qu'on se propose dans la *photographie* ou *héliographie*, consiste à fixer les images de la *chambre noire*, sur l'écran qui les reçoit; c'est là l'application la plus remarquable de la *photochimie*. Vers 1780, Charles, dans ses cours du Louvre, dessinait des silhouettes sur du papier recouvert de *chlorure d'argent*. En 1802, Wedgwood proposait de copier des vitraux d'église ou des gravures, au moyen de peaux, de papiers enduits de *chlorure* ou d'*azotate d'argent*, et il trouvait la lumière de la chambre obscure trop faible pour agir dans un temps modéré. II. Davy parvint à imprimer l'image de petits objets, sur une *surface sensible* placée très-près de l'objectif du microscope solaire; mais tous ces essais n'avaient que peu d'importance, parce que la couche sensible prenait bientôt une teinte uniforme, sous l'influence de la lumière du jour. Davy avait fait beaucoup d'essais pour rendre l'image inaltérable, et il reconnut nettement que là était le problème. Nous allons voir comment il a été résolu.

A la suite de travaux poursuivis de 1813 à 1829, Joseph-Nicéphore Niepce, officier en retraite, eut la gloire de résoudre, le premier, ce difficile problème; il obtint des copies de gravures, par l'action de la lumière sur une couche mince de bitume de Judée déposée sur une plaque argentée. Ces copies étaient rendues permanentes par l'immersion de la plaque dans un mélange d'huile de lavande et de pétrole, qui dissolvait le bitume partout où il n'avait pas été modifié par la lumière. Les tons clairs étaient représentés par la couche blanchâtre de bitume, et les ombres, par la surface métallique, placée de manière à ne pas renvoyer à l'œil de lumière réfléchie spéculairement. Niepce avait aussi, dès 1816, obtenu

des épreuves d'images formées dans la chambre noire, et après de patientes recherches et après avoir apporté divers perfectionnements à l'objectif, il put, en 1826, montrer des épreuves assez parfaites pour exciter l'étonnement de tous ceux qui furent appelés à les admirer.

Il apprit alors que le peintre Louis-Mandé Daguerre, connu par l'invention du *diorama*, s'occupait de recherches semblables aux siennes; des relations s'établirent entre eux, et bientôt, ils firent un acte de société, dans lequel Daguerre inscrivait, comme apport, une nouvelle disposition de la chambre noire, et Niepce, la découverte de la fixation des images produites dans cet appareil. Daguerre perfectionna d'abord la méthode de Niepce; il remplaça le bitume de Judée par le résidu de la distillation de l'huile de lavande, rendit l'épreuve inaltérable en l'exposant aux vapeurs spontanées de l'essence de lavande, et il ne fallut plus que de 3 à 7 heures de chambre noire, au lieu de 10 à 12, pour obtenir une épreuve. Ce ne fut que plus tard que Daguerre découvrit l'extrême sensibilité de l'iodure d'argent, et qu'il imagina son procédé de *photographie au mercure*, qui excita, lors de sa publication, en 1839, un enthousiasme dont on rencontre peu d'exemples dans l'histoire de la science. N. Niepce n'existait plus alors, décédé en 1833, il ne put être témoin du triomphe d'un art dont il était le premier inventeur; son nom, proclamé d'abord avec reconnaissance, fut bientôt à peu près oublié, et ce n'est qu'en 1878 que ses concitoyens songèrent à ouvrir une souscription pour lui élever un monument, à Châlons-sur-Saône, sa ville natale.

2664. Photographie au mercure, ou daguerréotypie. — Quoique le procédé de Daguerre soit aujourd'hui à peu près abandonné, nous allons le décrire succinctement, à cause des voies qu'il a ouvertes et de la vogue dont il a joui pendant longtemps.

Les images sont reçues sur des plaques de cuivre, argentées par le procédé du placage ou par la galvanoplastie. — Après avoir poli la plaque avec le plus grand soin, le succès dépendant surtout de cette première opération, on la fixe dans un cadre de bois, et on l'expose horizontalement dans une boîte fermée, aux vapeurs qui se dégagent spontanément de l'iode, jusqu'à ce que la surface ait pris une couleur jaune d'or due à la formation d'*iodure d'argent*.

La plaque, soigneusement couverte par un écran appliqué sur le cadre qui la contient, est ensuite portée dans la chambre noire, à l'endroit où se forme l'image focale, et la lumière agit en chaque point de la couche d'iodure d'argent, avec d'autant plus d'intensité qu'elle est plus vive. Au bout de quelques minutes, on retire la plaque, sur laquelle on ne distingue encore rien¹.

On l'expose alors, sous une inclinaison de 45°, à la vapeur du mercure, placé sur le fond en tôle d'une boîte chauffée en dessous à 60° environ. L'image

¹ L'image peut apparaître spontanément sur la plaque, mais il faut pour cela une exposition d'au moins une heure. De plus, cette image est *négative*, c'est-à-dire que les parties claires sont à la place des ombres, et réciproquement.

apparaît alors, et l'on peut en suivre le développement, en éclairant la plaque par une bougie, à-travers un verre rouge adapté à la boîte. Au bout de 4 à 5 minutes, la plaque est recouverte d'une rosée de mercure, dont les gouttelettes, visibles au microscope, sont d'autant plus rapprochées que l'iodure d'argent a été plus fortement impressionné; de sorte que les parties de l'image qui ont été vivement éclairées sont d'une blancheur mate plus ou moins intense, les endroits qui ont été peu éclairés, présentant la surface nue et miroitante de l'argent. — Voici comment s'explique ce résultat : l'iodure d'argent est décomposé par la lumière, et il se forme un sous-iodure, ou même de l'argent réduit en poudre impalpable, qui condense les vapeurs de mercure en quantité d'autant plus grande que les parcelles de métal sont plus abondantes; le mercure ne se déposant pas sur les surfaces où l'argent est recouvert d'une couche d'iodure non décomposé.

Pour enlever l'iodure qui n'a pas été altéré, afin que la lumière ne puisse plus agir sur l'épreuve, on plonge la plaque dans un vase plat rempli d'une solution aqueuse d'hyposulfite de soude contenant environ $\frac{4}{10}$ de sel en poids. L'iodure non décomposé est dissous; l'argent reprend sa couleur ordinaire dans les parties non recouvertes par le mercure, et on lave à l'eau pure.

Comme le moindre frottement suffit pour effacer l'image, on fixe les gouttelettes de mercure, soit en versant sur la plaque une solution bouillante de dextrine dont il reste une mince couche, soit en plaçant la plaque horizontalement et y déposant une couche d'une solution de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude, et chauffant en dessous. Il se dépose une pellicule d'or, qui rehausse le ton de l'épreuve et peut résister à un frottement modéré.

Substances accélératrices. — Les admirables épreuves obtenues par Daguerre exigeaient 15 minutes environ d'exposition dans la chambre noire, ce qui rendait impossible l'application au portrait, car on ne pouvait compter sur l'immobilité du modèle pendant un temps aussi long; on était forcé de lui faire tenir les yeux fermés, et comme on l'exposait au soleil pour donner plus d'éclat à l'image, la gêne déterminait des contractions qui altéraient l'aspect habituel du visage. Depuis, on est parvenu à réduire la durée de l'exposition à quelques secondes, et même à des fractions de seconde, par l'emploi d'objectifs perfectionnés, comme nous allons le voir, et par l'augmentation de sensibilité de la couche impressionnable.

M. Claudet, en 1841, a exalté singulièrement cette sensibilité, au moyen de la vapeur de brome. Après avoir formé la couche jaune d'or d'iodure, il exposait la plaque à la vapeur de brome dégagée spontanément du bromure de chaux, jusqu'à ce qu'elle eût pris une teinte rose, ce qui demandait environ 30^s; puis il l'exposait de nouveau à l'action de l'iode, jusqu'à ce qu'elle eût pris une teinte violacée. Il se formait un bromo-iodure d'argent que la lumière modifie bien plus rapidement que l'iodure. — Il y a beaucoup de substances qui jouent, comme le brome, le rôle de *substances accélératrices* : le chlore, l'acide chloreux, le chlorure de brome, le bromoforme, le chlorure de soufre, etc.

2665. Daguerrotypc. — La chambre noire dont on fait usage dans la photographie, a reçu le nom de *daguerrotypc* (fig. 1882). L'image se forme sur la paroi verticale opposée à l'objectif. Cette paroi peut être éloignée plus ou moins de l'objectif, au moyen d'un tirage à coulisse ou à soufflet D. L'appareil se place sur un support articulé, de manière qu'on puisse l'incliner plus ou moins. On a beaucoup varié la forme de ces supports, qui sont plus ou moins compliqués. L'image de la chambre noire étant renversée, pour la voir droite, il faut renverser la plaque argentée; alors la droite des objets représentés se trouve à gauche et *vice versa*, comme lorsqu'on se regarde dans un miroir. On évitait cet inconvénient, en adaptant à l'objectif un prisme rectangulaire vertical, P, dit *redresseur*, dans lequel se réfléchissaient les rayons entrant latéralement en *a'*.

Objectif. — L'objectif des premiers daguerrotypes était formé d'une seule lentille, et il fallait en cacher les bords pour éviter l'aberration de sphéricité; ce qui diminuait l'éclat de l'image.

Ch. Chevalier, en formant l'objectif de deux lentilles, a pu lui donner une grande ouverture, tout en conservant l'image très-nette (2536), et il a pu réduire ainsi la durée de l'exposition à deux ou trois minutes, avant l'invention des substances accélératrices. On voit en O (fig. 1882) la coupe d'un de ces *objectifs doubles*; il se

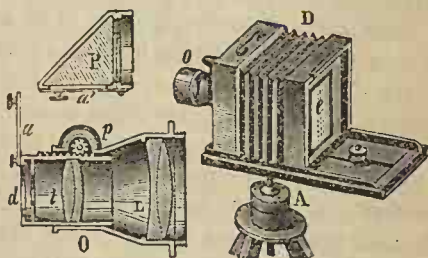


Fig. 1882.

compose de deux lentilles achromatiques L, l, pouvant se rapprocher plus ou moins l'une de l'autre, au moyen d'un pignon p et d'une crémaillère, pour mettre au point, et faire varier le grossissement. On commence par mettre au point sur une lame de verre, e, dépolie du côté intérieur, et que l'on observe en s'enveloppant d'un drap noir. On ferme l'objectif, on remplace la lame de verre par la plaque sensible, on retire l'écran qui recouvre cette dernière, et l'on dégage l'objectif.

Depuis les nombreuses applications de la photographie et les divers perfectionnements qu'elle a reçus, on a beaucoup amélioré les objectifs, en les appropriant à diverses destinations. On peut, en effet, se proposer d'obtenir un champ étendu (pour le paysage); une lumière vive (portraits); un foyer *court* avec champ *plat*, c'est-à-dire donnant sur une surface plane une image également nette partout (intérieurs, objets rapprochés); un foyer *profond* (2535) (objets dont les divers points sont à des distances de l'appareil notablement différentes),... — On distingue les objectifs, en *simples*, formés d'une seule lentille achromatique; et *composés* ou à *verres combinés*, composés de deux ou même trois lentilles séparées.

Parmi les objectifs *simples*, nous citerons le ménisque achromatique en crown

et flint, dont la concavité est tournée vers les objets. M. Dallmeyer, en collant une seconde lentille de crown de densité différente, entre la première et le flint, augmente encore le champ, dont la largeur peut devenir égale à la longueur focale.

Parmi les objectifs composés, on remarque le *périscope* de M. Steinheil, formé de deux ménisques convergents en crown, dont les faces concaves se regardent, et qui donne un champ étendu et plat. M. Th. Ross dispose de la même manière deux ménisques achromatiques, ce que M. Steinheil fait aussi en formant chacun d'eux de deux lentilles en flint de densité différente, collées l'une à l'autre. Cet objectif, nommé *aplanat*, est *rapide* et convient bien à la reproduction des tableaux. Entre les deux ménisques, est toujours disposé un diaphragme rotatif, c'est-à-dire percé de plusieurs ouvertures de grandeur différente qu'on amène successivement sur l'axe de l'objectif. Plusieurs de ces objectifs peuvent se démonter, de manière à ce qu'on puisse employer les ménisques séparément, comme objectifs simples. — Citons encore l'*objectif-globe* (globe-lens) de MM. Harrison et Schnitzer, dans lequel les deux ménisques achromatiques sont placés à une distance telle que leurs faces extérieures prolongées complètent une sphère. Le champ est étendu, mais l'ouverture du diaphragme doit être assez petite, si l'on veut éviter l'aberration de sphéricité.

Les rayons chimiques étant les plus réfringibles, il arrive souvent que le *foyer chimique* d'un objectif se fait plus près de lui que le foyer lumineux. Il faut donc, par quelques essais, étudier préalablement son objectif. On construit, du reste, des ménisques dont les foyers chimique et lumineux coïncident, en employant les méthodes par lesquelles on achromatise les rayons lumineux (2612). M. Prasmowski a reconnu que les rayons qu'il est préférable de ramener au même foyer sont ceux qui correspondent aux raies H et G, ou un peu avant G, du côté du rouge.

Daguerréotype panoramique. — Quand on veut prendre des vues d'une grande étendue horizontale, les images sont confuses vers les extrémités de l'écran, plus éloignées de l'objectif que son milieu, et où l'aberration de sphéricité est plus grande à cause de l'éloignement de l'axe des lentilles. M. Martens, entre autres, a obvié à ces inconvénients dans son *daguerréotype panoramique*. Le fond de la caisse, en forme de cylindre vertical, reçoit la plaque, que l'on force, par des arrêts, à en prendre la courbure. L'objectif peut tourner autour de l'axe du cylindre, de manière que son axe optique se dirige successivement vers les différents points du paysage. Une boîte, munie d'une fente verticale, et qui se meut avec l'objectif, limite latéralement les images. On fait passer ainsi successivement les différentes parties du paysage sur les différents points de la plaque, qui s'impressionnent les uns après les autres. L'objectif tournant autour de l'axe de la surface cylindrique, les images des différents points de l'horizon apparaissent successivement, sans changer de place pendant le mouvement.

2666. PHOTOGRAPHIE SUR PAPIER. — Malgré la netteté et la finesse de détails des épreuves daguerriennes on songea, dès le principe, à opérer sur des plaques

moins pesantes et moins embarrassantes que celles de métal, et ne présentant pas le miroitement incommode qu'on leur reproche. Or, le problème était résolu en Angleterre par Talbot avant la publication de la méthode de Daguerre; mais, pendant que Talbot travaillait à perfectionner son procédé avant de le publier, il fut devancé par les inventeurs français. Les premiers essais de Talbot, qui ignorait heureusement les tentatives infructueuses de Wedgwood et de Davy, sont antérieurs à 1834, et avant 1839, non-seulement il fixait sur le papier les images de la chambre noire, mais encore il pouvait, avec une première épreuve, en obtenir plusieurs autres sans recourir de nouveau au modèle; de même que l'on tire une multitude d'exemplaires d'une planche gravée. Mais quand il fit connaître sa méthode, quelque temps après la publication de celle de Daguerre, la complication des manipulations, l'incertitude de la réussite (on manquait souvent neuf épreuves sur dix), l'infériorité des spécimens qu'il présentait, découragèrent les expérimentateurs. Cependant, M. Bayard obtenait de très-bons résultats par un procédé qu'il n'a pas fait connaître. Quelques années plus tard, en 1847, un amateur de Lille, M. Blanquart-Evrard, au moyen de divers perfectionnements importants, parvint à donner à la méthode de Talbot la sûreté et les qualités pratiques qui lui manquaient¹. Le principal perfectionnement consistait à plonger le papier dans les liquides dont on fait usage, de manière à obtenir une imbibition profonde, au lieu d'étendre simplement ces liquides au pinceau, comme le faisait Talbot. Voici comment on procède :

1° Préparation du papier sensible. — Le papier, mince, homogène, et bien collé, est posé avec précaution sur une dissolution d'azotate d'argent (4^{gr} de sel, 96^{gr} d'eau distillée). Au bout de 2 à 3 minutes, on l'enlève avec des pinces, et on l'étend, dans l'obscurité, sur une glace, le côté mouillé en dessous. Quand il est sec, on le plonge entièrement dans une solution d'iodure et de bromure de potassium (6 d'iodure, 3 de bromure, 100 d'eau), et il se forme de l'iodure et du bromure d'argent. Au bout de 2 ou 3 minutes, on retire la feuille, on la fait sécher dans l'obscurité, et elle peut être conservée à l'abri de la lumière, pendant un mois et plus.

M. Humbert de Molard prépare un papier sensible qui n'exige que de 3^s à 30^s d'exposition dans la chambre noire, en étendant la feuille pendant 5^m sur une solution d'iodhydrate d'ammoniaque (4^{gr} de sel pour 100 d'eau), et laissant sécher. Ce papier ne se conserve que peu de temps. Au moment de s'en servir, on le plonge dans une solution de 7 à 8^{gr} d'azotate d'argent, 3^{gr} d'acétate de zinc et 3^{gr} d'acide acétique dans 100^{gr} d'eau.

2° Formation de l'épreuve négative. — Le papier, préparé par la méthode de M. B. Evrard, peut être exposé sec dans la chambre noire; mais il faut alors l'y laisser assez longtemps. Quand on veut opérer rapidement, on humecte la feuille en l'appliquant par le côté préparé sur une glace bien horizontale, recouverte d'une couche d'une solution dans l'eau distillée (78^{gr}) d'azotate d'argent (7^{gr})

¹ *Annales de chimie et de physique*, t. XX, p. 100, et t. XXI, p. 147.

et d'acide acétique cristallisé (15^{es}); on expulse le liquide en passant le bord d'une lame de verre sur le papier, on superpose une feuille de papier buvard mouillée, sur laquelle on place une seconde glace, et l'on expose dans la chambre noire. La glace antérieure affaiblissant la lumière, on peut l'enlever.

Substances révélatrices. — Quand on retire la feuille, de la chambre noire, l'image est invisible; pour la faire apparaître, on applique le côté impressionné sur une couche d'une solution saturée d'*acide gallique*, ou mieux, comme l'a imaginé Regnault, d'*acide pyrogallique*. L'acide organique continue rapidement la réduction des sels d'argent, et d'autant plus que la lumière les a plus vivement impressionnés. Les substances qui produisent un semblable effet sont dites *révélatrices*. Il en existe beaucoup d'autres; M. Carey-Lea a indiqué plusieurs révélateurs nouveaux, et il signale l'*oxalate de fer* comme le meilleur de tous. L'épreuve obtenue ainsi est dite *négative*, les parties claires de l'image de la chambre noire étant sombres, parce qu'elles ont reçu le plus de lumière; et les parties ombrées étant claires, parce qu'elles n'en ont reçu que peu. Cette épreuve est ensuite plongée pendant 20 à 25^m dans un bain d'*hyposulfite de soude* ou de *bromure de potassium*, pour la *fixer*, c'est-à-dire la rendre inaltérable à la lumière en dissolvant les sels d'argent non décomposés; puis on lave à l'eau, et l'on fait sécher.

Un papier qu'il faut tremper au moment de s'en servir, est peu commode dans les voyages. D'un autre côté, le papier sec est trop long à s'impressionner. Il faudrait donc un papier sec et très-sensible; on en obtient un de la manière suivante : on plonge la feuille, pendant 2 ou 3^m, dans une solution de 5 pour 100 d'iode de potassium dans un demi-litre de sérum de lait, filtré, battu avec un blanc d'œuf, puis filtré de nouveau. Ce papier, séché, se conserve indéfiniment dans l'obscurité. Quand on veut s'en servir, on le passe à l'acétonitrate d'argent, comme il est dit plus haut, et on l'emploie sec. On peut donc en préparer chaque jour un certain nombre de feuilles, avant de partir pour prendre des vues.

3^e Épreuves positives. — L'épreuve négative ou *cliché* sert à obtenir l'*épreuve positive*, c'est-à-dire dans laquelle les ombres et les clairs occupent les mêmes positions que dans le modèle. La nécessité de cette seconde opération, qui semble au premier abord constituer une complication fâcheuse, présente le grand avantage de permettre, au moyen du cliché négatif, d'obtenir autant d'épreuves positives que l'on veut. Voici comment on procède : on rend d'abord le cliché transparent, en le plongeant dans de la cire vierge en fusion, le pressant, au moyen d'un fer à repasser chaud, entre des feuilles de papier buvard, jusqu'à ce qu'elles n'enlèvent plus de cire; on l'applique sur du papier sensible préparé comme celui de l'épreuve négative; on presse les deux feuilles entre des glaces, et l'on expose au soleil ou à la lumière diffuse, l'épreuve négative en dessus. Les parties noires interceptant la lumière, la feuille inférieure se noircit sous les blancs et reçoit un dessin où les ombres sont à la place des clairs de l'épreuve négative, et *vice versa*. Le temps nécessaire peut être réduit à moins d'une minute, par l'emploi des révélateurs, avec lesquels on fait apparaître

l'image, d'abord invisible, comme pour l'épreuve négative. On peut ainsi obtenir 3 à 400 épreuves par jour, suivant l'état du temps.

2667. Papier ciré, gélatiné. — Le papier, à cause de sa texture fibreuse, ne reproduit pas les plus fins détails avec la même netteté que les plaques métalliques. On a fait beaucoup de tentatives pour donner au papier une surface suffisamment lisse. M. Le Gray et M. Fabre de Romans ont employé le papier ciré, qu'on rend sensible par le procédé de M. B. Evrard, mais en le plongeant totalement dans les bains, la cire rendant l'imbibition lente. — M. Baldus obtient une imbibition plus rapide, en remplaçant la cire par la gélatine. On dissout au bain-marie 10^{gr} de gélatine blanche dans 500^{gr} d'eau; on ajoute 5^{gr} d'iodure de potassium, plus 25^{gr} d'une dissolution, de 6 de nitrate d'argent et 12 d'acide acétique dans 100 d'eau. On pose la feuille de papier sur ce bain chaud, on la fait sécher, et on la trempe dans de l'eau contenant $\frac{1}{100}$ d'iodure de potassium, ou, pour le portrait, $\frac{1}{1000}$ d'iodhydrate et $\frac{1}{1000}$ de bromhydrate d'ammoniaque. Ce papier étant sec, quand on veut s'en servir, on le pose sur une couche d'acétonitrate, et on l'expose humide à la chambre noire. On termine en passant à l'acide gallique, lavant à l'hyposulfite de soude, et cirant l'épreuve négative ainsi obtenue.

2668. Photographie sur verre. — On peut dire que le problème de la photographie n'a été complètement résolu qu'après la substitution au papier, de lames de verre enduites d'un vernis très-mince destiné à servir de véhicule à la substance sensible; au moyen de ce perfectionnement capital, imaginé, en 1847, par Niepce de Saint-Victor, neveu du premier inventeur de la photographie, on obtient des épreuves d'une finesse extrême. N. de Saint-Victor formait l'enduit au moyen d'albumine obtenue en battant des blancs d'œufs, filtrant, ajoutant 1 pour 100 d'iodure de potassium et 25 pour 100 d'eau. La plaque, une fois sèche (ce qui demandait environ 24 heures), était trempée dans un bain d'azotate d'argent, 8, d'acide acétique cristallisé, 8, et d'eau, 100. La couche sensible pouvait être conservée dans l'obscurité pendant plusieurs jours. Après 15 à 30^s d'exposition dans la chambre noire, on retirait la plaque, on faisait apparaître l'image au moyen de l'acide pyrogallique, et on la passait à l'hyposulfite de soude. Cette image négative pouvait servir à obtenir des images positives sur une surface sensible quelconque. Il ne fallait que 10^s au soleil, pour en obtenir sur verre albuminé. Mais l'emploi des glaces au collodion a bientôt fait abandonner l'albumine.

2669. PROCÉDÉS AU COLLODION. — La photographie au collodion, inventée vers 1851, à la fois par MM. Legray, Archer et Fry, donne avec rapidité des épreuves d'une finesse extrême; aussi a-t-elle été promptement et universellement adoptée. Le véhicule de la couche sensible est le collodion obtenu par M. Maynard, de Boston, en dissolvant le pyroxyle ou fulmi-coton dans l'éther sulfurique. Voici comment on opère : on dissout 1^{gr} de pyroxyle dans 90^{gr} d'éther et 60^{gr} d'alcool à 33°, et l'on y mêle de l'iodure de potassium. — La glace ayant été nettoyée avec un soin scrupuleux, on la tient horizontalement par

un angle, et l'on y verse le liquide visqueux au milieu, avec précaution, en la faisant tourner lentement, de manière à étendre bien également le collodion, dont on fait ensuite écouler l'excédant par un angle. Il reste un voile de pyroxyle. Avant qu'il ne soit sec, on plonge rapidement la plaque dans une solution de 4^{es} d'azotate d'argent dans 60^{es} d'eau; la couche prend une apparence laiteuse, par la formation de l'iodure d'argent; cette dernière opération, qui rend la surface sensible, doit se faire dans l'obscurité. On expose ensuite la plaque humide dans la chambre noire, et l'on passe à l'acide pyrogallique.

Le *fixage*, qui consiste à dissoudre les sels d'argent non décomposés, se fait en plongeant la plaque dans une solution d'hyposulfite de soude, ou mieux de sulfocyanure de potassium ou d'ammonium (100^{es} par litre d'eau), et on lave à grande eau. Le *fixateur* le plus prompt et le plus facile à laver, est le cyanure de potassium, mais c'est un poison violent qui demande de grandes précautions; la moindre écorchure peut devenir mortelle par le contact de ce liquide, qu'il ne faut avoir que très-étendu d'eau.

La couche au collodion donne des images négatives aussi fines que l'albumine sur verre, et même les demi-teintes y sont plus fidèlement ménagées. Elle convient particulièrement aux paysages, le feuillage ne renvoyant que des rayons chimiques faibles.

Collodion instantané. — Si l'on ajoute au collodion, avant de le plonger dans le bain d'azotate d'argent, 15^{es} d'une solution alcoolique d'iodure d'argent et 6^{es} d'une solution semblable d'iodure de fer, pour 100 de collodion, la surface sensible n'a besoin que d'une fraction de seconde d'exposition dans la chambre noire. — Un autre collodion instantané s'obtient en dissolvant 3^{es} de pyroxyle dans un mélange de 2 parties d'alcool et 1 d'éther, et ajoutant, pour le sensibiliser, 3^{es} d'iodure et 1^{er} de bromure de lithium. Le bain d'argent contient 8 pour 100 d'azotate d'argent, et est saturé d'iodure du même métal, avec quelques gouttes d'acide azotique; la glace collodionnée doit y séjourner 5 à 6 minutes. — L'action dans la chambre noire est tellement rapide qu'on peut, en ne découvrant l'objectif que pendant le temps le plus court possible, saisir l'expression la plus fugitive de la physionomie, reproduire des objets en mouvement, comme les vagues de la mer, un cheval au galop, une machine en marche; M. Stein a pu même photographier le zigzag de l'éclair.

Collodion sec. — La glace collodionnée doit être portée humide dans la chambre noire; sèche, elle est à peine sensible. On a fait bien des essais, afin de pouvoir l'employer sèche, surtout dans les voyages. Parmi les procédés imaginés, pour cet objet, nous citerons, comme un des plus complets, le procédé au *tannin* de M. C. Russel. On étend sur la glace, un collodion à l'iodure et bromure d'ammonium, auquel on ajoute un peu d'iodure de cadmium; on sensibilise dans un bain d'argent acidulé par l'acide acétique, puis on lave à grande eau. On y verse ensuite plusieurs fois une solution formée de 2 $\frac{1}{2}$ à 3 pour 100 de tannin dans de l'eau contenant $\frac{1}{10}$ d'alcool, et l'on fait sécher. Tout cela se fait dans l'obscurité ou dans un laboratoire à vitres jaunes. La plaque peut se

conserver plusieurs mois à l'abri de la lumière, et la durée d'exposition à la chambre noire n'est que de 1 à 2 minutes.

2670. Épreuves positives. — Quand on veut obtenir des épreuves positives d'un cliché au collodion, il faut d'abord le recouvrir d'un vernis, qui le préserve du frottement de la surface sensible sur laquelle on doit l'appliquer.

Positifs sur papier. — Les épreuves positives se font ordinairement sur papier. On emploie un papier fin à grain serré, encollé au moyen d'albumine, quelquefois de gélatine, et qui a été trempé dans de l'eau contenant 30^{gr} environ de sel marin par litre. Ce papier se trouve dans le commerce sous le nom de *papier albuminé* ou *gelatiné*. Quand on veut s'en servir, on le rend sensible, en le plongeant dans une solution d'azotate d'argent (20^{gr} par litre d'eau distillée), et on le sèche dans l'obscurité. On applique ce papier sur la surface impressionnée du cliché, posé lui-même sur une glace maintenue dans un cadre de bois. On recouvre le papier de planchettes, que l'on assujettit et qui le compriment, et l'on expose au grand jour la glace sur laquelle s'appuie le cliché. La lumière agit à travers ce dernier, sur le papier sensible, qu'on retire, dans l'obscurité. On développe ensuite à l'acide pyrogallique, on fixe l'image positive comme on a fait pour la négative, et on lave à grande eau. Quand l'épreuve est sèche, on la colle au moyen d'empois d'amidon, sur du carton de Bristol, et enfin on la *satine*, en la faisant passer entre les cylindres d'acier d'une sorte de laminoir.

Virage. — Avant le fixage, on procède ordinairement au *virage*, qui a pour objet de rendre l'épreuve moins susceptible d'altération par les agents atmosphériques, et de lui donner une teinte agréable que l'on peut varier à l'infini. Après avoir fait tremper l'épreuve sortant de la chambre noire dans de l'eau pure, on la plonge dans un bain contenant 1^{gr} de chlorure d'or et de potassium dans un litre d'eau. Quelques gouttes d'ammoniaque, quelques cristaux d'azotate d'argent, d'acide acétique, ajoutés au bain changent le ton de l'épreuve, que l'on fait encore varier en employant le liquide plus ou moins étendu d'eau, préparé plus ou moins anciennement. Parmi les bains de virage qui donnent les tons les plus agréables, on cite les solutions dans un litre d'eau, de 0^{gr},25 de chlorure d'or avec 7^{gr},5 d'acétate de soude; et de 0^{gr},50 de chlorure d'or avec 4^{gr} de borax.

2671. Positifs sur verre. — Le papier qui reçoit l'épreuve positive ne peut donner une finesse de détails comparable à celle que l'on obtient sur la pellicule homogène de collodion. De plus, avec le papier, les lavages sont souvent incomplets, ce qui peut amener la destruction lente de l'épreuve. Quand on veut obtenir une épreuve très-délicate et de durée indéfinie, on forme le positif sur verre collodionné, ou sur des feuilles de fer très-minces enduites d'un vernis noir et que l'on traite comme les plaques de verre (*mélanotypie*). — On peut aussi détacher la couche de collodion, du verre qui porte l'épreuve positive, et la transporter sur toile cirée : Après avoir fait tremper la plaque dans un bain composé de 10 d'eau et 1 d'acide sulfurique, on l'égoute, et l'on pose dessus la

toile cirée un peu chaude, et on la presse avec la main, pour la faire adhérer au collodion. — M. A. Moitessier, en 1855, a imaginé d'appliquer la pellicule de collodion sur du carton enduit de céruse, dit *carton-porcelaine*, avec lequel on fait des cartes de visite. Le carton est taillé un peu plus petit que la glace, mouillé, appliqué sur cette glace placée horizontalement et qu'on a recouverte d'une couche d'eau. On redresse ensuite la glace, pour faire écouler l'exédant d'eau, on détache les bords de la couche de collodion, on les rabat sur le contour du carton, et il n'y a plus qu'à écarter celui-ci, qui emporte la pellicule de collodion adhérente à sa surface.

2672. Agrandissements. — Quand on veut obtenir de grands dessins, on est arrêté par différentes difficultés pratiques, dont la principale est celle d'étendre le collodion régulièrement sur une grande surface. On préfère donc préparer un cliché de petites dimensions et en tirer un positif de grandeur voulue, au moyen d'appareils d'optique nommés *chambres solaires* et qui ne sont que des espèces de mégascopes (2539), dans lesquels le cliché, fortement éclairé, donne une image grossie qui se projette sur une feuille de papier sensible. Quand on opère dans une chambre obscure, les rayons solaires sont réfléchis par le miroir d'un porte-lumière ou d'un héliostat de Foucault ou de Monckhoven (2451), et traversent une lentille qui les concentre sur le cliché, dont l'image est ensuite formée par un objectif. On emploie aussi des appareils portatifs, en forme de longue caisse à soufflet, articulée sur un pied, et contenant le cliché, l'objectif et la feuille sensible; on tourne la lentille éclairante du côté du soleil. On obtient ainsi des portraits de grandeur naturelle sur papier ou sur toile sensibilisée, sur lesquels un peintre peut appliquer des couleurs à l'eau ou à l'huile, de manière à obtenir une ressemblance certaine. Mais ce n'est qu'entre les mains d'un peintre habile que la *photo-peinture* peut donner des résultats satisfaisants.

Les *agrandissements* se font souvent pendant la nuit à la lumière des lampes photo-électriques, oxyhydriques ou au magnésium. — MM. Delachanal et A. Mermet emploient le sulfure de carbone brûlant dans le bioxyde d'azote, et qui donne une flamme brillante et très-photogénique. Le gaz passe à travers un flacon rempli de pierre ponce imbibée de sulfure de carbone, et sort par un bec, après avoir parcouru un gros tube rempli de pailles de fer qui font fonction de toiles métalliques pour empêcher les explosions (II, 1299). MM. A. Riche et Ch. Bardy, ayant reconnu que l'effet photogénique est dû à la combustion du soufre, font simplement brûler du soufre en fusion dans un têt, en projetant au-dessus un jet d'oxygène. La lumière produite ainsi agit plus fortement sur le bromure d'argent que celle du sulfure de carbone. Des précautions doivent être prises pour se débarrasser de l'acide sulfureux.

On emploie aussi ces diverses lumières artificielles pour obtenir des épreuves positives ordinaires, et même des clichés, pendant la nuit, ou dans les endroits obscurs.

2673. Positifs directs. — Quand on veut avoir en très-peu de temps à sa disposition une épreuve positive, on la produit *directement*, c'est-à-dire sans

passer par un cliché négatif. Voici une des méthodes employées en pareil cas. Le collodion est formé de parties égales d'un collodion ancien et d'un collodion neuf mêlés d'iodure d'ammonium. Le bain d'argent n'est pas changé; il doit seulement être un peu acide, et surtout exempt de toute parcelle de matière organique, ce qu'on obtient en l'exposant aux rayons solaires. Après l'exposition à la chambre noire, on développe au moyen de divers bains, dont un des meilleurs se compose de 6^{gr} de sulfate de fer, 8 d'acide acétique, 6 d'alcool, et 1 d'azotate de potasse, dans un litre d'eau. Dès que l'image est bien venue, il faut laver tout de suite à grande eau; puis on fixe au moyen du cyanure (3^{gr} dans 100^{gr} d'eau), qui achève de développer l'image, en dissolvant l'iodure d'argent en excès.

2674. Positifs au charbon. — Les épreuves sur papier s'altèrent peu à peu et finissent quelquefois par s'effacer. On a donc cherché à introduire dans la couche sensible des matières inaltérables, comme de la poudre de charbon ou d'émaux de différentes couleurs. C'est ce qu'on sait faire aujourd'hui, en s'appuyant sur ce principe, découvert en 1855 par M. A. Poitevin, que la lumière rend insoluble dans l'eau, même chaude, la gélatine, les substances gommeuses, quand on y a mêlé du bichromate de potasse ou d'autres bases alcalines ou terreuses. Le procédé de M. Poitevin a reçu bientôt de nombreux perfectionnements. Il consiste, en principe, à étendre sur une feuille de papier, une mince couche de gélatine mêlée de bichromate et de poudre de charbon, à appliquer dessus le cliché, et à exposer à la lumière. On lave ensuite avec de l'eau un peu chaude, qui dissout la gélatine partout où elle n'a pas été rendue insoluble par la lumière, et le dessin apparaît. — La gélatine pure et surtout dégraissée est dissoute dans l'eau chaude (200^{gr} par litre); on clarifie au moyen de blanc d'œuf battu, et l'on filtre. Le charbon, ou autre corps inaltérable, est broyé dans l'eau et mêlé peu à peu avec la gélatine. On étend cette *mixture* sur une feuille de papier mouillée et appliquée sur une glace horizontale, et quand elle a fait prise, on sépare de la glace et l'on fait sécher. On trempe ensuite la feuille dans une solution de 5 bichromate de potasse dans 100 d'eau, et on l'applique derrière le cliché négatif qu'on expose à la lumière pendant moitié moins de temps que pour les sels d'argent. On passe ensuite à l'eau chaude, à 35° environ, pour dissoudre la gélatine non impressionnée et faire apparaître l'image. On trouve dans le commerce des papiers à *mixture*, qu'il n'y a qu'à tremper dans le bain de bichromate au moment de s'en servir.

Remarque. — Nous venons de passer en revue les principales méthodes photographiques, autour desquelles viennent s'en grouper plusieurs autres qui n'en diffèrent souvent que par quelques modifications dans la manière d'opérer, ou par la manière de composer et d'employer les dissolutions. Nous n'avons pas parlé des caractères d'une bonne couche sensible, des inconvénients d'une trop courte ou d'une trop longue exposition à la chambre noire, des retouches, des précautions à prendre pour la préparation des bains, pour leur conservation, etc. Il faut consulter, pour tous ces détails pratiques, les traités spéciaux de

photographie; notre tâche se réduisait à faire connaître les principes de cet art si répandu aujourd'hui.

2675. APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAPHIE. — Ces applications sont innombrables. Au moyen de la photographie, les voyageurs peuvent reproduire, en un temps très-court, les monuments, les sculptures, les inscriptions, les sites, l'aspect des contrées parcourues, et les spécimens des races humaines, des animaux, des plantes qu'ils ont occasion d'observer. Les armées en campagne emportent des appareils photographiques, au moyen desquels elles peuvent reproduire ainsi tout ce qu'il y a de remarquable dans les pays qu'elles traversent. Le papier ciré est alors précieux à cause de sa légèreté, malgré la durée de pose qu'il exige.

La photographie rend de nombreux services aux beaux-arts, en permettant la reproduction rapide et économique de statues, bas-reliefs, gravures, cartes géographiques, tableaux; mais pour ces derniers on a à vaincre certaines difficultés provenant des différences d'intensité des radiations chimiques émises par les diverses couleurs. — Est-il besoin de citer l'application au portrait?

Sciences. — Les sciences physiques tirent aussi un grand parti de la photographie; nous avons vu les applications qu'on en fait à l'enregistrement des observations météorologiques, magnétiques. On fixe l'image des *flammes manométriques* (I, 811), en remplaçant la flamme du gaz par celle du cyanogène, qui est très-photogénique. — On reproduit en un instant les appareils, les machines les plus compliquées.

On reproduit les objets d'histoire naturelle, les pièces d'anatomie, les images d'infusoires, de parties très-petites de plantes ou d'animaux, grossies par le microscope solaire ou photo-électrique; l'image se forme au fond d'une chambre noire à soufflet adaptée à l'objectif. On reproduit aussi l'image amplifiée des objets placés sur le porte-objet du microscope composé ordinaire, que l'on adapte à la place de l'objectif de la chambre noire, et dont l'oculaire projette l'image sur la plaque sensible. Tous ces dessins photographiques, copiés sur bois et gravés, servent ensuite à enrichir les ouvrages de voyage, d'archéologie, de science, etc., en présentant une exactitude de détails dont les dessins faits à main-levée d'après nature ne pourraient approcher, malgré tout le talent du dessinateur.

Plusieurs photographes, entre autres M. A. Martin et M. Crookes, ont trouvé le moyen de fixer l'image de la chambre noire sur le bois à graver (*xylophotographie*). M. Crookes étend sur la surface du bloc, une couche imperceptible d'oxalate d'argent, et pose dessus, l'épreuve négative du dessin à reproduire. Le dessin positif obtenu noircit peu à peu à la lumière diffuse, mais assez lentement pour que le graveur ait le temps d'achever son œuvre, surtout s'il a soin de couvrir de papier noir les parties auxquelles il ne travaille pas.

M. Dagrön, vers 1858, a imaginé de photographier sur de minces lames de verre albuminées ou collodionnées, l'image microscopique d'un cliché, formée par une lentille convergente à très-court foyer. La lame est ensuite collée sur la

base d'un petit cylindre de verre, dont l'autre base est bombée de manière à constituer un *microscope stanhope*, à travers lequel on observe l'épreuve microscopique grossie. Ces petits cylindres sont enchâssés dans des bijoux, porte-plumes, breloques, etc. Nous avons vu (2543, et I, 481) le rôle qu'a joué la photographie microscopique lors du siège de Paris, pour imprimer sur des pellicules de collodion, de nombreuses dépêches, que l'on confiait ensuite à des pigeons voyageurs, qui pouvaient transporter ainsi jusqu'à 3,000 missives.

Paléographie. — La photographie permet de reproduire et de multiplier les anciens manuscrits que le temps a altérés, en ravivant les traits, et en faisant même reparaître ceux qui sont devenus complètement invisibles, comme les caractères effacés des palimpsestes, ou ceux des manuscrits carbonisés. La couche sensible indique donc qu'il part des endroits où se trouvaient les caractères, des radiations particulières — Les faits qui suivent s'expliquent de la même manière : M. Vogel rapporte qu'un jour un portrait photographique sortant du bain révélateur montra une figure criblée de taches, ce qu'on attribua à l'impureté de la couche sensible. Le lendemain, la petite vérole se déclarait chez le modèle, et les boutons sortis correspondaient aux taches de l'épreuve. La médecine pourra peut-être un jour tirer parti de ce phénomène. Si l'on trace sur une feuille de papier, comme l'a fait M. Gladstone, des traits au moyen d'une solution incolore de sulfate de quinine ou de chlorophylle, le dessin invisible se distingue nettement dans la chambre noire sur le collodion sensible. Ce dernier fait se rattache à ce qu'on a appelé la *photographie de l'invisible*.

2676. Application à l'astronomie. — Parmi les applications de la photographie, une des plus remarquables est celle qu'on en a faite à l'étude des corps célestes. Alors, comme le remarque M. Faye, l'observateur est supprimé, et l'œil est remplacé par une surface sensible, et même plus sensible que lui. Plus de préoccupations personnelles, d'idées préconçues; la couche impressionnée reproduit avec fidélité l'image reçue et la conserve indéfiniment. — On opère ordinairement en formant l'image de l'astre au foyer d'un objectif, ou mieux d'un miroir sphérique avec lequel il n'y a pas à se préoccuper de l'achromatisme chimique. Cette image est reçue sur la surface sensible, soit directement, soit après avoir été amplifiée par une lentille convergente (2647).

M. Warren de la Rue, qui le premier s'est occupé avec persévérance de photographie céleste, a d'abord obtenu des images de la lune, qui ont excité une admiration générale. Ces premiers résultats ont cependant été notablement dépassés par les photographies lunaires obtenues, sous un ciel plus favorable, par M. Grubb et M. Rutherford. Le premier employait un télescope à miroir de verre argenté, et le second, une puissante lunette à objectif achromatisé pour les rayons chimiques. Le temps de pose était de $\frac{1}{2}$ à 2 secondes au plus. Les chaînes de montagnes, les cirques, les cratères, les immenses plaines sont reproduites avec une telle fidélité que le moindre changement survenant plus tard à la surface de notre satellite pourra être facilement constaté.

Le soleil a été souvent photographié avec ses taches, ses facules. Dès 1849,

MM. L. Foucault et Fizeau en avaient obtenu une image sur plaque daguerrienne, ouvrant ainsi la voie à la photographie céleste. — Après avoir obtenu une épreuve de petites dimensions, on peut, par agrandissement, en obtenir d'aussi grandes que l'on veut, et étudier avec détail l'ensemble du disque, ce que ne permettent pas les observations directes, les lunettes ayant un champ d'autant plus restreint qu'elles sont plus puissantes. Une condition importante est de réduire à un instant aussi court que possible le temps d'exposition; autrement, l'impression s'étendrait au-delà des limites des images, et l'épreuve serait confuse. M. Janssen, au moyen d'un écran percé d'une fente et passant rapidement à travers l'image focale, a pu réduire ce temps à $\frac{1}{3000}$ de seconde, et obtenir ainsi, sur un collodion très-pur, l'image des granulations qui recouvrent la surface du soleil et qui sont attribuées à des espèces de vagues agitant la couche extérieure de la photosphère.

Lors de l'éclipse de 1860, M. W. de la Rue et le P. Secchi ont photographié les phases du phénomène, et ont prouvé, par ce moyen, que les protubérances appartiennent bien au soleil, et non à la lune qui le cache. Ces protubérances, qui se dessinent très-nettement sur l'épreuve, ainsi que la chromosphère, ont un pouvoir photogénique tellement grand que l'image photographiée en montre quelquefois qui ne peuvent être distinguées directement. Ces résultats ont été confirmés lors des éclipses subséquentes, à l'observation desquelles la photographie a toujours été appliquée avec succès.

On a, par la photographie, reproduit le spectre solaire avec ses mille raies, non-seulement dans la partie visible, mais encore dans un espace égal précédant le rouge, et, comme nous l'avons vu, dans celui qui suit le violet. Le *maximum* d'intensité chimique se manifeste vers la raie G. M. Cornu¹, qui a photographié le spectre dans la région ultra-violette, obtient d'un seul coup l'image du spectre entier, en adaptant au collimateur ainsi qu'à la lunette du spectroscopie, une lentille achromatique formée d'un verre biconvexe en cristal de roche et d'un verre plan-concave en spath d'Islande, taillés de manière que l'axe de ces lentilles soit parallèle à l'axe cristallographique. M. Cornu a aussi trouvé moyen de rendre l'objectif des lunettes, achromatique pour les rayons chimiques, en écartant les deux verres qui le composent, d'une quantité qui dépend de leur nature, et qui n'est que de 0,015 de la longueur focale, pour le crown et le flint ordinaires.

Les étoiles ont pu être photographiées au moyen de puissants télescopes, mais l'image doit être cherchée sur l'épreuve au moyen du microscope. M. Gould a réussi sur des étoiles de 11^e grandeur; ici, la durée de l'action chimique compense sa faiblesse, ce qui n'a pas lieu pour notre œil. On conserve ainsi la figure des constellations, de manière que les générations futures pourront constater facilement les déplacements relatifs des étoiles. M. Rutherford et M. Miller ont obtenu de bonnes photographies des spectres de Sirius de la Chèvre, avec leurs principales raies. Les *nébuleuses* n'ont, jusqu'à présent, donné que des résultats

¹ Bulletin de la Société de physique (1879), p. 39, et Journal de physique, t. III, p. 408.

incomplets, à cause de la faiblesse de leur intensité lumineuse et photogénique. Il en est de même des planètes; cependant, M. W. de la Rue est parvenu à obtenir de bonnes épreuves de *Jupiter* avec ses bandes, de *Mars*, de *Saturne*.

Nous n'entrerons pas dans de plus longs détails sur cette admirable application de la photographie à l'étude des astres. Nous en avons assez dit pour montrer que les appareils photographiques occuperont désormais dans les recherches astronomiques une place importante à côté du spectroscope et du télescope.

2677. Photomètre photographique. — La photographie a été appliquée aux mesures photométriques; on compare les temps nécessaires pour impressionner au même degré une surface sensible. MM. Fizeau et Foucault concentrent les rayons lumineux de la source, au foyer d'une lentille, sur la surface sensible. Si I est l'intensité de la source, i l'intensité au foyer, d la distance focale et r le demi-diamètre de la lentille, on a

$$i = I r^2 : d^2 = I \tan^2 \alpha$$

2α étant l'ouverture de la lentille prise du foyer. Si une autre source, I' , impressionne de la même manière et dans le même temps la même surface sensible, on aura $i' = I' \tan^2 \alpha'$ et par conséquent $I \tan^2 \alpha = I' \tan^2 \alpha'$; d'où l'on tirera le rapport des intensités I et I' des deux sources.

Comme il est difficile de disposer de α de manière à obtenir le même effet chimique au bout du même temps, on suppose que les intensités focales sont en raison inverse des temps employés à produire le même effet. En modifiant l'intensité focale d'une lampe, au moyen d'écrans, MM. Fizeau et Foucault ont reconnu que cette supposition est vraie, pour des temps et des intensités dont le rapport ne dépasse pas celui de 10 à 1. Ils prenaient pour couche sensible l'iodure d'argent de Daguerre, et obtenaient 5 ou 6 impressions, les unes à côté des autres, pendant des temps différents, et choisissaient pour terme de comparaison celle que la vapeur de mercure faisait à peine apparaître. Ils ont ainsi comparé les intensités des principales sources naturelles et artificielles. — J. Herschell et M. E. Becquerel ont employé les surfaces sensibles, pour comparer les actions chimiques des rayons du soleil à différentes hauteurs au-dessus de l'horizon. — MM. Bunsen et Roscoe ont fait aussi beaucoup d'expériences photométriques, en se servant de l'action chimique des rayons sur le mélange de chlore et d'hydrogène. Mais il faut remarquer que la méthode photographique peut conduire à des résultats très-inexactes, les effets chimiques qu'elle compare n'étant pas proportionnels, en général, aux effets lumineux.

2678. Héliogravure. — Nous avons vu comment on a essayé de tirer des épreuves à l'encre, de plaques daguériennes, soit en déposant à leur surface une couche de cuivre par les procédés galvanoplastiques, soit en attaquant la plaque en la faisant servir d'électrode positive (III, 2021). L'art d'obtenir des planches gravées en faisant agir différents mordants sur une plaque enduite d'un vernis affecté par la lumière, constitue l'héliogravure, ou gravure héliographique, objet des premiers essais de N. Niepce, et plus tard des recherches de MM. Fizeau,

Beuvière, Talbot, Poitevin, Niepce de Saint-Victor. Ce dernier obtient une gravure sur acier, en recouvrant la plaque d'un vernis formé de bitume de Judée (5^{er}), benzine (100^{er}), et cire jaune pure (1^{er}). Il rend ce vernis très-impressionnable, en versant sur la plaque, de l'éther sulfurique contenant quelques gouttes d'essence de lavande. Quand la plaque est sèche, il applique sur sa surface le recto d'une épreuve *positive* sur verre ou sur papier. Quand la lumière a produit son effet, il passe la plaque à l'huile de naphte contenant $\frac{1}{5}$ de benzine; il fait ensuite agir un mordant formé d'acide azotique étendu, mêlé d'un peu d'alcool, ou bien une dissolution d'iode, qui attaque l'acier, et il termine avec l'eau-forte. Cette méthode était un véritable progrès; cependant, les résultats laissaient beaucoup à désirer, les ombres n'étant pas fondues et graduées.

Héliotypie. — M. Talbot avait reconnu que la lumière rend imperméable à l'eau, la gélatine additionnée d'un bichromate alcalin; et il avait tiré parti de cette propriété pour graver des planches d'acier au moyen de l'eau-forte. M. Poitevin, qui a fait des recherches étendues sur l'héliogravure, et a imaginé de nombreux procédés, a reconnu que cette gélatine bichromatée, qui se gonfle d'environ 6 fois son volume dans l'eau froide, perd cette propriété sous l'influence de la lumière, et il part de là pour obtenir des planches gravées en creux ou en relief, d'un dessin ou d'un cliché photographique¹. La gélatine bichromatée est étendue en couche mince sur une plaque horizontale et séchée dans l'obscurité. On applique le dessin sur sa surface, et l'on expose quelques minutes au soleil. On trempe aussitôt dans l'eau; les parties préservées de la lumière par les traits noirs du dessin, se gonflent seules, et se produisent en relief. On en prend le moule au moyen de la galvanoplastie, et l'on obtient ainsi une planche de cuivre gravée en creux, dont on peut tirer des épreuves, comme d'une planche en taille douce.

Pour obtenir des *clichés typographiques*, on étend une mince couche de gélatine pure sur une plaque de verre; quand elle est sèche, on la trempe dans une solution concentrée de bichromate, et on laisse sécher dans l'obscurité. On applique une épreuve *negative* du dessin et l'on expose au soleil pendant 20 à 30 minutes. L'eau fait ensuite gonfler la gélatine, excepté dans les points qu'a frappés la lumière; ces points correspondent aux traits du dessin positif, et viennent en relief dans le moule galvanoplastique. Il reste à creuser à l'échoppe les creux de grande étendue, la couche mince de gélatine ne comportant pas assez de gonflement pour produire une profondeur suffisante.

Photolithographie. — Parmi les nombreux procédés inventés par M. Poitevin, nous citerons encore le suivant: On enduit une pierre lithographique *grenée* très-finement, d'une solution d'albumine additionnée de bichromate de potasse; on égalise et l'on assèche l'enduit au moyen d'un tampon de vieux linge. On applique le cliché *negatif* sur la pierre, et l'on expose au soleil pendant 15 à 20^m. On porte dans l'obscurité, on enlève le cliché, et le dessin

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXII, p. 492.

apparaît en brun. On mouille et l'on passe le rouleau garni d'encre de report; cette encre grasse n'adhère que sur les parties qui ont reçu l'action de la lumière, tandis que, dans les autres, l'albumine soluble se mouille et repousse le corps gras. On tire ensuite des épreuves sur papier, par les procédés ordinaires de la lithographie.

Photoglyptic. — Les procédés à la gélatine, sans sels d'argent, ont reçu de nombreux perfectionnements, et il en est qui donnent de très-bons résultats. Un de ces procédés, dû à M. Woodbury, est aujourd'hui très-répandu, sous le nom de *photoglyptic* (γλύπτειν, graver); c'est par lui qu'on obtient ces nombreuses épreuves, prises le plus souvent pour des photographies ordinaires, et qui représentent des sites, des monuments, des portraits. Voici la marche générale de l'opération :

Après avoir préparé sur une lame de verre une mince couche de gélatine au bichromate de potasse, on la détache, on pose dessus le cliché photographique qu'on veut reproduire, et l'on expose à la lumière pendant 15 à 20^m. On sépare du cliché la feuille de gélatine, on l'applique sur une lame de verre vernie au caoutchouc, et on la plonge dans l'eau tiède, pendant environ 24 heures. L'eau dissout plus ou moins la gélatine là où la lumière a agi, et laisse en relief les parties qui ont été complètement abritées par les ombres du cliché.

La couche de gélatine, ainsi gravée suivant la méthode de M. Poitevin, est ensuite fortement comprimée entre une plaque d'acier et une plaque d'un alliage de plomb et antimoine assez ductile pour prendre l'empreinte de la gélatine. Celle-ci n'est pas érasée, comme on pourrait le supposer, et cependant la pression doit atteindre 500 kil. par centimètre carré. On la produit, dans les grands ateliers, au moyen d'une presse hydraulique. Pour tirer une épreuve, on verse sur la planche de plomb légèrement graissée un mélange tiède d'encre de Chine et de gélatine; on applique une feuille de papier fin, et l'on appuie au moyen d'une presse à levier. Au bout d'un moment, quand la gélatine a fait prise, on dégage la feuille de papier, et elle emporte l'encre du moule, qui reste net. L'épreuve est ensuite lavée dans un bain d'alun, qui la rend insoluble, puis satinée et appliquée sur une feuille de carton. On peut ainsi tirer plus de 1,000 exemplaires par jour, et la planche de plomb n'est pas sensiblement altérée après un tirage de 4,000 exemplaires. On peut, du reste, colorer l'encre en diverses nuances; on peut aussi tirer sur des lames de verre et former des espèces de vitraux peints qui sont déjà assez répandus.

2679. Chromophotographie. — La méthode daguerrienne avait à peine été publiée, qu'on cherchait déjà le moyen de fixer les couleurs des images de la chambre noire. Mais le succès n'est pas encore venu complètement couronner les efforts des physiciens. Cependant, on a déjà obtenu des résultats très-remarquables, au moins au point de vue scientifique.

Il fallait d'abord trouver une couche sensible capable de reproduire toutes les couleurs des rayons lumineux. Seebeck et J. Herschell avaient vu le chlorure d'argent prendre quelques nuances analogues à celles de la région du spectre

qui l'éclairait, et M. Hunt, en 1840, la même substance prendre des nuances rappelant celles de verres colorés sous lesquels il la plaçait. Enfin, M. E. Becquerel, vers 1847, est parvenu à photographier le spectre solaire avec toutes ses couleurs.

Voici comment M. E. Becquerel prépare sa couche sensible¹ : une lame de plaqué d'argent est suspendue dans de l'eau contenant $\frac{1}{5}$ d'acide chlorhydrique ordinaire. On fait communiquer cette lame avec le pôle positif d'une pile de deux couples de Bunsen faiblement chargés, et le liquide avec le pôle négatif par une lame de platine parallèle à la plaque. Le chlore se porte sur la lame, et forme un chlorure dont la nuance varie avec l'épaisseur. On arrête l'opération quand la couleur, observée au moyen d'une faible lumière, paraît pour la seconde fois d'un violet-rose. La plaque est alors exposée à l'action d'un spectre vif obtenu avec le secours d'une lentille, et l'on voit les couleurs apparaître, en commençant par l'orangé et le rouge. D'abord, les nuances sont pures, mais faibles, puis elles se prononcent, mais en même temps s'assombrissent. Le bleu, l'indigo et le violet sont celles qui présentent le plus d'éclat.

Si l'on a recuit la plaque dans l'obscurité pendant quelques minutes, à une température de 80 à 100°, ce qui lui a donné une couleur de bois, le spectre s'y imprime avec des nuances vives et claires. De plus, la lumière blanche donne du blanc, tandis qu'elle produit du noir sur la plaque non recuite. En-deçà du rouge, la plaque prend une couleur puce et finit par noircir; et elle prend une couleur grise au-delà du violet, ce qu'on peut empêcher au moyen d'un écran de sulfate de quinine (2691). — Les couleurs les moins réfrangibles sont les moins belles. On augmente leur éclat, en employant une couche de chlorure plus épaisse, qu'on expose pendant une ou deux heures à l'action des rayons rouges obtenus en superposant un verre bleu foncé de cobalt à un verre rouge foncé au protoxyde de cuivre; puis on recuit la plaque à 80°.

Si l'on opère avec un spectre étalé, on peut obtenir les principales raies; mais il faut une heure ou deux d'exposition, pour avoir un bon résultat.

2680. Reproduction d'estampes colorées. — M. E. Becquerel ayant appliqué, sur sa couche sensible, une estampe enluminée, et ayant exposé le tout au soleil, le dessin s'imprima avec ses couleurs. Un écran de sulfate de quinine arrêtait les rayons plus réfrangibles que le violet, qui auraient donné une teinte grise générale. Les images de la chambre noire se reproduisent aussi avec leurs couleurs, mais il faut 10 à 12 heures d'exposition, et, de plus, le vert est peu distinct. On peut bien obtenir une couche plus sensible en plongeant la plaque pendant un instant dans une solution de bichlorure de cuivre; mais alors les nuances sont beaucoup moins belles que celles que l'on obtient sur la couche préparée au moyen de la pile.

Niepee de Saint-Victor est aussi parvenu à reproduire des estampes enlu-

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXII, p. 451; t. XXV, p. 447, et t. XXXII, p. 192.

minées. Il reconnut d'abord que la couche de chlorure, formée par l'immersion d'une plaque argentée dans une solution de chlore, tend à prendre, sous l'influence de la lumière, surtout une certaine teinte, qui dépend de l'état de la dissolution. Quand celle-ci est très-faible, le jaune tend à se développer; et, si la quantité de chlore augmente graduellement, les nuances les plus faciles à obtenir sont vert-bleu, indigo, violet; puis orangé et rouge quand il y a concentration. Les solutions de chlorure de cuivre ou de fer, donnent de meilleures couches sensibles que le chlore seul. C'est avec de semblables solutions que N. de Saint-Victor a reproduit des estampes avec leurs couleurs.

Un des résultats les plus remarquables obtenus par le même chercheur au milieu de ses nombreux essais, est le suivant¹ : si l'on plonge une plaque dans une solution de chlore contenant un peu de chlorure d'un métal qui donne une certaine couleur à la flamme de l'alcool, la couche sensible reproduira cette couleur avec le plus de facilité. Par exemple, si la solution contient un peu de chlorure de strontium, qui colore la flamme en pourpre, la couche sensible exposée au soleil, après avoir été recouverte d'une estampe enluminée, reproduira les teintes rouges avec intensité, les autres couleurs n'apparaissant que faiblement.

Les images photo-chromatiques n'ont pas encore pu être fixées. Toutes les dissolutions que l'on a essayées font disparaître les couleurs, et ne laissent que l'image en noir. Le problème de la photographie chromatique n'est donc pas encore résolu, mais les résultats déjà obtenus permettent d'espérer qu'on arrivera un jour à une solution complète.

M. Ch. Cros a tourné la difficulté par un moyen ingénieux, en partant de ce fait, qu'on peut, avec trois couleurs primitives, *rouge, jaune, bleu*, reproduire sensiblement toutes les nuances. Il prend trois clichés négatifs sur verre au collodion, d'un tableau coloré; le premier, en interposant une lame de verre ou une couche liquide de couleur orange, qui, composée de rouge et de jaune, intercepte les rayons *bleus*; de sorte que tout ce qui est bleu sur le modèle reste transparent sur le collodion. Le second cliché est formé en interposant une lame verte qui arrête les rayons *rouges*, et le troisième, en interposant une lame violette qui arrête les rayons *jaunes*. Chaque cliché, posé sur un fond de la couleur qui a été interceptée pendant sa formation, présentera donc l'image de tout ce qui est de cette couleur, ou en contient plus ou moins, sur le modèle. — Supposons maintenant qu'on prenne une épreuve positive de chaque cliché, par le procédé à la gélatine de M. Poitevin (2678); on pourra, avec le premier et en se servant d'encre *bleue*, imprimer sur une feuille de papier l'image de ce qui est bleu sur le modèle. De même avec le second cliché garni d'encre rouge, et sur la même feuille, imprimer ce qui est rouge; et avec le troisième cliché, imprimer à l'encre jaune l'image de ce qui est jaune. Ces trois couleurs se superposeront plus ou moins en différents endroits et donneront les nuances composées qui s'y trouvent.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXII, p. 373.

dans le modèle. Il est vrai qu'on emploie ici des couleurs préparées, mais c'est la lumière qui en détermine d'avance la distribution et le mélange.

2681. Images de Moser. — Il nous reste à dire quelques mots, à cause de l'intérêt qu'elles ont excité, des images étudiées par M. Moser¹, quoi qu'il soit bien prouvé aujourd'hui qu'elles ne se rattachent aucunement aux effets chimiques de la lumière. — Si l'on efface totalement des traits qu'on a tracés sur une glace ou sur toute autre surface polie, ils reparassent sous l'humidité de l'haleine. On peut encore obtenir des dessins en soufflant l'haleine sur la surface, à travers un écran découpé, enlevant l'écran et soufflant de nouveau quand la vapeur est dissipée; on reconnaît facilement le dessin des découpures. Une médaille posée pendant un certain temps sur une glace, y laisse souvent une empreinte distincte; si l'empreinte est invisible, on la fait apparaître par le souffle.

Si l'on pose une médaille, métallique ou non, sur une plaque d'argent bien polie, qu'on l'expose ensuite aux vapeurs de mercure, après avoir enlevé la médaille, on peut en distinguer le dessin gravé. Si la plaque d'argent est iodée, la place qu'occupait la médaille est souvent visible immédiatement, et l'on en développe les détails, soit en exposant la plaque aux vapeurs de mercure, soit simplement à la lumière diffuse ou aux rayons solaires.

Une plaque d'argent neuve et bien polie, exposée au soleil pendant plusieurs jours sous un écran noir découpé, puis exposée aux vapeurs de mercure, laisse voir le dessin des découpures. Une plaque de cuivre et une plaque de verre donnent le même résultat, quand on expose, après l'insolation, la première aux vapeurs d'iode, et la seconde au souffle de l'haleine. La lumière semble donc avoir modifié la surface partout où elle l'a frappée.

M. Moser a constaté que deux corps placés très-près l'un de l'autre dans l'obscurité la plus complète, impriment leur image l'un sur l'autre; ce résultat remarquable est quelquefois obtenu au bout de 10 minutes. C'est ainsi qu'on voit assez souvent les mots et les chiffres gravés dans la boîte des montres, se peindre renversés sur la cuvette qui recouvre les rouages. On a vu plus d'une fois l'image d'une gravure reproduite sur la glace qui l'a recouverte pendant longtemps sans la toucher.

M. Karsten a obtenu des images semblables à celles de M. Moser, au moyen de décharges électriques: une médaille est posée sur une lame de verre appliquée sur une plaque de métal; on fait jaillir des étincelles sur la médaille; l'électricité se porte sur la plaque de métal en contournant la lame de verre, sur laquelle le souffle fait apparaître ensuite l'empreinte de la médaille. Si l'on superpose plusieurs lames de verre, chacune d'elles donne l'empreinte sur celle de ses faces qui est tournée vers la médaille, et d'autant plus distincte qu'elle en est plus rapprochée. Le même effet se produit sur une plaque de métal polie séparée de la médaille par une lame de verre ou de mica.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XV, pp. 119, 855 et 1201.

Les images de Moser ont fortement excité l'attention de plusieurs physiciens, entre autres MM. Morren, Bertot, Knorr, Hunt, Masson, Karsten¹. M. Moser semble attribuer celles qui naissent dans l'obscurité, à des radiations obscures dont l'intensité diminuerait rapidement avec l'obliquité, de manière que les rayons sortant normalement auraient seuls une action sensible. — M. Knorr les attribue à des radiations calorifiques. Il fait aussi apparaître les images, d'abord invisibles, en chauffant les plaques, et propose d'appeler *thermographie*, l'art de produire des empreintes par ce procédé.

M. Fizeau² a trouvé la véritable explication des images de Moser : les surfaces les plus nettes sont recouvertes d'une couche imperceptible de matières organiques, qui s'y déposent pendant l'exposition à l'air. Cette couche dont l'épaisseur varie avec la configuration des creux et des reliefs d'une médaille, se transporte sur les surfaces très-rapprochées, par volatilisation, ou peut-être en obéissant à une sorte d'attraction, de manière que les vapeurs qu'on y projette ensuite y adhèrent autrement que dans les autres points. Par exemple, sur le verre, l'humidité se dépose en gouttelettes plus fines et moins étalées là où la matière grasse est plus abondante. En effet, si on lave une lame de verre avec de l'acide nitrique et de l'eau bouillante, une goutte d'eau s'y étale entièrement, tandis qu'au bout de quelque temps d'exposition à l'air, la goutte forme une masse convexe et circonscrite. M. Fizeau a reconnu que les images ne se produisent pas sur une lame de platine nettoyée au point d'enflammer le gaz hydrogène, et qu'une médaille agit d'autant plus lentement, qu'on lui a fait déjà produire un plus grand nombre d'images, ou qu'elle a été mieux nettoyée. Quand elle a été chauffée, elle ne forme plus d'empreinte, et il suffit de passer la main à sa surface pour qu'elle en produise de nouveau. Une lame de mica interposée entre la médaille et la plaque, empêche l'image de se former. Les décharges électriques paraissent agir en favorisant le transport de la matière grasse, de la médaille à la lame juxta-posée; ou bien, suivant les cas, en débarrassant cette dernière, de sa pellicule grasse. Il peut se faire aussi que l'électricité agisse en modifiant profondément l'état moléculaire de la surface; alors l'empreinte peut durer pendant des années.

§ 3. — EFFETS PHOSPHOROGÉNIQUES. — FLUORESCENCE

I. Phosphorescence excitée par la lumière.

2682. Rayons phosphorogéniques. — Nous avons vu que les rayons solaires rendent phosphorescentes certaines matières (2394). Les rayons lumineux, quelle que soit leur source, produisent ce même effet, pourvu qu'ils soient suffisamment intenses. On s'est demandé si tous les rayons du spectre possèdent

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XVI et XVII, *passim*.

² *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XV, p. 896, et t. XVI, p. 397.

à cet égard la même efficacité. Quelques physiciens, et particulièrement Beccaria, avaient reconnu que les rayons violets sont les plus efficaces, et que les rayons rouges le sont le moins, et l'on avait cru, d'après certaines expériences faites au moyen de la lumière électrique, que les rayons *phosphorogéniques* étaient distincts des rayons lumineux de même réfrangibilité; mais il n'en est pas ainsi, et le principe de l'identité s'applique encore ici, comme il résulte des expériences de M. E. Becquerel¹.

Ces expériences ont été faites avec les phosphores de Canton et de Bologne. La matière était répandue en poudre sur une feuille de papier enduite de gomme, et tendue sur un cadre. Quand la couche était sèche, on l'exposait dans la chambre noire à l'action d'un spectre pur; on fermait les yeux, et, au bout de quelques minutes, on bouchait l'ouverture de la chambre, et l'on observait la phosphorescence. Avec le phosphore de Canton, la lueur se montre de la raie G à P (fig. 1862); il y a une partie moins lumineuse en IN, et deux *maximum*, en O et entre H et G. Le phosphore de Bologne donne des résultats semblables; seulement, il n'y a pas de *minimum* en IN, et il n'existe qu'un *maximum*, situé entre les raies I et M. On voit que les effets phosphorogéniques se manifestent dans les mêmes régions du spectre que les effets chimiques.

Les rayons *continueurs* ont la propriété d'éteindre la phosphorescence quand elle existe d'avance; ainsi, la matière phosphorique qui a été exposée à la lumière avant de recevoir l'action du spectre, cesse de luire dans l'espace HIA, pendant que l'éclat va en augmentant de H en P. De plus, les parties ainsi rendues obscures ont perdu la propriété de luire sous l'influence de la chaleur. — M. E. Becquerel, ayant fait tomber les rayons solaires, à travers un verre rouge, sur la couche phosphorescente, a vu la lueur s'éteindre, pendant qu'elle persistait dans quelques parties préservées des rayons rouges par un écran; résultats remarquables antérieurement par Seebeck. Les rayons infra-rouges se comportent comme les rayons rouges, et M. E. Becquerel en a déduit un moyen de rendre sensible à l'œil ces rayons invisibles dont on ne pouvait autrefois prouver l'existence que par leurs effets calorifiques². On fait tomber sur la bande phosphorescente, la partie infra-rouge d'un spectre; la lueur est en partie éteinte, et se couvre de larges bandes sombres attestant la présence des rayons invisibles. Pour rendre le phénomène continu, on fait tomber simultanément deux spectres solaires formés par deux prismes placés en face de deux fentes voisines verticales, et l'on tourne un des prismes de manière que la partie infra-rouge se superpose, sur la couche sensible, à la partie violette de l'autre spectre. Les bandes sombres, dans la partie infra-rouge du premier spectre, apparaissent d'une manière continue, la phosphorescence étant continuellement rétablie par les rayons violets du second, pour être sans cesse détruite par les rayons infra-rouges.

¹ *Bibl. de Genève* (1842), t. XL, p. 357, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e série, t. IX, p. 314.

² *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. X, p. 5.

Les rayons continuateurs n'éteignent pas immédiatement la phosphorescence; au contraire, ils l'exaltent d'abord, comme le fait la chaleur, en faisant dégager rapidement la somme de lumière que la substance ne devait émettre que lentement. On rend très-sensible l'action des rayons rouges, en chauffant la substance; la partie qui a été frappée par ces rayons reste obscure, tandis que tout autour la surface devient lumineuse.

La couleur de la lumière phosphorescente, qui peut varier de l'orangé-rouge au violet, n'a pas de rapport avec celle des rayons excitateurs, sauf pour trois substances : le *sulfure de barium*, qui répand une lueur jaune-orangé quand il a été frappé par les rayons situés entre H et P, et une lueur plus rougeâtre quand il reçoit les rayons violets et bleus; le *sulfure de calcium*, qui émet une lumière rouge-orangé, par les rayons compris de F en O, et présente une légère nuance de vert, par ceux qui sont compris entre O et P; et la matière obtenue par la réaction du sulfure de potassium sur les coquilles d'huître calcinées d'une certaine manière avec la chaux, qui donne une lueur violet-indigo dans la partie du spectre de même teinte, et devient bleue dans les rayons situés au-delà du violet. *En général, les rayons émis sont moins réfringibles que les rayons excitateurs.*

2682. Lumières artificielles. — La lumière électrique, riche en rayons très-réfringibles, produit la phosphorescence plus activement que celle du soleil, et la décharge est plus efficace que la lumière continue de l'arc voltaïque. L'expérience se fait dans des tubes horizontaux, dans lesquels on fait le vide, et qui contiennent une couche de la matière à étudier. On les fait traverser par des décharges d'une machine électrique, d'une batterie ou de la bobine de Ruhmkorff, et une seule décharge suffit pour donner un résultat. — La lumière du magnésium, celle du soufre en combustion, sont aussi très-phosphorogéniques. Enfin, les rayons lunaires produisent une phosphorescence sensible sur les sulfures alcalino-terreux; les effets phosphorogéniques sont donc, comme les effets chimiques et lumineux de ces rayons, beaucoup plus intenses que les effets calorifiques, si difficiles à constater.

2684. Raies du spectre phosphorogénique. — Pour observer ces raies, il faut amplifier considérablement l'étendue du spectre. Pour cela, M. E. Becquerel recevait les rayons dispersés sortant d'une lentille, sur une seconde lentille de 10^{cm} de foyer seulement, placée à une distance plus petite que 10^{cm} du foyer de la première, de sorte que les rayons colorés divergeaient en sortant de la seconde lentille; et il explorait ainsi successivement les différentes parties du spectre, rendu environ dix fois plus long. En opérant ainsi, on voit sur la surface phosphorescente des raies obscures qui occupent les mêmes places que celles des spectres lumineux et chimiques. Pour rendre ces raies plus distinctes, on porte la température à 200 ou 300°; l'éclat augmente et les raies ressortent davantage.

Au moyen de deux spectres parallèles obtenus comme ci-dessus (2660), on a reconnu que les lames, incolores ou colorées, absorbent les rayons phospho-

rogéniques dans les mêmes régions du spectre que les rayons lumineux et chimiques ; d'où l'on conclut, ainsi que de ce qui précède, et surtout de la coïncidence des raies, que les rayons phosphorogéniques ne sont pas plus distincts des rayons lumineux, que les rayons chimiques et calorifiques de même réfrangibilité.

2685. Corps phosphorescents par insolation. — M. E. Becquerel a fait des recherches très-étendues sur la phosphorescence excitée par la lumière solaire¹. Il a reconnu d'abord que les matières que les rayons solaires rendent lumineuses sont beaucoup plus nombreuses qu'on ne l'avait cru : 1° en première ligne sont les sulfures alcalino-terreux : de *baryum*, *calcium*, *strontium*, connus sous le nom de *phosphores artificiels* ; 2° viennent ensuite quelques minéraux, certains *diamants*, des échantillons de *fluorure de calcium*, principalement la variété nommée *chlorophane* ; 3° un très-grand nombre de minéraux et sels, le plus souvent à base alcaline ou terreuse, mais qui ne luisent que quelques secondes et rarement quelques minutes ; par exemple, l'*aragonite*, les *calcaires concrétionnés*, le *chlorure de baryum*, les cristaux de *sulfate* et *carbonate de strontiane* ou de *baryte*, etc. ; les *carbonates de magnésie*, de *glucyne*, les *chlorures de potassium*, de *sodium* desséchés, etc.

Influence de l'état physique. — La phosphorescence paraît dépendre de l'état moléculaire des corps, en même temps que de leur nature. C'est ainsi que certains diamants sont phosphorescents par insolation, tandis que les autres variétés du carbone ne le sont pas. Les variétés de *carbonate de chaux* ne sont pas phosphorescentes ou le sont à divers degrés. L'*azotate de chaux*, les *chlorures de calcium*, de *sodium*, les *sulfates de soude*, de *potasse*, ne le sont plus quand ils sont dissous, le deviennent quand on les dessèche par un courant d'air chaud, et perdent en partie leur propriété quand on les fond, pour la reprendre au même degré en passant de nouveau par l'état de dissolution. La présence de l'eau de cristallisation peut aussi empêcher la phosphorescence. — Les corps renfermés dans des tubes remplis de divers gaz ou dans lesquels on a fait le vide, conservent leur propriété de luire sous l'action des rayons lumineux ; ce qui prouve qu'il n'y a pas d'action chimique.

La couleur de la lumière émise par une même substance dépend de la manière dont elle a été préparée ; ce qui se remarque surtout chez les sulfures. Il faut généralement qu'ils aient été préparés par la voie sèche, à une température élevée, mais pas trop élevée. La chaleur peut, suivant la température, faire acquérir temporairement à quelques corps la propriété de luire avec les diverses couleurs du spectre ; et ces corps reproduisent la couleur primitive, quand on les ramène à la température ambiante.

Durée de l'émission. — La durée de l'émission de la lumière phosphorescente n'est pas en rapport avec son intensité à un instant donné. Par exemple, le sulfure de strontium est encore lumineux après 30 heures, quoique, au premier moment, la lumière qu'il émet soit beaucoup plus faible que celle d'une

¹ *Annales de chimie et de physique*, t. LV, LVII, LXII, et la *Lumière*, t. I.

fole d'autres corps qui cessent de luire après quelques minutes. Du reste, la durée dépend de la température, et diminue quand elle augmente, la même somme de lumière étant dépensée plus rapidement.

2686. Phosphoroscope. — Beaucoup de substances perdant leur phosphorescence quelques secondes après l'action des rayons excitateurs, M. E. Becquerel a pensé qu'il pouvait y en avoir en luisant que pendant un temps trop court pour qu'on puisse le constater directement. Il a alors imaginé des appareils, qu'il nomme *phosphoroscopes*, destinés à étudier ces corps. La figure 1883 représente le phosphoroscope *par réflexion*. AC est une boîte cylindrique à bases horizontales, dont une moitié se trouve dans la chambre noire, et l'autre en dehors. Deux ouvertures, *o*, *o'*, sont pratiquées dans la base supérieure : l'une, *o*, laisse arriver les rayons solaires sur le corps *n* ; l'autre, *o'*, permet de voir

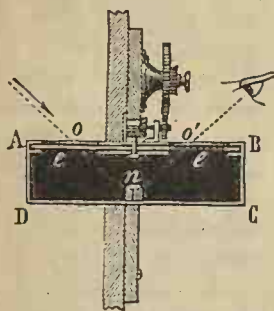


Fig. 1883.

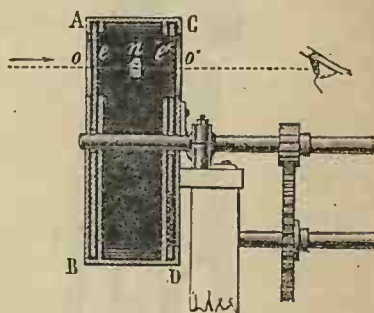


Fig. 1884.

ce corps. Un écran circulaire *ee*, placé sous la base supérieure *AB*, reçoit un mouvement rapide de rotation ; il porte trois ouvertures équidistantes, de manière que, si l'ouverture *o* est en face d'une de celles de l'écran, l'ouverture *o'* soit fermée par cet écran, et *vice versa*. Le corps reçoit donc les rayons solaires seulement pendant un instant, et, une fraction de seconde après, l'observateur voit la lueur que répand ce corps, s'il est phosphorescent. Cela se répète trois fois à chaque tour, et, à cause de la persistance de l'impression dans l'œil, le corps présente une intensité lumineuse constante, et d'autant moins éloignée de sa valeur *maximum* qu'il s'écoule moins de temps entre les fermetures de l'ouverture *o*, temps qui peut n'être que $\frac{1}{5000}$ de seconde.

Dans le phosphoroscope *par transmission*, les bases de la boîte cylindrique *AD* (*fig. 1884*) sont verticales et munies d'ouvertures, *o*, *o'*, placées en face l'une de l'autre. Deux écrans, *e*, *e'*, tournant sur le même arbre, portent quatre échancrures, placées de manière que l'ouverture *o* soit fermée pendant que *o'* est ouverte, et *vice versa*. Le corps, placé en *n*, reçoit les rayons solaires, et est aperçu par l'observateur, alternativement. On peut faire tomber sur ce corps des rayons concentrés par une lentille ou dispersés par un prisme. La figure 1885

représente l'ensemble du modèle de phosphoroscope par transmission que construit M. J. Duboscq.

Résultats. — Voici quelques-uns des résultats obtenus par M. E. Becquerel, au moyen de ces appareils, dont il a beaucoup varié les dispositions : 1^o Le phosphoroscope permet de constater la phosphorescence d'une foule de corps qui n'en donnent aucun signe quand on emploie les méthodes ordinaires; par exemple le spath d'Islande, le marbre de Carrare, le stint, la porcelaine vernie, etc. Il y a des corps, particulièrement les métaux, qui ne paraissent pas phosphorescents, même avec le secours du phosphoroscope.

2^o Les rayons émis par les corps phosphorescents peuvent exciter, quoique faiblement, la phosphorescence des sulfures alcalins, surtout quand les rayons sont violets ou bleus. Ils peuvent aussi produire des actions chimiques, et ce sont encore les rayons de la couleur la plus réfrangible qui agissent le plus promptement. On obtient sur du collodion l'image de l'ouverture *o'* (fig. 1884), au bout de 30 à 45 minutes, quand on place en *n* du sulfure bleu de strontium ou de calcium, ou de l'azotate d'urane.

3^o L'intensité des rayons phosphorescents est proportionnelle à celle des rayons excitateurs, dont elle n'est que les 2 millièmes au plus. — Il suffit, pour produire l'action, d'une fraction



Fig. 1885. — 1/6.

de seconde, d'autant plus grande que les rayons incidents sont plus faibles. L'affaiblissement, d'abord rapide, puis de plus en plus lent; se fait suivant une loi semblable à celle de Newton pour le refroidissement (II, 894). Il y a des corps (diamant, silicate de chaux, fluorure de calcium) qui changent 2 ou 3 fois de couleur pendant l'affaiblissement des rayons émis, certains rayons s'affaiblissent plus rapidement que d'autres.

2687. Applications. — M. E. Becquerel a fait de nombreuses expériences sur la préparation des composés phosphorescents par la lumière; sur les proportions les plus favorables des matières mises en présence; sur la température à laquelle il faut les calciner... Nous avons parlé plus haut (2394), des fleurs,

des dessins phosphorescents; on les fabrique en enduisant d'un peu d'eau gommée les surfaces qu'on veut rendre lumineuses, et l'on dépose différentes poudres phosphorescentes sur cet enduit, de manière à obtenir des lueurs de diverses couleurs, après exposition des objets à la lumière du jour ou à celle de l'électricité ou du magnésium.

M. E. Becquerel a aussi analysé, au moyen du spectroscope, la lumière phosphorique de divers corps placés dans le phosphoscope de transmission¹. Il a trouvé, le plus souvent, des spectres composés de bandes assez étroites, séparées par des espaces sombres. Certains corps (diamant, spath d'Islande, aragonite) ont donné des spectres continus, mais faibles; pour d'autres substances, le spectre présentait une partie composée de bandes séparées, suivie d'une partie continue plus réfrangible.

II. Fluorescence.

2688. Définitions. — Certains corps, pendant qu'ils sont vivement éclairés par les sources riches en rayons très-réfrangible, répandent dans tous les sens des lueurs vives, dont la couleur est souvent différente de celle de la lumière incidente. Ce phénomène s'observe sur les dissolutions dans l'eau ou l'alcool, de sulfate de quinine, d'esculine, de gâfac, de chlorophylle; sur les teintures de curcuma, d'orseille, de tournesol, et sur une foule d'infusions de matières organisées; sur des verres colorés ou non, principalement sur le verre d'urane, sur le spath-fluor, etc.

D'après Boyle, les premiers faits de ce genre ont été observés par N. Monarde sur une infusion de bois de santal bleu; puis, par Musschenbroeck, sur le pétrole. Ce phénomène, qui a attiré l'attention de Newton, a ensuite été étudié par Brewster, sur des verres colorés et diverses infusions, principalement celles de feuilles de laurier dans l'alcool, et par J. Herschell sur des solutions de bisulfate de quinine. Plusieurs minéralogistes, entre autres Haüy, avaient remarqué que certains échantillons de spath-fluor présentaient, à la lumière du jour, des reflets bleus; de là le nom de *fluorescence* donné à ce genre de phénomènes, par M. Stokes, qui s'est tout particulièrement attaché à la recherche des conditions et des circonstances de sa production, et a fortement attiré l'attention sur lui par l'interprétation qu'il en a donnée².

2689. Faits généraux. — Les rayons du spectre qui produisent la *fluorescence* sont les plus réfrangibles, bleus, violets et ultra-violet, ce que l'on voit directement en projetant un spectre pur sur la surface d'un liquide fluorescent; on voit le phénomène ne se manifester qu'à partir de la raie G, et jusque dans la partie obscure qui suit le violet, comme pour les effets chimiques; et l'on peut ainsi rendre sensibles à la vue les radiations obscures ultra-violettes. M. Stokes

¹ *La Lumière, ses causes et ses effets*, t. I, p. 334.

² *Trans. phil.* (1852), p. 463, et *Ann. de chimie et de phys.*, 3^e s., t. XXXVIII, p. 491.

a remarqué dans la partie obscure du spectre rendue ainsi visible par projection sur le sulfate de quinine, des raies sombres occupant les mêmes places que celles du spectre chimique. On peut les observer sur des feuilles de papier enduites d'une solution de sulfate de quinine, de datura stramonium; avec la première, les raies se détachent sur un fond bleu, et sur un fond vert avec la seconde; il est bon, pour bien les distinguer, de cacher la partie la plus brillante du spectre. Très-peu de corps sont fluorescents sous l'influence de rayons moins réfringibles que les rayons verts, de sorte que des verres jaunes ou rouges, placés dans le trajet des rayons excitateurs, éteignent aussitôt la fluorescence; tandis que des verres violets la rendent plus sensible, en arrêtant les rayons inefficaces, qui ne font que mêler leur lumière à celle qu'on veut observer. — Quand on se sert de prismes ou de lentilles, dans ces sortes d'expériences, il faut qu'ils soient en quartz, cette matière absorbant très-peu les rayons les plus réfringibles.

M. E. Becquerel montre d'une manière piquante la fluorescence produite par les rayons violets sur certaines infusions : on fait flotter sur l'eau, dans un vase de verre, un fragment d'écorce de marronnier d'Inde; une traînée invisible de matière dissoute descend à travers le liquide, et apparaît en répandant une lueur vive, dès qu'on projette dans le liquide un faisceau de lumière solaire ayant traversé un verre violet. Si l'on interpose un verre jaune, qui intercepte les rayons les plus réfringibles, tout effet disparaît. La flamme jaune du pyroxile, de l'alcool salé, ne produisent presque jamais la fluorescence.

La lumière électrique, si riche en rayons très-réfringibles, est très-propre à montrer la fluorescence d'une foule de corps : si l'on forme sur du papier, au moyen d'une dissolution de sulfate de quinine, un dessin invisible, il apparaît sous forme lumineuse dès qu'on l'éclaire au moyen de la lumière électrique. Nous avons vu (2675) comment M. Gladstone fixe ce dessin sur collodion, dans la chambre noire, et fait ainsi la photographie de l'invisible.

Les parois des tubes de Geissler deviennent fluorescentes et prennent un éclat particulier pendant le passage des décharges d'induction. On varie beaucoup les effets brillants produits par ces tubes, en y introduisant d'autres tubes plus étroits, contournés de différentes façons et contenant des solutions fluorescentes de chlorophylle, de sulfate de quinine, d'azotate d'urane...; ces tubes intérieurs, fermés avec soin, émettent des rayons fluorescents rouges, bleus, verts. Si le tube intérieur est en verre d'urane et vide, il répand une lumière verte assez intense pour qu'on puisse l'utiliser dans les mines et pour l'éclairage sous l'eau.

La lumière du magnésium, celle du sulfure de carbone brûlant dans le bioxyde d'azote, du soufre dans l'oxygène, si riches en rayons chimiques, excitent aussi la fluorescence de beaucoup de corps.

2690. Corps fluorescents. — Pour reconnaître si un corps est fluorescent, on fait tomber sur lui, soit un spectre pur, dans les différentes régions duquel on fait passer le corps, soit certains rayons isolés par une fente et concentrés par une lentille. — Pour les corps peu sensibles, M. Stokes emploie le moyen suivant : La lumière, arrivant par une fente *perpendiculaire*

aux arêtes d'un prisme, donne un spectre impur, mais étroit et très-brillant, qu'on fait tomber sur la matière à étudier. On observe ce spectre linéaire, RV (fig. 1886), à travers un second prisme parallèle à sa longueur, qui le relève obliquement en R'V'. Si la substance émet des rayons phosphorescents, ces rayons, en général moins réfringibles que les rayons excitateurs venus des mêmes points du spectre RV, forment une sorte de spectre large, *vr*, présentant des bandes sombres parallèles au plan de réfraction du second prisme, partout où il n'y a pas de rayons excitateurs. Cette méthode a permis d'observer la fluorescence sur une foule de substances, telles que le bois, la corne, les os, les coquilles blanches, le cuir; la peau de la main, les ongles, les feuilles. — Les fleurs colorées, les métaux, le charbon, le soufre, le quartz, le spath d'Islande, le marbre blanc... n'en donnent aucun signe.

Dans le cas des liquides, de fines parcelles en suspension peuvent donner lieu à une illumination intérieure simulant la fluorescence. On se met à l'abri de cette cause d'erreur par le moyen suivant : on fait tomber un faisceau de lumière bleue ou violette sur un verre jaune, qui l'intercepte presque complètement. Si l'on place avant ce verre jaune un corps fluorescent, les rayons qu'il émet traversent le verre jaune, et l'on voit ce corps illuminé, au milieu de l'obscurité qui l'enveloppe.

L'état des corps peut avoir de l'influence sur leur sensibilité. Si on les dissout, elle peut ne pas changer (curcuma), mais elle

peut aussi être de beaucoup augmentée (sulfate de quinine, esculine); le rouge de naphthaline n'est même fluorescent que dissous. Au contraire, les composés d'uranium sont plus fluorescents à l'état solide, et les platinocyanures ne le sont pas du tout en dissolution.

La nature du dissolvant a généralement de l'influence sur le résultat. D'après M. Ch. Horner, les matières extraites du bois de Campêche, du safran des Indes, non fluorescentes dans l'eau et l'alcool, le sont quand on les dissout dans l'huile de ricin.

La chaleur agit aussi : la solution d'azotate d'urane dans l'eau est moins fluorescente à chaud qu'à froid, et le verre d'urane perd momentanément sa propriété quand on le chauffe fortement.

2691. Lois et origine de la fluorescence. — J. Herschell a constaté que les rayons qui excitent la fluorescence, sont éteints en la produisant. Cela résulte d'abord de ce que la fluorescence produite par réflexion ne se montre que près de la surface par laquelle pénètre la lumière, d'où le nom de *diffusion épipolique* qu'Herschell donnait au phénomène. On reconnaît aussi, directement, que les rayons qui ont traversé un milieu fluorescent, comme le sulfate de quinine, ne peuvent plus exciter la fluorescence. Enfin, en étudiant ces rayons

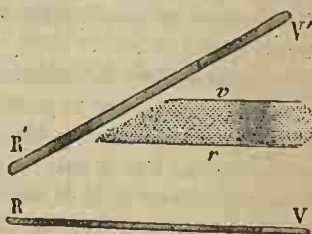


Fig. 1886.

au spectroscope, on trouve qu'il y manque les rayons les plus réfrangibles. Ces faits sont analogues à ceux que nous présentent les vapeurs incandescentes, qui absorbent les rayons de l'espèce qu'elles émettent (2644), et ils expliquent l'emploi des solutions de sulfate de quinine pour arrêter les rayons chimiques obscurs (2679).

Loi de Stokes. — M. Stokes, dès le principe, avait émis cette loi, que *la réfrangibilité des rayons émis par fluorescence est moindre que celle des rayons excitateurs, ou tout au plus égale*. Il interprète ce résultat en supposant que les rayons excitateurs se transforment en rayons moins réfrangibles, c'est-à-dire qu'ils impriment aux molécules du milieu qu'ils traversent, des vibrations plus lentes, en perdant leur force vive, comme nous venons de le voir. Par exemple, M. Stokes ayant fait passer par une fente les rayons bleus d'un spectre pur, et les ayant concentrés au moyen d'une lentille sur du sulfate de quinine, celui-ci émit de la lumière rouge; la fente ayant été rapprochée du violet, cette lumière se mêla de jaune, puis de vert, enfin elle prit une teinte verdâtre, quand la fente laissa passer les rayons indigos, et ne devint bleue que sous l'influence des rayons violets.

La loi de Stokes a été contestée par divers physiciens, entre autres MM. Pierre et Lommel, mais il faut de grandes précautions pour n'être pas induit en erreur par de la lumière diffuse mêlée aux rayons excitateurs. D'autres physiciens, en opérant sur les mêmes matières et en opérant sur des rayons excitateurs très-purs, ont retrouvé la loi de Stokes, qui peut être regardée, dans l'état actuel de la science, comme solidement établie. — Nous avons cité, sous le nom de *calorescence* (II, 893) une loi analogue relative à la chaleur rayonnante, seulement les rayons engendrés sont plus réfrangibles que les rayons excitateurs.

M. E. Becquerel, qui avait remarqué que les rayons phosphorescents sont toujours moins réfrangibles que les rayons excitateurs (2682), considère la *fluorescence* comme un effet de *phosphorescence* durant trop peu de temps pour qu'on puisse l'observer après la suppression des rayons excitateurs, même en s'aidant du phosphoroscope. En effet, les raies du spectre fluorescent sont placées de la même manière que celles du spectre chimique, et quand un corps est à la fois phosphorescent et fluorescent par les mêmes rayons excitateurs, il émet dans les deux cas des rayons de la même couleur, et son spectre présente les mêmes bandes colorées. Quoi qu'il en soit, ce cas particulier de phosphorescence se produit avec des conditions trop remarquables pour qu'il n'ait pas été nécessaire de le désigner par un nom particulier.

M. Lallemand, à la suite d'expériences sur lesquelles nous aurons à revenir quand nous étudierons le système des ondulations, a été conduit à distinguer deux sortes de fluorescences. L'une qu'il nomme *isochromatique*, dans laquelle chaque rayon simple traversant un milieu, produit une fluorescence de même couleur que lui, excepté pour les rayons les plus réfrangibles qui peuvent donner des rayons fluorescents faibles et moins réfrangibles (sulfure de carbone pur, alcool, éther, benzine, etc.); l'autre où les rayons fluorescents sont moins

réfrangibles que les excitateurs, comme pour le sulfate de quinine, et qu'il nomme fluorescence *quinique*, ou *hypochromatique*. Il conclut que la fluorescence est un phénomène général, et il ne trouve que le quartz et le sel gemme avec lesquels il ne l'ait pas aperçue.

2692. Oculaire fluorescent. — Pour étudier les raies de la partie ultra-violet du spectre, on n'avait autrefois d'autre moyen que d'en faire la photographie, en ayant soin, pour éviter l'absorption des rayons les plus réfrangibles, de se servir de lentilles de quartz, et de prismes en spath d'Islande, le quartz ayant une trop faible dispersion; cette manière de procéder est longue et compliquée. — M. L. Soret a imaginé d'observer ces rayons ultra-violet au moyen de la fluorescence qu'ils produisent¹. Il dispose au foyer de la lunette du spectroscope à lentilles de quartz et prismes de spath, une lame mince en verre d'Urane, qui devient fluorescente par la rencontre du spectre ultra-violet, et le rend visible avec ses raies. Comme les effets lumineux de certains rayons excitateurs pourraient empêcher de bien distinguer la fluorescence, M. Soret dirige l'oculaire obliquement à l'axe de la lunette, de manière qu'il ne puisse recevoir les rayons lumineux directs. Cet oculaire est donc articulé sur le tube qui le porte et peut être fixé dans une position oblique, au moyen d'une vis de pression. Deux traits gravés sur le verre d'Urane servent de réticule.

On peut employer différentes lames fluorescentes. Avec le verre d'Urane le spectre fluorescent se voit de la raie G (page 270) jusqu'à M et au delà; il est très-brillant vers H. Avec une couche de solution de sulfate de quinine, de 0^m,5 d'épaisseur, le spectre présente beaucoup d'éclat et l'on distingue les raies jusqu'à N et au delà. Une solution étendue d'esculine donne le spectre le plus intense, allant de la limite du bleu à la raie O.

Si l'on opère sur les rayons solaires, le spectre fluorescent est d'autant plus brillant que le soleil est plus éloigné de l'horizon et l'air plus pur, comme sur les montagnes. M. Soret, sur la Dent-du-Midi (3180^m, Valais), a vu le spectre très-beau, mais pas plus étendu, d'où il a conclu qu'il n'y a pas de radiations plus réfrangibles que celles qu'on observe au fond des vallées. Le spectre ultra-violet des métaux, formé dans l'arc voltaïque, peut être étudié par les mêmes moyens. La fluorescence que produit celui du fer est particulièrement très-brillante.

§ 4. — EFFETS PHYSIQUES DIVERS. — RADIOMÈTRE

2693. Effets moléculaires. — Nous réunissons dans ce dernier paragraphe divers effets des radiations qui n'ont pu être classés dans les premières subdivisions de ce chapitre, et qui se présentent presque toutes avec certaines obscurités qui n'ont pu être encore complètement éclaircies.

¹ *Bibli. de Genève* (Arch. des sc.), t. XLIX, p. 338, et *Ann. de ch. et de phys.*, 5^e série, t. XI, p. 72.

Matières organiques. — Voici d'abord quelques effets dans lesquels il y a peut-être action chimique ou intervention de la chaleur. Les anciens avaient remarqué que les améthystes, les opales, perdent leur brillant par une longue insolation. Pelouze a reconnu que le verre se colore peu à peu par la même cause, quand il renferme de petites quantités de fer et de manganèse; la chaleur peut faire disparaître cette coloration. Faraday a vu le verre pourpre contenant du manganèse, prendre une teinte plus prononcée par l'action des rayons solaires.

La lumière altère les fibres des tissus, et use rapidement le linge, qui se conserve beaucoup plus longtemps quand on le fait sécher à l'ombre ou mieux dans l'obscurité; nous avons vu le rôle que joue l'*ozone* dans ces sortes d'effets (III, 2012). — N. de Saint-Victor expose à la lumière une feuille de papier collée à l'amidon; après quelques heures, l'encollage est détruit, et le papier se comporte comme papier buvard. Nous avons déjà cité la transformation de l'amidon en dextrine, puis en sucre (2662). — Le vin, exposé à la lumière solaire dans une bouteille de verre blanc bien bouchée, devient, au bout de quelques jours plus doux, et peut prendre la qualité du vin vieux; mais, si l'on attend trop, il peut contracter un mauvais goût. La chaleur et diverses actions chimiques obscures peuvent intervenir, ici, pour changer l'arrangement relatif des molécules. — Nous avons vu comment la lumière modifie la solubilité de la gélatine bichromatée, et le parti qu'on en a tiré dans l'héliogravure (2678).

Soufre, phosphore. — MM. Garnier et Salmon ont reconnu que le soufre, exposé à la lumière solaire, subit une modification moléculaire telle, que les vapeurs de mercure se fixent sur les parties qui ont reçu l'action de la lumière, en formant un sulfure brun-jaunâtre; les parties qui n'ont pas reçu cette action ne retenant pas le mercure.

Le soufre dissous dans le sulfure de carbone absorbe la moitié la plus réfringente des rayons du spectre, à partir de G, et se transforme en soufre insoluble. Le phosphore, dans les mêmes conditions, absorbe les rayons ultra-violet, et se change en *phosphore rouge* ou phosphore amorphe, par suite d'un groupement particulier des molécules que la chaleur peut également produire. Cette transformation du phosphore par la lumière peut se faire dans divers gaz, et même dans le vide barométrique. Vogel a constaté que les rayons violets la produisent rapidement, et les rayons rouges très-lentement.

2694. Propriétés du sélénium. — Le sélénium, quand il a été fondu, est un peu conducteur de l'électricité; mais, si alors on l'expose à la lumière, sa conductibilité augmente subitement et à peu près proportionnellement à l'intensité de cette lumière, et peut devenir six ou sept fois plus grande. Dès que la lumière cesse d'agir, la conductibilité reprend sa première valeur. Ce résultat curieux, découvert par M. May, ne peut être attribué à la chaleur; car, si l'on place une baguette de sélénium dans un vase d'eau que l'on chauffe plus ou moins, la conductibilité ne change pas, tandis qu'elle augmente beaucoup quand la baguette est placée dans une boîte, dont on retire peu à peu le couvercle pour laisser entrer la lumière.

M. Siemens a appliqué cette propriété à une sorte de télégraphe électrique, dont le manipulateur est formé de deux réseaux en fil de platine se croisant sur une lame de verre sans se toucher, et mis en communication par une goutte de sélénium qui ferme le circuit. Un faisceau de lumière projeté sur le sélénium fait varier la résistance électrique de ce dernier, et, par suite, la déviation de l'aiguille d'un rhéomètre servant de récepteur. Quand on éloigne le faisceau, l'aiguille se déplace en sens inverse.

Citons encore l'*œil artificiel* du même inventeur. Un petit globe creux de verre présente deux ouvertures opposées : à l'une est adaptée une lentille convergente, et à l'autre une lame de sélénium qui ferme un circuit de pile passant par un rhéomètre situé au loin. Suivant l'éclat, et, par suite, jusqu'à un certain point, la couleur, des corps éclairés présentés à cet œil artificiel, l'aiguille aimantée est plus ou moins déviée. Deux écrans courbes peuvent s'abaisser devant la lentille ; ils sont mis en mouvement par des électro-aimants animés par le courant même, de manière que les écrans s'abaissent, comme des paupières, quand le courant intense indique qu'une lumière trop vive est projetée sur la lame de sélénium, et se relèvent quand la lumière, plus faible, laisse au sélénium une plus grande résistance.

2695. RADIOMÈTRE. — M. Crookes a découvert et étudié avec une grande persévérance certains effets mécaniques provoqués par les radiations, et qui ont beaucoup intrigué les physiiciens. Dans un premier travail publié en 1873¹, il montre que de petites balles ou des disques de métal, verre, ivoire, charbon, moelle de sureau, liège..., fixés à un mince levier suspendu horizontalement à un fil sans torsion, dans un petit ballon surmonté d'un tube vertical, sont attirés par un corps chaud présenté extérieurement, quand le tube est plein de gaz, et sont repoussés quand ce gaz a été très-raréfié à partir d'une limite qui dépend de sa nature et de celle du disque. Par exemple, la pression doit être inférieure à 12^{mm} quand le disque est fait de matière légère, et à 0^{mm},1 quand il est en métal pesant.

M. Crookes a aussi reconnu que les surfaces noircies sont plus fortement repoussées que les surfaces brillantes, par les rayons obscurs ayant plus de 250° de température. Il a alors imaginé de placer des lames, noircies d'un seul et même côté, aux extrémités des quatre bras d'un moulinet très-mobile. On voit (fig. 1887) le mode de suspension habituellement employé aujourd'hui. Le moulinet, *m*, repose sur une pointe d'acier au moyen d'une chape en verre qui entre par le haut dans un tube fixe, *t*, dit *tube de garde*, sans le toucher, pour empêcher ce moulinet de tomber pendant le transport. Après avoir fait le vide dans le vase de verre, on l'a scellé à la lampe. Exposé aux radiations calorifiques ou lumineuses, le moulinet tourne avec une vitesse qui dépend de l'intensité et de la nature de ces radiations, dont la surface noircie s'éloigne. Aux rayons solaires, la vitesse est telle qu'on ne distingue plus les ailettes.

¹ *Philosophical Magazine*, t. XLVIII, p. 65.

Dans l'appareil (fig. 1887), il y a deux moulinets, dont les ailettes, noircies d'une manière opposée, tournent en sens inverse, ce qui montre que le mouvement n'est pas dû à des courants du gaz restant dans l'appareil.

M. Crookes pensait pouvoir mesurer l'intensité des radiations par les vitesses de rotation; de là le nom de *radiomètre* qu'il a donné à l'appareil, nom sous lequel il est bientôt devenu populaire.

2696. Circonstances qui modifient les résultats. — Au moyen des diverses parties d'un spectre pur, on a reconnu que tous les rayons colorés agissent sur les ailettes, mais inégalement, l'énergie d'action allant en diminuant des rayons rouges aux violets. Comme les premiers produisent les effets calorifiques les plus prononcés, on est porté à attribuer la rotation des ailettes à la chaleur qui accompagne les radiations. Cette manière de voir a été appuyée sur beaucoup d'expériences. Ainsi, M. Poggendorff, ayant fait passer les rayons solaires à travers un verre noir diathermane, et M. Crookes, à travers une couche de sulfure de carbone ioduré, qui arrêtent les rayons lumineux, ils ont obtenu une rotation rapide; tandis que MM. Dewar et Tait n'en ont obtenu qu'une très-lente en faisant passer les rayons à travers une masse d'eau, qui n'arrête pas la lumière et absorbe la chaleur obscure. M. Crookes a obtenu le même résultat en employant une lame d'alun, qui agit comme l'eau, ou une couche d'eau céleste, qui ne laisse passer que les rayons violets, dont l'action calorifique est très-faible. — Si, au lieu d'un corps chaud, on approche un corps froid; la rotation change de sens. M. Crookes approche un morceau de glace, M. de Flonvielle plonge l'appareil dans l'eau glacée, et M. Ducretet le refroidit en y versant de l'éther.

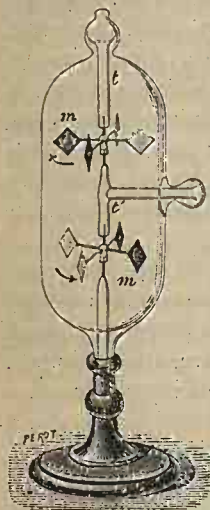


Fig. 1887.

Les vitesses sont d'autant plus grandes, toutes circonstances égales d'ailleurs, que le vide est plus parfait. M. Crookes, puis MM. Dewar et Tait, en ont obtenu de très-rapides dans le vide isolant pour l'électricité (III, 1695). Mais il y a cependant une limite au-dessous de laquelle la vitesse va en diminuant; par exemple, dans une expérience, M. Crookes a trouvé un *maximum* de vitesse quand la pression était de 0^{mm},03. M. Alvergnat, ayant fait le vide dans l'instrument porté à 440° dans la vapeur de soufre, vit le moulinet rester en repos sous l'influence de radiations qui le faisaient tourner vivement quand il y avait quelques traces de gaz. Ayant fait rentrer un peu d'air, le mouvement se produisit de nouveau.

2697. Des causes de la rotation. — L'attraction apparente que produisent les radiations chaudes dans l'air à la pression ordinaire, a été expliquée par l'échauffement des surfaces et le mouvement ascendant du gaz qui les

touche produisant une diminution de pression en avant, explication qui a été confirmée par de nombreuses expériences de M. Niecens. Dans le cas d'un espace vide, la répulsion apparente qui se manifeste alors avait été attribuée d'abord, par M. Crookes, à une action mécanique et directe des radiations. On avait aussi invoqué la réaction de traces de gaz ou de vapeurs adhérant aux lames, et que la chaleur faisait dégager; des mouvements dans la petite quantité de gaz restant... De nombreuses expériences, par exemple avec des appareils dont on avait extrait les gaz à une haute température, et celle des deux moulinets inverses, ont fait abandonner ces différentes explications.

MM. Dewar et Tait ont montré qu'il y a une différence de température entre les deux faces des ailettes. Si on les fait en sel gemme, qui est très-diathermane, il n'y a pas de mouvement. Si le sel gemme est couvert d'une couche de noir de fumée du côté opposé à la radiation, il est échauffé par cette couche bien plus que la surface postérieure de celle-ci à cause de sa faible conductibilité, et il y a répulsion. — Si l'on remplace le noir de fumée par une couche de phosphore blanc, et qu'on emploie des rayons violets, ceux-ci sont absorbés par le phosphore, et le transforment en phosphore rouge avec dégagement de chaleur, et, la face opposée à la source rayonnante étant la plus chaude, la lame marche vers cette source. — M. E. Wartmann a obtenu la rotation inverse en concentrant les rayons sur les faces blanches, pendant que les autres étaient abritées. On conçoit que, suivant la nature des radiations, une même face puisse être plus absorbante que l'autre, ou *vice versa* (II, 911). Ainsi, M. Crookes, qui a expérimenté sur différentes poudres appliquées sur des palettes de formes variées, a vu, sur des ailettes garnies d'un côté de poudre d'oxyde de chrome, et de l'autre de sélénium, le sens de la rotation changer, suivant qu'il employait les rayons directs d'une flamme, ou ces rayons ayant traversé une couche d'eau. Avec des poudres de safran ou d'hydroxyde de zinc, les rayons de la flamme ne produisaient pas la rotation, qui se manifestait dès qu'on interposait les couches d'eau. — On voit facilement pourquoi le froid fait tourner les ailettes en sens inverse : elles se refroidissent, et le pouvoir émissif de chacune de leurs faces est égal à son pouvoir absorbant.

Aujourd'hui, il est bien établi que la rotation est due à une cause résidant dans l'intérieur de l'appareil. M. Schuster, en 1876, a fait remarquer que, s'il en est ainsi, en vertu du principe de la réaction égale et opposée à l'action, l'enveloppe de l'appareil doit tendre à tourner en sens contraire des ailettes, tandis que, si la cause venait de l'extérieur, il n'en pourrait être ainsi. Or, ayant suspendu l'appareil par un système bifilaire muni d'un petit miroir pour observer les déviations au moyen d'un rayon réfléchi (III, 2322), il vit l'enveloppe tourner d'un certain angle en sens contraire de la rotation du moulinet.

M. Salet montre la réaction intérieure, en suspendant horizontalement sur une pointe, un disque de mica placé entre les deux moulinets fixes d'un appareil posé sur son pied. Quand la lumière le frappe, le disque de mica tourne en sens contraire du mouvement que prendraient les ailettes si elles étaient libres: Ici, la

lame de mica représente une partie de la paroi. — M. Righi, qui a fait des expériences analogues, ayant suspendu l'appareil, très-mobile, dans la position renversée, de manière que le moulinet appuyé sur le tube de garde ne pût tourner, a constaté que l'enveloppe n'éprouvait aucun déplacement sous l'influence des radiations, la réaction devant être nulle comme l'action. Ces résultats ayant été contestés, MM. Bertin et Garbe ont repris la question, et cherché à prouver, comme l'indique la théorie, que la somme algébrique des moments d'inertie I, I' de l'enveloppe et du moulinet, multipliés respectivement par leurs vitesses angulaires, ω, ω' , est constante, c'est-à-dire que l'on a

$$I\omega + I'\omega' = \text{const.}$$

La constante dépend de l'état initial. Si l'on part de l'état de repos, ω et ω' sont d'abord nuls et par conséquent la constante est égale à zéro, et l'on a $I\omega + I'\omega' = 0$. On voit que ω et ω' sont de signe contraire, et que l'on a $I : I' = \omega' : \omega$ ou $I : I' = 0 : 0'$, 0 et 0' étant les durées d'un tour entier; c'est-à-dire que les temps d'une révolution sont entre eux comme les moments d'inertie. Si on laisse partir le vase quand la vitesse du moulinet est ω'' , on a d'abord $\omega = 0$ et $\omega' = \omega''$, la constante est ω'' , et l'équation devient $I\omega + I'\omega' = I'\omega''$. Si la vitesse ω' est uniforme au moment où le vase devient libre, on a constamment $\omega' = \omega''$ et il faut que ω soit constamment nul; le vase reste donc en repos. Si la vitesse ω' va en augmentant, ω' doit être de plus en plus supérieur à ω'' , il faut donc que ω soit négatif; c'est-à-dire que le vase tournera, et de plus en plus vite, en sens contraire des ailettes. — Enfin, si le mouvement des ailettes se ralentit, il faudra que ω devienne positif; le vase tournerait donc dans le même sens que les ailettes.

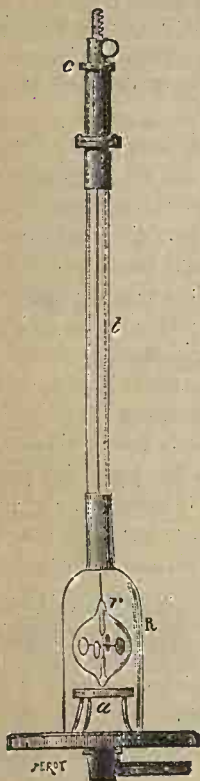


Fig. 1888. — $1/10$.

Pour vérifier ces conséquences, MM. Bertin et Garbe, après un grand nombre d'essais, qui leur ont montré l'influence de la résistance de l'air sur le vase, ont combiné l'appareil (fig. 1888). Le radiomètre, r , est suspendu par un fil de soie sans torsion, attaché à une tige qui traverse en c une boîte à cuir, et que l'on peut abaisser ou élever à volonté au moyen d'une crémaillère à pignon. Un anneau a peut soutenir le radiomètre, dans l'intervalle des expériences, et le recevoir en cas de rupture du fil. Le tout est renfermé dans un tube, t , et une cloche R posée sur la platine d'une machine pneumatique. Sur le globe du radiomètre est tracée une division dont on peut suivre les mouvements au moyen d'une lunette, ou dont on projette l'image ainsi que celle des ailettes, en plaçant

une lentille convergente du côté opposé à la source des rayons lumineux lancés sur l'appareil. Les vitesses des ailettes et du vase sont mesurées à des moments choisis à volonté, au moyen de deux chronomètres. Quand le vide était fait à 6 ou 8^{mm} dans R, le radiomètre pouvait faire plusieurs tours, pendant que les ailettes étaient mises en mouvement par la lumière Drummond. Le rapport des moments d'inertie du moulinet et de l'appareil complet était déterminé au moyen des durées t et t' de leurs oscillations quand ils étaient suspendus successivement à l'extrémité d'un même fil; on avait $(I + I') : I = t^2 : t'^2$, d'où, *componendo*, $I : I' = t^2 - t'^2 : t'^2$. On déduisait la durée d'un tour de l'enveloppe, du temps employé, à différents moments, pour le passage de deux divisions consécutives, et l'on prenait la moyenne des résultats. On faisait de même pour les tours du moulinet. On a trouvé ainsi, avec trois radiomètres différents pour lesquels les rapports des moments d'inertie étaient 17, 45 et 77, les rapports des vitesses de rotation 17,3; 47,5 et 81,7, nombres un peu trop grands, ce qui indique que la vitesse du vase était diminuée par l'air restant dans le récipient, et par la résistance à la torsion, du fil de suspension. Les résultats sont donc aussi satisfaisants que possible, et ils prouvent que le mouvement des ailettes est produit par une cause intérieure. Il reste à chercher quelle est cette cause intérieure, et à expliquer comment les radiations la mettent en action.

2698. Théorie du radiomètre. — On est généralement d'accord pour attribuer la rotation des ailettes à la présence du gaz résiduel en très-petite quantité, mis en action par la différence de température des deux faces d'une même palette.

La présence de l'air résiduel est prouvée par diverses expériences. M. Kundt ayant placé au-dessus du moulinet deux disques de mica très-minces, mobiles sur des pointes indépendantes l'une de l'autre, a vu le disque le plus bas tourner en sens contraire des ailettes, puis son mouvement se transmettre peu à peu au disque supérieur par communication à travers l'air résiduel. — M. Crookes ayant suspendu le moulinet par un fil de cocon attaché à un bouchon de verre enduit de caoutchouc et fermant un tube vertical adapté au vase dans lequel était fait le vide, a pu faire tourner ce vase autour du bouchon fixe, et a vu les ailettes suivre le mouvement, entraînées par le gaz résiduel. Ces faits semblent, en outre, montrer que le gaz très-rare présente une sorte de viscosité relativement plus grande que sous des pressions moins faibles.

Voici maintenant comment on rend compte des phénomènes. M. Reynolds, qui, dès le principe, avait repoussé l'idée d'un choc produit par les radiations, a proposé la théorie suivante, qui, appuyée et complétée par divers physiciens, entre autres M. Stoney, a été généralement adoptée. Elle est basée sur l'hypothèse de D. Bernouilli, qui considère les fluides gazeux comme composés de molécules, animées de mouvements rectilignes dirigés dans tous les sens, s'entrechoquant et, par leurs chocs réitérés sur les parois des vases, y produisant l'état de pression (II, 1342). Supposons une des faces d'une ailette, échauffée

par des rayons calorifiques; les molécules d'air qui viennent la frapper en reçoivent, par échauffement, un surcroît de force vive, qui les fait rebondir avec plus d'énergie.

Si l'air est à la pression atmosphérique, les molécules qui ont rebondi rencontrent bientôt d'autres molécules, auxquelles elles cèdent de leur excès de force vive; celles-ci font de même pour les suivantes, de manière que, en un temps insensible, la force vive est partout également répartie, la pression est partout la même, et la palette, repoussée également des deux côtés, reste en repos. Mais si le gaz est très-raréfié, les molécules qui ont rebondi sur la face chaude parcourent un long trajet sans en rencontrer d'autres, vu leur petit nombre, et viennent frapper la paroi, où elles perdent leur excès de force vive; de sorte que le vase contient deux systèmes de molécules, les unes animées des vitesses qui correspondent à la température ambiante, les autres de vitesses plus grandes, après s'être échauffées au contact de la palette; les molécules de ces deux systèmes, se croisant sans généralement se rencontrer, et les molécules qui rebondissent sur la palette, après en avoir reçu un surcroît de force vive, y produisent un mouvement de recul.

Il résulte de là que la grandeur du vase doit avoir une certaine influence sur les résultats, et, en effet, M. Crookes, M. Finkener ont constaté que, plus ses parois sont rapprochées des palettes, plus la vitesse de rotation est grande; toutes choses égales d'ailleurs. L'expérience suivante, de M. Righi, vient aussi à l'appui de la théorie qui précède: si l'on chauffe directement un point de l'enveloppe de verre, on voit les deux palettes voisines se placer à égale distance du point chauffé et osciller autour de cette position si on les en écarte. C'est que le point chauffé est un centre d'où partent des molécules d'air qui en ont reçu un surcroît de vitesse, et viennent frapper les palettes voisines de manière à éloigner les plus rapprochées, jusqu'à ce que les distances soient égales.

La petitesse de la cause qui pousse les palettes, le gaz résiduel étant très-raréfié, semble une difficulté de cette théorie; mais M. Crookes a montré, au moyen de la balance de torsion, que la force qui pousse une palette de 6^{cm} carrés de surface, quand elle est éclairée par une bougie placée à 30^{cm} de distance, n'est que de $\frac{3}{400}$ de milligramme environ. Nous savons aussi que, si le gaz est raréfié au-dessous d'une certaine limite, la vitesse de rotation diminue (2696).

Matière radiante. — M. Crookes a appuyé la théorie qui précède sur des expériences nouvelles dans lesquelles intervient l'électricité¹. Les extrémités de l'enveloppe du radiomètre sont traversées par des électrodes, communiquant avec une bobine d'induction, l'électrode négative étant en bas. L'auréole violette qui entoure cette électrode (III, 2259) en est séparée par une couche sombre, qui devient de plus en plus étendue à mesure qu'on augmente la raréfaction, et finit par atteindre l'électrode positive, à $\frac{1}{4\,000\,000}$ d'atmosphère; alors l'électricité cesse de passer. Si l'on suspend sur l'électrode négative, un moulinet en

¹ Comptes rendus de l'Ac. des sciences, t. LXXXVIII, et Journal de physique, t. IX, p. 30.

aluminium, dont les palettes sont garnies d'un côté par une mince lame de mica, la surface métallique joue le rôle d'électrode d'où part l'espace obscur, qui atteint la surface du verre quand la pression descend à $\frac{1}{2}$ mm. En même temps, le moulinet tourne, la surface brillante allant en reculant, — Si l'on place à part un moulinet à palettes de mica, dans l'ombre qui part de l'électrode rendue immobile, il tourne également, les palettes fuyant l'électrode.

Pour expliquer ces résultats extrêmement remarquables, M. Crookes suppose que les molécules, électrisées par le contact de l'électrode négative, en reçoivent un surcroît de vitesse qui les chasse en ligne droite jusqu'à la rencontre d'une paroi, qu'elles déplacent par leur choc si cette paroi est mobile. Ces molécules sont lancées normalement à la surface de l'électrode; car si celle-ci est terminée par une calotte hémisphérique, les molécules se croisent au centre géométrique, où l'on distingue un foyer violet-foncé, dont la température est telle, que du platine iridié y entre en fusion. — L'endroit où le cône obscur partant de ce foyer rencontre la paroi de verre, devient fluorescent. Le contour de l'intersection est très-nettement délimité, et il en est de même de l'ombre d'un écran découpé. S'il y a assez de gaz pour que la couche violette enveloppe l'électrode, les molécules que celle-ci lance normalement en rencontrent d'autres avant d'arriver à la paroi, en développant la lumière qu'on observe autour de l'électrode négative.

Le foyer calorifique placé au centre de la calotte sphérique peut être déplacé au moyen d'un aimant extérieur. Si on l'amène à toucher la paroi, le verre est fondu et percé. — Tous ces phénomènes, qui sont indépendants de la position de l'électrode positive, nous font entrevoir des horizons nouveaux et semblent annoncer des découvertes importantes sur la constitution intime de la matière. Déjà M. Cookes, adoptant une idée émise par M. Faraday vers 1816, croit devoir distinguer un quatrième état de la matière, l'état *radiant*, différant de l'état gazeux autant que celui-ci diffère de l'état liquide, par l'excessive rareté de ses molécules, qui peuvent s'élancer en ligne droite sans se heurter ni se gêner mutuellement, en produisant sur les obstacles qu'elles rencontrent, les effets de chaleur et de fluorescence que nous venons de citer, ces derniers donnant la seule lumière qui éclaire alors l'appareil.

Remarque. — On voit que l'explication des phénomènes du radiomètre suppose qu'on admet les idées de Bernouilli sur la constitution des gaz. Il est curieux de voir l'hypothèse de cette constitution recevoir, par réciprocity, une confirmation inattendue de ces phénomènes, qui montrent des effets du choc des molécules sur des ailettes placées dans des conditions particulières. Le petit instrument de M. Crookes a donc une portée théorique plus importante qu'on ne l'avait cru d'abord. Il a reçu aussi diverses applications; par exemple, pour montrer les effets de la chaleur rayonnante, et étudier les diverses thermochroses de ces rayons, en remplaçant le thermomultiplicateur de Melloni, toutes les fois qu'on n'a pas besoin d'obtenir des mesures précises.

CHAPITRE VI

MÉTÉORES LUMINEUX DÉPENDANT DE LA RÉFLEXION
ET DE LA DISPERSION DE LA LUMIÈRE

« Virgula solet fieri vitrea, stricta, vel pluribus angulis
« in modum clave torsa : hæc si ex transverso solem
« accipit, colorem talem qualis in arcu videri solet, reddit. »
(SENEC., *Quest. natural.*, lib. I, cap. VI.)

§ 1. — ABSORPTION, RÉFLEXION ET DISPERSION DE LA LUMIÈRE
PAR L'ATMOSPHÈRE

2699. Absorption de la lumière par l'atmosphère. — L'atmosphère n'est pas parfaitement transparente ; elle absorbe une partie sensible de la lumière qui la traverse. C'est pour cela que les montagnes, vues à une grande distance, paraissent comme dans un brouillard. Cependant, leurs contours sont assez nets quand ils se projettent sur le ciel ; mais, si l'on regarde d'un sommet élevé et par un temps sec l'intérieur d'une vallée profonde, tout y paraît trouble et comme enveloppé d'une fumée bleuâtre, la lumière réfléchie par le fond de la vallée étant peu intense. L'affaiblissement de la lumière par l'atmosphère est dû à plusieurs causes, parmi lesquelles nous citerons : 1^o la présence des particules en suspension d'eau précipitée ou de matières sèches minérales ou organiques, ces dernières formées d'une multitude de sporules, de germes, dont l'atmosphère est infestée, surtout pendant les saisons chaudes ; 2^o les différences de densité des couches, provenant principalement d'une distribution inégale de la température. Il se fait une réflexion en arrière à chaque passage d'une densité à l'autre, ce qui affaiblit le rayon transmis. C'est pourquoi les objets éloignés paraissent troubles quand le soleil frappe la plaine et détruit l'homogénéité de l'air en formant des courants ascendants. C'est par un temps couvert, et surtout après la pluie, que l'atmosphère est le plus transparente, quoique plus humide, les parties d'inégale densité ayant été mélangées par la chute des gouttes d'eau.

L'air pur possède par lui-même la propriété d'absorber un peu de lumière, dont Saussure a cherché, le premier, à évaluer la proportion. De La Rive a fait des expériences sur le même sujet au moyen d'un appareil composé de deux lunettes pouvant s'écarter plus ou moins l'une de l'autre, et n'ayant qu'un seul oculaire dont chaque moitié recevait les rayons d'un des objectifs, rayons qui lui étaient renvoyés par un prisme à réflexion totale. Pour graduer, on couvrait plus ou moins un des objectifs, de manière que les images de deux écrans également

éclairés, mais placés à des distances différentes, parussent égales, vues ainsi avec le même œil. — M. Wild, en 1866, a fait des expériences analogues au moyen d'un photomètre semblable à celui de Babinet, que nous décrirons plus tard. Il a reconnu, entre autres résultats, que l'humidité augmente la faculté absorbante de l'air, pour la lumière comme pour la chaleur (II, 869). Par exemple, l'état hygrométrique étant 0,55 et 0,99, les proportions de lumière transmises, rapportées à une épaisseur d'air de 1^m, ont été 0,9961 et 0,9933.

La coloration du soleil quand il est près de l'horizon, prouve aussi que l'air exerce une véritable absorption; le soleil présente alors une teinte orangée, et son éclat est assez affaibli pour que l'œil puisse le supporter, les rayons ayant à traverser une bien plus grande épaisseur d'air que près du zénith. Nous avons vu des effets semblables se produire pour la chaleur du soleil (II, 1250).

Les vapeurs précipitées, qui sont surtout abondantes dans les couches inférieures de l'atmosphère, contribuent évidemment à la coloration du soleil à l'horizon, auquel elles communiquent une teinte rouge sombre, comme le ferait une lame de verre enfumé. C'est ce qu'a montré M. Forbes, au moyen de vapeur renfermée dans des globes de verre qu'il refroidissait de manière à obtenir un brouillard plus ou moins épais. Cette propriété de la vapeur précipitée peut se vérifier aussi dans ces nuages qui s'échappent des chaudières à vapeur à haute pression, quand ils se projettent sur le soleil. Comme, dans nos climats, il se condense, le soir, beaucoup de vapeurs dans l'atmosphère, on voit pourquoi le soleil couchant est d'un rouge prononcé, tandis que le soleil levant est jaune d'or, les vapeurs précipitées ayant eu le temps de se déposer pendant la nuit. Comme le soleil et l'atmosphère, à l'horizon occidental ou oriental, sont toujours colorés en jaune plus ou moins prononcé, en toute saison et dans tous les climats, on doit admettre que l'air pur, à lui seul, est capable d'exercer une absorption différente sur les divers rayons simples, comme l'attestent, du reste, les raies *telluriques* du spectre solaire (2622). La lumière rouge qui colore la surface de la lune pendant les éclipses totales, provient des rayons solaires réfractés et décomposés dans notre atmosphère et convergeant dans l'ombre terrestre. Dans tous les cas, les rayons les plus réfrangibles sont ceux qui sont les plus absorbés, comme l'a constaté Hassenfratz en formant le spectre solaire à différentes heures du jour, ou en différentes saisons; il a toujours vu les rayons les plus réfrangibles s'affaiblir d'autant plus que le soleil était plus près de l'horizon. Nous avons vu que l'eau a aussi la propriété d'absorber ces sortes de rayons, tandis qu'elle les réfléchit le plus facilement (2594).

2700. Éclat de l'atmosphère par réflexion. — L'atmosphère a la propriété de réfléchir une partie de la lumière qui la traverse. Quand on se trouve sur une hauteur dominant une grande ville, on voit, pendant la nuit, une lueur plus ou moins élevée, provenant de la réflexion, sur l'air, de la lumière du système d'éclairage des rues. Cette réflexion sur l'air concourt à

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. VII, p. 175.

empêcher l'obscurité d'être complète dans les ombres portées pendant le jour, et la lumière répandue en tous sens par des réflexions multiples, donne à l'air un éclat qui empêche de distinguer les étoiles en plein jour; ce qui montre que cette lumière est, au moins, 64 fois plus vive que celle des étoiles (2419). L'éclat de l'air est peu inférieur à celui de la lune, car cet astre se voit en plein jour comme un léger nuage blanc.

Circonstances qui font varier l'éclat de l'atmosphère. — L'éclat de l'air dépend de son état de pureté et augmente quand il y a des particules d'eau ou de matières sèches en suspension. Il dépend aussi de l'épaisseur de la couche d'air. Tous les voyageurs ont remarqué la teinte sombre du ciel sur les hautes montagnes; l'éclat de l'air y est tellement affaibli, que l'on peut, dit-on, y voir les étoiles en plein jour, en se plaçant à l'ombre. Cependant, de Saussure n'a pu constater le fait, qu'il a entendu affirmer par les guides de Chamounix. M. Boussingault n'a pas été plus heureux dans les Andes, quoiqu'il se soit trouvé plusieurs fois dans les conditions les plus favorables.

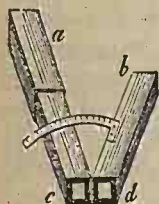


Fig. 1889.

Lucimètre de Bouguer. — Dans un même état de l'atmosphère, et pour une même position de l'observateur, la lumière réfléchie variant avec la distance apparente du point considéré au soleil, Bouguer a comparé les degrés d'illumination des divers points de l'atmosphère, au moyen de son lucimètre (fig. 1889). *ac* et *bd* sont deux tubes de même section, fermés en *c* et *d* avec du papier huilé, et réunis par une charnière qui permet de les écarter l'un de l'autre comme les branches d'un compas. On dirige ces tubes sur les points du ciel que l'on veut comparer, et l'on

allonge le tube *ac*, qui est composé de deux parties rentrant l'une dans l'autre, jusqu'à ce que les deux surfaces *e* et *d* paraissent également éclairées, à l'observateur, dont la tête est enveloppée d'un drap noir. Les diamètres angulaires des parties du ciel qui envoient de la lumière en chaque point des écrans, sont évidemment en raison inverse des longueurs *ac* et *bd*, et par conséquent ces parties du ciel présentent des éclats qui, sont en raison inverse des carrés de ces longueurs. L'appareil de de La Rive, cité plus haut (2699), peut remplacer avec avantage ce lucimètre.

Bouguer a reconnu, au moyen du lucimètre, que l'atmosphère présente son plus grand éclat autour du soleil jusqu'à 3° ou 4°; au-delà, l'éclat diminue. Dans certaines expériences, où l'air était très-pur et le soleil à 25° au-dessus de l'horizon, l'éclat de l'atmosphère s'est trouvé 4 fois plus faible environ, à 31° ou 32° de l'astre qu'à 8° ou 9°. — Le soleil étant à 20° de l'horizon, l'éclat du ciel à la même hauteur, à droite et à gauche de l'astre, allait en diminuant jusqu'à 115° à peu près, puis augmentait jusqu'au point opposé au soleil; il y avait donc deux minimum et un maximum.

Arago a trouvé, par une méthode que nous ferons connaître plus tard, que l'éclat de l'atmosphère est constant jusqu'à une distance angulaire du bord du

soleil égale à son diamètre apparent, et que cet éclat est égal à 0.002 de celui du disque solaire.

2701. Couleur bleue de l'air. — En même temps que l'atmosphère réfléchit les rayons solaires, elle les décompose; de là, la couleur azurée qu'elle nous présente. Cette nuance est d'autant plus prononcée que l'air est plus pur. Quand les neiges des montagnes sont éclairées par les rayons solaires, elles paraissent blanches ou d'une teinte rose ou orangée, suivant la hauteur du soleil; tandis qu'elles présentent souvent une teinte bleuâtre du côté opposé à l'astre. M. Tyndall, qui a observé le lever du soleil du haut du Mont-Blanc, a vu les flancs de la montagne, d'un rouge vif du côté frappé directement par les rayons, et d'un bleu pur du côté opposé. La couleur bleue est donc bien produite par des rayons réfléchis sur les molécules de l'air, et non par des rayons décomposés par transmission.

Cyanomètre. — La teinte bleue de l'atmosphère est variable. Pour l'apprécier, de Saussure traçait, sur une feuille de papier, une bande annulaire divisée en 53 compartiments contenant les *nuances* du bleu passant graduellement du blanc au noir. Il cherchait sur cet anneau, nommé *cyanomètre*, la nuance la plus rapprochée de celle du ciel au point observé. Voici comment il obtenait des cyanomètres comparables entre eux, c'est-à-dire dont les compartiments de même rang avaient exactement la même nuance; il avait remarqué que deux nuances qui diffèrent peu, semblent identiques quand on les regarde d'une certaine distance, qui varie avec l'intensité de la lumière incidente, et il prenait pour distance à laquelle la différence entre deux nuances consécutives disparaissait celle où il cessait de distinguer un point noir de 1 ligne $\frac{3}{4}$ de diamètre, sur une feuille blanche éclairée par la même lumière¹. — Nous décrirons plus tard d'autres *cyanomètres* plus précis fondés sur les propriétés de la lumière polarisée.

Au moyen du cyanomètre, on a constaté que la teinte bleue du ciel est plus prononcée au zénith qu'à l'horizon, et plus foncée après la pluie, l'air étant alors plus pur. Cette teinte est d'autant plus pâle qu'il y a plus de gouttelettes en suspension dans l'air; c'est pourquoi l'air est blanchâtre au-dessus de la mer, et que, sur les continents, un ciel blanchâtre annonce la pluie. La teinte d'un même point du ciel change dans la journée; elle se fonce généralement du matin à midi, et pâlit ensuite de plus en plus. Quand le soleil est près de l'horizon, la couleur du ciel, produite par les rayons transmis, ne présente plus sensiblement de teinte bleue. Par exemple, de Saussure trouva un jour, près du zénith, la teinte n° 23 de son cyanomètre, et celle du n° 4 près de l'horizon. D'après de Humboldt, le bleu du ciel est plus prononcé entre les tropiques, où l'air est pur, que dans les hautes latitudes.

2602. Dispersion atmosphérique. — Nous avons vu que la réfraction atmosphérique fait paraître les astres plus élevés au-dessus de l'horizon qu'ils

¹ *Journal de physique de Lamétherie*, t. XXXVIII, p. 199.

ne le sont réellement (2490). Cette réfraction est accompagnée de *dispersion*, qui se manifeste quelquefois par des stries irisées au bord supérieur du soleil et de la lune rapprochés de l'horizon, et par le spectre vertical que présentent les étoiles les plus brillantes, dans la même position. Ce spectre se distingue nettement dans une lunette, et, si elle ne renverse pas, le rouge se montre en bas et le violet en haut, comme lorsqu'on regarde l'étoile dans un prisme horizontal ayant son sommet en haut.

Bessel, en 1838, a mesuré la hauteur angulaire du spectre de α du Poisson austral (Fomalhaut) et l'a trouvée de $\frac{1}{50}$ environ de la réfraction moyenne : Par exemple, pour une déviation de $14', 54$, elle était de $10'', 32$. M. Struve a trouvé un diamètre angulaire de $22''$ dans le sens vertical, à une distance de $88^{\circ} 33'$ du zénith, et de $8''$ dans le sens horizontal ; ce qui donne $14''$ pour la dispersion réelle. Ces résultats sont assez incertains, le spectre se raccourcissant et s'allongeant rapidement jusqu'à prendre, parfois, une longueur double, et le violet pouvant même se détacher momentanément des autres couleurs. — M. C. Montigny¹ a évalué les indices des rayons des principales couleurs, et a trouvé les résultats moyens suivants :

rouge	jaune	vert-bleu	bleu extrême
1,00029242	1,00029438	1,00029530	1,00029654

Le P. Secchi, puis M. Respighi, ont étudié au spectroscopie, le spectre stellaire atmosphérique. Le spectre produit par le prisme horizontal était un peu plus long quand le sommet était en haut, et un peu plus court quand il était en bas ; c'est qu'on observait ainsi deux spectres superposés, le plus faible formé par l'atmosphère, et le plus étalé, par le spectroscopie ; et ces deux spectres s'ajoutent dans le premier cas, et se détruisent, en partie, dans le second. De plus, quelle que soit la position du sommet du prisme horizontal, le spectre apparaît avec ses principales raies stellaires *fixes*, et l'on voit en même temps comme des ondes lumineuses qui le parcourent en marchant ordinairement vers le rouge quand l'étoile est au couchant, et vers le violet quand elle est au levant. Ces mouvements ondulatoires ne sont qu'apparents et proviennent des variations d'étendue du spectre atmosphérique, dont les couleurs détruisent en partie celles du spectre du prisme, ou s'y ajoutent en les renforçant. La fixité des raies du spectre du prisme vient de ce que les changements de couleur du spectre atmosphérique, dans une direction donnée, sont assez rapides pour qu'une partie produise, en le recomposant, des rayons blancs, que le prisme décompose avec raies, tandis qu'une autre partie donne des rayons colorés formant comme des ondes par leurs variations d'intensité. Quant à la relation entre le sens des déplacements des ondes et la position de l'étoile au levant ou au couchant, elle n'a pas encore été bien expliquée. Cependant, le P. Secchi remarque que, au

¹ Mémoires de l'Académie royale de Belgique, t. XXVI et XXVIII.

couchant, l'air, habituellement, se refroidit et s'abaisse, tandis que c'est le contraire au levant.

2703. Scintillation des étoiles. — La réfraction et la dispersion de l'atmosphère plus ou moins agitée donnent l'explication de la *scintillation* des étoiles. Ce phénomène consiste en variations fréquentes dans leur éclat et leurs dimensions apparentes, accompagnées, pour les plus brillantes, de changements de couleurs. La scintillation a aussi lieu pour les corps lumineux dont le diamètre apparent est insensible; elle s'observe dans l'image très-étroite du soleil produite sur une très-petite sphère; et les planètes, surtout les plus petites, la présentent quelquefois, mais sans couleurs, quand l'air est très-agité. La scintillation est très-vive dans une lunette. Si l'on imprime de petites secousses à l'instrument, comme le faisait Nickolson, on aperçoit un ruban brillant présentant souvent plusieurs couleurs, au même moment; en ses divers points. Le phénomène est des plus remarquables avec *Antharès* du Scorpion. Si l'on enfonce ou retire l'oculaire, on distingue, dans l'image troublée et dilatée de l'étoile, une agitation vive et des changements de couleurs. L'état de l'air a une influence évidente sur le phénomène, ce qui montre qu'il est produit dans l'atmosphère. Il est plus marqué près de l'horizon qu'au zénith, quand le temps change, quand il fait du vent, et aussi dans les grands calmes qui précèdent les tempêtes et pendant lesquels l'air est fortement agité dans les régions supérieures. La scintillation est, au contraire, très-faible et même nulle pour certaines étoiles de première grandeur, par un temps sec et chaud, sous le ciel pur des tropiques, sur les hautes montagnes, comme l'a vu M. Tacchini sur l'Etna, etc.

On a fait anciennement plusieurs hypothèses sur la cause de la scintillation. Aristote, Cardan... l'expliquaient par les vacillations de l'œil, qui manqueraient de fermeté pour regarder à des distances immenses. Tycho, Kepler, Galilée..., admettaient des variations réelles dans l'éclat de l'étoile. La scintillation devrait, dans ces deux hypothèses, être indépendante de l'état de l'air. Alhazen, Huyghens, Newton, Saussure..., voyaient dans la scintillation le résultat du *déplacement* des rayons produit par l'agitation de l'air. Mais ces déplacements, amplifiés dans une lunette, devraient faire voir un ruban lumineux. MM. Mossoti, Donati, et particulièrement M. Ch. Montigny, ont expliqué la scintillation par la réfraction et dispersion des rayons de l'étoile, dans l'atmosphère non homogène et agitée surtout près de l'horizon : Quand on reçoit dans l'œil ou dans une lunette un rayon rouge provenant d'un rayon blanc ayant éprouvé la dispersion dans l'air, le rayon violet provenant du même rayon blanc étant plus dévié, n'entre pas dans l'instrument. Le rayon violet que reçoit celui-ci provient d'un autre rayon blanc plus élevé que le premier; comme cela a lieu quand on regarde un point lumineux à travers un prisme, on voit un spectre dont l'extrémité violette est donnée par un rayon incident qui entre dans le prisme plus près du sommet que ceux qui font voir les autres couleurs. M. Mossoti a calculé que les points par lesquels les rayons qui font voir les couleurs extrêmes, entrent dans l'atmosphère sont à une distance de près de 9^m l'un de l'autre, pour

une étoile éloignée de $83^{\circ} 33'$ du zénith. Ces rayons traversent donc des masses d'air de densité, de pureté et de calme différents; par suite, les divers rayons colorés changent à chaque instant et à des degrés différents d'intensité et de position; de là, les variations continuelles dans les couleurs et l'intensité du spectre stellaire, variations d'autant plus marquées que l'air est plus agité. A cette cause générale, M. Mossoti ajoute les inégalités dans la réfraction et la dispersion aux surfaces de séparation de masses d'air de densités différentes, sans cesse en mouvement, et M. Montigny, des réflexions totales à ces surfaces, réflexions qui ont lieu sous des incidences différentes pour les divers rayons colorés (2574, 3^o).

Il résulte de cette théorie que deux observateurs regardant la même étoile, peuvent la voir au même moment dans des états différents. Arago, auquel on doit une théorie de la scintillation *par les interférences*, sur laquelle nous reviendrons plus tard, proposait de vérifier cette conséquence, au moyen d'un *héliomètre* donnant deux images que l'on aurait comparées. M. Montigny a

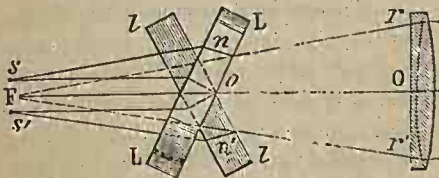


Fig. 1890.

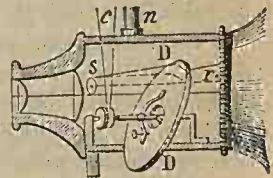


Fig. 1891.

employé simplement une lunette ordinaire (fig. 1890), dans laquelle il dispose deux demi-disques de verre LL, // inclinés en sens inverse sur l'axe, qu'ils touchent par leur bord rectiligne. Deux rayons r, r' qui se rencontreraient en F en l'absence des demi-disques, sont déplacés latéralement suivant $ms, r'n's'$ (2502), et tous les rayons qui passent par la moitié antérieure de l'objectif O traversent la lame LL et font une image focale de l'étoile, en s ; et les rayons qui traversent la moitié postérieure de l'objectif font l'image focale s' . Ces deux images formées par deux rayons qui tombent sur les deux moitiés de l'objectif, donnent des pulsations qui ne coïncident pas et présentent de temps en temps des couleurs différentes au même moment, comme Arago l'avait prévu. En poussant l'oculaire de la lunette de manière à voir les images épanouies, ou en imprimant des secousses à l'appareil de manière à voir deux rubans, la comparaison se fait plus facilement.

2704. Scintillomètre. — Pour apprécier l'intensité de la scintillation, il faudrait pouvoir compter les espèces de pulsations qui se distinguent dans l'image épanouie de l'étoile vue dans une lunette dont l'oculaire est trop enfoncé. Arago a indiqué le moyen suivant : Quand on réduit l'ouverture de l'objectif d'une lunette, au moyen d'un diaphragme, puis, qu'on enfonce peu à peu l'oculaire, qui d'abord était mis au point, on ne tarde pas à apercevoir au milieu de

l'image dilatée de l'étoile, une tache noire au centre de laquelle apparaît ensuite un point brillant, et ainsi de suite. Si l'on arrête l'oculaire au moment où commence à apparaître la tache noire, on remarque que, par l'effet de la scintillation, cette tache disparaît et reparait alternativement; et il n'y a qu'à compter le nombre de disparitions pendant un temps donné, pour juger de l'activité du phénomène. Une lunette ainsi disposée forme un *scintillomètre*.

On peut étudier la scintillation sur le ruban formé dans une lunette à laquelle on imprime de petites secousses. Mais il est plus avantageux de laisser la lunette en repos et de faire tourner les rayons eux-mêmes avec régularité. C'est ce qu'a fait M. Montigny, au moyen de son scintillomètre (*fig.* 1891). Dans le tube oculaire et avant l'image focale de l'étoile, est placée une plaque circulaire de verre DD, tournant autour d'un axe parallèle à celui de la lunette et placé à côté. Cette plaque est inclinée sur son axe, de manière à imprimer aux rayons, tels que *r*, un déplacement latéral dans le plan d'incidence. Ce plan tournant avec la plaque, l'image focale tourne également et forme un ruban lumineux circulaire, qui paraît continu s'il y a plus de dix tours par seconde. La rotation est produite par une corde sans fin *c*, conduite par un mouvement d'horlogerie fixé au support *n*. Au foyer, est un micromètre à fils rayonnants, qui permet de noter les teintes qui fractionnent l'anneau lumineux.

Résultats. — M. Dufour avait remarqué que les étoiles jaunes scintillent moins que les autres, et M. Montigny a découvert une relation remarquable entre la scintillation et le type auquel appartiennent les étoiles d'après leur spectre (2650). Il a constaté que celles qui scintillent le plus appartiennent au premier type, caractérisé par quelques fortes raies noires. Viennent ensuite les étoiles du second type (type solaire), et enfin celles du troisième type, dont le spectre présente des bandes sombres. M. Montigny explique ces résultats par l'absence de certaines couleurs, indiquée par les raies, surtout quand elles sont fortes.

MM. Liandier, de Portal, Poey, ont tiré parti du scintillomètre pour prédire le temps qu'il fera le lendemain. Ils ont constaté que, lorsqu'on observe le disque étalé dans une lunette, d'une étoile de première grandeur assez élevée au-dessus de l'horizon, on y distingue des ondulations allant d'un bord à l'autre du disque, et qui indiquent la direction du vent régnant dans les régions supérieures de l'atmosphère, direction qui est liée avec la hauteur du baromètre, et permet de prédire le temps qu'il fera le lendemain ou le surlendemain ¹.

2705. CRÉPUSCULE. — Sans l'atmosphère, la nuit viendrait brusquement dès que le soleil disparaîtrait sous l'horizon, et le jour commencerait de même subitement. On nomme *crépuscule du soir*, ou simplement *crépuscule*, la lumière que le soleil répand sur la terre quelque temps après son coucher, et *crépuscule du matin* ou *aurora*, celle qu'il répand avant son lever. On prend ordinairement pour limite du crépuscule astronomique le moment où les

¹ *Cosmos, Revue des progrès des sciences*, t. XIX, pp. 20, 263, 265.

étoiles de 6^e grandeur commencent à se distinguer le soir, au zénith, ou à s'effacer le matin. Dans nos climats, le crépuscule du soir finit quand le soleil est à 17 ou à 18° au-dessous de l'horizon. L'aurore commence quand il est un peu moins bas, les vapeurs atmosphériques, précipitées pendant la nuit, ne s'élevant pas aussi haut. Du reste, ces évaluations sont très-vagues, l'état de l'air ayant une grande influence sur le phénomène. Quand la couleur pâle du ciel atteste la présence de beaucoup de vapeurs condensées, le crépuscule dure longtemps; ce qui a lieu dans nos climats pendant l'hiver, et habituellement, dans les régions polaires. Entre les tropiques, où l'air est généralement sec et pur, le crépuscule a une si faible durée que plus d'un voyageur a été surpris par l'arrivée subite de la nuit. Le crépuscule ne dure qu'un quart d'heure au Chili, et quelques minutes seulement à Cumana et sur la côte occidentale d'Afrique. Bruce a vu, dans le Sennaar, la nuit suivre presque immédiatement le coucher du soleil; mais aussi, l'air était tellement pur qu'il distinguait la planète *Vénus* en plein jour.

Courbe crépusculaire. — Quand le soleil se couche, le ciel blanchit au zénith et jaunit à l'occident. En même temps on voit vers l'orient une teinte purpurine, plus ou moins prononcée suivant l'état de l'air, produite par la réflexion des rayons solaires, qui ont pris cette couleur en traversant horizontalement l'atmosphère, et qui colorent les légers nuages ou les sommets élevés qu'ils peuvent rencontrer. Quand le soleil vient de se coucher, on aperçoit à l'horizon oriental un segment bleu sombre, au-dessus duquel se trouve cette teinte purpurine. Ce segment est parfois bordé d'une bande blanche ou jaunâtre; son point culminant s'élève de plus en plus à mesure que le soleil s'abaisse, et finit par gagner le zénith, puis l'horizon occidental, avec lequel la bande jaune se confond quand le crépuscule cesse. Le contour du segment, signalé par de Mairan, se nomme *courbe* ou *arc crépusculaire*. Cet arc, quelquefois nettement limité, comme Lacaille l'a vu au Cap, s'explique par l'ombre conique de la terre, qui empêche les rayons solaires d'éclairer les parties de l'atmosphère qui sont au-dessous, ces parties ne réfléchissant que la faible lumière diffuse qui les frappe, en lui conservant la teinte bleue qui lui est propre. Quand l'arc crépusculaire est assez élevé, on aperçoit souvent une lueur sensible du côté de l'orient; c'est le *second crépuscule*, dû aux rayons réfléchis par les parties de l'atmosphère voisine de l'horizon occidental, ou même situées au-dessous de cet horizon.

2706. Couleurs de l'aurore. — C'est surtout avant le lever du soleil qu'on peut étudier les couleurs qui se succèdent à l'horizon oriental, l'air étant plus pur le matin que le soir. M. Bravais a suivi la marche du phénomène, du sommet du Faulhorn (2683^m). Voici le résumé d'une trentaine d'observations faites par un ciel bien pur, et dans lesquelles la couleur du ciel a été relevée pour des positions du soleil variant de 2 en 2°, les distances angulaires étant corrigées des effets de la réfraction. Quand le soleil avant de se lever, est à 102° du zénith, l'horizon paraît bordé d'une bande très-mince rouge ou

orange, dont la courbe crépusculaire est distante de 7° ; l'espace compris entre cette courbe et l'horizon est plus éclairé que le reste du ciel. La zone orangée s'étend ensuite, se borde de jaune, puis de vert qui s'étend de plus en plus, pendant que la courbe crépusculaire marche vers le zénith. Quand elle a dépassé un peu ce point, auquel cas le soleil est à 94 ou 93° du zénith, il se forme, au-dessus du vert, une zone purpurine qui disparaît bientôt. Quand le soleil est arrivé à 92° du zénith, l'horizon oriental jaunit, le vert est plus marqué et s'étend depuis 3° jusqu'à 18° ; l'arc crépusculaire se trouve alors à 3° de l'horizon occidental, et est entouré d'une zone purpurine de 12° de largeur environ. Le soleil se levant ensuite, la courbe disparaît, et l'horizon occidental est bordé d'une bande rougeâtre, surmontée de jaune, qu'enveloppe plus tard une légère teinte verdâtre. Le rouge est remplacé à l'orient par du jaune, surmonté par le vert, qui persiste encore quand le jaune a disparu, le soleil n'étant plus qu'à 88 à 86° du zénith.

L'explication de ces phénomènes compliqués n'est pas chose facile; cependant on reconnaît que les zones rouge et jaune sont dues à l'absorption produite par l'air sous des épaisseurs différentes. Quant à la couleur verte, elle paraît provenir du mélange des rayons jaunes avec des rayons bleus de lumière diffuse réfléchis dans certaines régions. Ajoutons que Babinet voit dans ces phénomènes, des effets de *diffraction*.

2707. Rayons crépusculaires. — Quand les rayons solaires passent par les éclaircies de nuages épais, on peut en suivre la marche à travers l'air dont ils illuminent les particules en suspension, en produisant des bandes plus claires que le fond sur lequel elles se projettent. Ces bandes semblent diverger du centre du soleil, mais elles sont parallèles entre elles, et c'est par un effet de perspective, que les parties les plus rapprochées paraissent les plus écartées. Si ces bandes dépassent le zénith, elles semblent converger vers le point de l'horizon opposé au soleil. Ces effets sont semblables à ceux que l'on observe quand on se trouve au milieu d'une allée d'arbres. Si le soleil vient de se coucher et s'il est entouré de nuages, invisibles parce qu'ils sont au-dessous de l'horizon, on aperçoit de semblables bandes, colorées en pourpre ou en jaune comme l'atmosphère à l'occident, et paraissant diverger du centre du soleil. Le nombre, la couleur, l'étendue de ces bandes sont variables; M. Necker de Saussure, qui en a fait une étude suivie, les nomme *rayons crépusculaires*¹.

2708. Hauteur de l'atmosphère déduite du crépuscule. — Supposons que l'arc crépusculaire soit limité par des rayons n'ayant subi qu'une seule réflexion, et soit m (fig. 1892) un point de la surface de la terre, mh son horizon, et aca la limite de l'atmosphère. Menons dans un plan vertical passant par le point m et par le centre du soleil, une tangente, snc , de ce centre à la surface terrestre. Si l'on néglige la réfraction atmosphérique, le point c sera le point culminant de l'arc crépusculaire, et l'on pourra, quand les circonstances

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. LXX, pp. 413 et 225.

seront favorables, mesurer la hauteur angulaire $\alpha \equiv cmh$ de ce point. On pourra aussi connaître l'abaissement chs du soleil au-dessous de l'horizon du point m , au moyen du temps t écoulé depuis son coucher; car on a $chs : t \equiv 360^\circ : 24^h$. Le triangle chm donnera alors l'angle mch . On connaîtra donc, dans le quadrilatère $menc$, trois angles, mch , $cno \equiv 90^\circ$, $cmo \equiv 90^\circ + \alpha$, et deux côtés mo et no , qui sont des rayons de la terre; on pourra donc calculer la valeur de cm . Alors on connaîtra, dans le triangle cmo , deux côtés et l'angle compris $cmo \equiv 90^\circ + \alpha$, et l'on pourra calculer le côté co , d'où l'on déduira la hauteur $pc \equiv co - po$. Cette méthode est due à Kepler; Alhazen, auquel on doit un traité du crépuscule, en avait déjà tiré parti pour établir une limite inférieure de la hauteur de l'atmosphère.

Si les rayons qui limitent la courbe crépusculaire arrivent en m , après n'avoir subi, comme nous l'avons supposé, qu'une seule réflexion, on devra, par ce moyen, trouver la même hauteur pour l'atmosphère, quelle que soit l'heure de l'observation. Or, il n'en est pas ainsi; le résultat est d'autant plus grand que le soleil est plus bas au-dessous de l'horizon. Lambert, qui a aussi déduit du crépuscule la hauteur de l'atmosphère, et renversé les idées exagérées qu'on se faisait alors de cette hauteur, insiste, dans sa *photométrie*, sur l'incertitude relative au nombre de réflexions, et y soumet la question au calcul. Biot a repris ce travail au moyen des données de la science moderne et des observa-

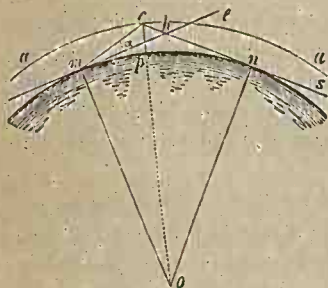


Fig. 1892.

tions faites au Cap par Lacaille, en 1751, dans des conditions où la courbe était d'une netteté remarquable, et il a trouvé, en supposant successivement une, deux ou trois réflexions, les hauteurs 58 916^m, 10 797^m et 6 392^m. Les deux dernières sont évidemment beaucoup trop faibles, puisque Gay-Lussac s'est élevé à 7000^m, où la densité de l'air avait encore la moitié de sa valeur au niveau des mers. Biot admit alors que la véritable hauteur de l'atmosphère est comprise entre les deux plus fortes évaluations; de sorte que la courbe crépusculaire, quand on l'observe à l'horizon, appartiendrait au second espace crépusculaire. Lambert avait aussi embrassé cette opinion, qu'il appuyait sur de nombreuses considérations, que Biot a reproduites en les rendant plus claires, et il avait adopté 29 kil. Ce résultat est encore probablement trop faible, parce que la réflexion sur les couches supérieures de l'atmosphère étant insensible, on n'obtient en réalité que la hauteur des dernières couches qui réfléchissent sensiblement la lumière. Et, en effet, il résulte de la discussion des observations des étoiles filantes, dont la lumière subite est attribuée à la chaleur qu'elles dégagent en entrant dans l'atmosphère, que cette hauteur atteint de 80 à 100 kilomètres.

2709. Pronostics tirés du crépuscule. — L'aspect, la durée et les couleurs du crépuscule du matin, et surtout du soir, dépendant de l'état de l'atmosphère et particulièrement de la quantité de vapeur précipitée qu'elle contient, on conçoit que l'on puisse déduire de l'observation de ces apparences, des probabilités sur le temps qu'il fera dans la journée ou le lendemain.

Quand, après le coucher du soleil, le ciel est d'un jaune blanchâtre à l'occident, et que cette teinte s'étend à une grande hauteur, il est probable qu'il pleuvra pendant la nuit ou le jour suivant. — Des nuages rouges avec teintes grises annoncent aussi une pluie prochaine; la coloration étant due à la présence de gouttelettes d'eau attestant que l'air est saturé. — Quand le soleil paraît diffus et d'un blanc éclatant avant de se coucher, le temps est à l'orage. — S'il se couche dans un ciel légèrement pourpré, l'air étant bleu au zénith, on peut compter sur le beau temps, l'atmosphère étant alors très-pure. Après la pluie, la présence de légers nuages participant à cette couleur pourprée, confirme le pronostic.

Quand le soleil se lève avec une teinte rouge, il y a probabilité de pluie. — Si le ciel présente une teinte rose ou grisâtre, on peut compter sur le beau temps. Dans le premier cas, l'air est pur, et dans le second, les gouttelettes sont peu abondantes, et le soleil les aura bientôt fait évaporer.

2710. Les météores colorés les plus brillants sont produits par le jeu des rayons solaires dans l'eau atmosphérique. Quand cette eau tombe en gouttes à travers l'air, elle produit l'*arc-en-ciel*; si elle est en gouttelettes très-fines, comme dans les nuages, elle donne naissance aux *couronnes* et aux phénomènes analogues. Quand elle est congelée en aiguilles très-fines flottant dans l'air ou tombant lentement, elle produit les *halos*, les *parhélies*, et les phénomènes concomitants. L'explication des couronnes dépendant de la *diffraction* de la lumière, nous ne nous en occuperons qu'après avoir traité des lois de ce dernier phénomène.

§ 2. — ARC-EN-CIEL.

2711. Historique. — L'*arc-en-ciel* ou *iris* consiste en une bande d'apparence circulaire, dans la largeur de laquelle sont distribuées les couleurs du spectre, le rouge en dehors, et qui se montre dans la région du ciel opposée au soleil, quand il y tombe une pluie calme. Le diamètre apparent de l'arc est constant, et son centre se trouve toujours sur une droite passant par l'œil de l'observateur et par le centre du soleil; de manière que le point culminant de l'arc est d'autant plus élevé que le soleil est plus près de l'horizon. Cet arc, nommé *arc principal* ou *arc intérieur*, est le plus souvent accompagné d'un second arc concentrique, de plus grand rayon, mais dans lequel les couleurs, beaucoup plus pâles, sont distribuées dans un ordre inverse, le rouge étant en dedans, et qu'on nomme *arc extérieur* ou *second arc*. La théorie indique d'autres arcs (2720), mais ils sont tellement faibles qu'on ne peut les apercevoir.

On observe souvent l'arc-en-ciel, dans les gouttelettes d'eau qui se séparent des cascades ou des jets d'eau. On peut le produire en lançant en l'air de l'eau avec la bouche, pendant qu'on tourne le dos au soleil.

Les rayons de la lune produisent l'arc-en-ciel, et de la même manière que ceux du soleil; seulement, l'*arc-en-ciel lunaire*, comme on pouvait le prévoir, est peu brillant, les couleurs s'y distinguent à peine, et l'arc extérieur ne se voit que très-rarement.

Les philosophes anciens avaient remarqué les circonstances dans lesquelles se produit l'arc-en-ciel, et avaient cherché à l'expliquer. Comme il se montre toujours à l'opposé du soleil, il est évident que les rayons sont réfléchis par les gouttes de pluie. Aristote suppose que la réflexion a lieu sur la surface convexe, et il attribue les couleurs au mélange des rayons réfléchis avec l'ombre du nuage. Possidonius, puis Sénèque, admettent que l'arc est produit par la réflexion sur un nuage formant un miroir concave. Maurolicus mesure le diamètre angulaire de l'arc, le trouve constant et cherche à expliquer le phénomène par la réflexion des rayons, en partie sur la surface extérieure des gouttes d'eau en partie à l'intérieur, où ils décriraient les côtés d'un octogone. Vitellion conclut de la coloration, qu'il y a réfraction en même temps que réflexion. Kepler précise davantage la marche du rayon, et reconnaît qu'il se réfracte en entrant dans la goutte, se réfléchit intérieurement, et se réfracte de nouveau en émergeant. Antoine de Dominis passe pour avoir assez bien expliqué le premier arc-en-ciel; mais tout ce qu'il en dit est vague et confus, et il se trompe complètement quand il veut expliquer l'arc extérieur. C'est à Descartes qu'est due la véritable théorie du brillant météore; mais il laissa son œuvre incomplète, n'ayant pu rendre compte de l'ordre des couleurs dans les deux arcs, parce qu'il ignorait les lois de la dispersion; il se contente de dire que la coloration est la conséquence des réfractions qu'éprouvent les rayons lumineux, et que « la séparation des couleurs est la même que dans un prisme d'eau dont les faces feraient un angle égal à celui de deux plans tangents aux points d'incidence et d'émergence. » Il était réservé à Newton, après avoir découvert l'explication de la dispersion, de compléter la théorie de Descartes.

2712. Marche des rayons dans une sphère transparente. — Le phénomène de l'arc-en-ciel étant produit par la réfraction et la réflexion des rayons lumineux dans les gouttes de pluie, de forme sensiblement sphérique, il nous faut commencer par étudier la marche d'un rayon dans une sphère transparente. Considérons donc un rayon simple, *sa* (fig. 1893), dirigé dans le plan d'un grand cercle, et cherchons la déviation qu'il a éprouvée quand il émerge. Ce rayon se réfracte d'abord suivant *ab*, en faisant avec la normale *oa* un angle *r* plus petit que l'angle d'incidence *i*, et il est dévié de la quantité angulaire $s'ab = i - r$. Arrivé en *b*, il se réfléchit en partie, en faisant avec la normale *ob* des angles égaux à *r*, et émerge en partie en faisant l'angle d'émergence *b'bc* égal à *i*. Le rayon réfléchi *bc* a tourné, pour venir de la direction *bc*, d'une quantité égale à $180^\circ - 2r$. Prenons les arcs *bc*, *cd*, *dn..*, égaux à *anb*, une

partie du rayon arrivant aux points b, c, d, \dots se réfléchit, pendant que l'autre partie émerge. A chaque réflexion, le rayon tourne de $180^\circ - 2r$, et comme en émergeant il tourne de $i - r$, l'angle d'émergence étant égal à i , après m réflexions, la quantité angulaire A dont aura tourné le rayon sera

$$A = 2(i - r) + m(180^\circ - 2r) = m180^\circ + 2i - 2(m + 1)r \quad [1]$$

Pour déduire de là l'angle que fait le rayon incident avec le rayon émergent, il faudra commencer par retrancher de cette quantité, les tours entiers qu'elle contient, c'est-à-dire 360° , autant de fois que possible; ce qui ramènera au point de départ, c'est-à-dire à une parallèle au rayon incident. Il restera alors une quantité moindre que 360° , qui représentera $180^\circ \pm D$, D étant l'angle du rayon émergent avec la partie sa du rayon incident.

Par exemple, quand il n'y a qu'une seule réflexion, il faut faire $m = 1$, et l'on a $A = 2(i - r) + 180^\circ - 2r = 2i - 4r + 180^\circ$; et il est facile de voir, en menant par le point d'émergence c , des parallèles à sa, ab et bc , que la quantité angulaire A dont a tourné le rayon pour venir de la direction sa à la direction ce' , est égale à $180^\circ - D$; on a donc

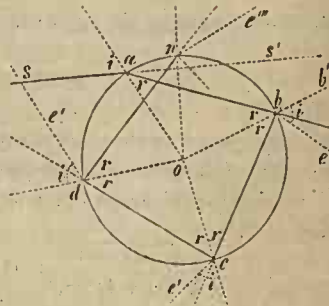


Fig. 1893.

$$A = 180^\circ - D; \quad \text{d'où} \quad D = 180^\circ - A = 4r - 2i.$$

Après deux réflexions, on aura $A = 2i - 6r + 2 \times 180^\circ$, en faisant $m = 2$; et l'on verrait de même que l'angle de rotation est égal à $180^\circ + D$, de sorte que l'on a

$$D = A - 180^\circ = 180^\circ + 2i - 6r.$$

2713. Rayons efficaces. — Si l'on considère deux rayons incidents parallèles de même couleur, comme A dépend de i , qui n'est pas le même pour ces deux rayons, on voit que, en général, les rayons émergents ne seront pas parallèles, et qu'ils divergeront après s'être croisés, ou sans s'être croisés. Un pinceau de rayons parallèles donnera donc un faisceau divergent, incapable d'agir sur l'œil à une grande distance. Mais si les valeurs de A ou de D sont susceptibles de prendre une valeur *maximum* ou *minimum*, pour une certaine incidence i , comme dans le voisinage de leur maximum et de leur minimum, les valeurs changent d'une manière insensible, les rayons incidents voisins de celui qui entre sous l'incidence i , donneront un faisceau à très-peu près cylindrique, conservant son intensité à une grande distance; Newton les nomme

rayons efficaces. Il est évident que le faisceau efficace est d'autant plus gros, que le diamètre de la sphère est plus grand.

Cherchons les valeurs de i et r qui correspondent aux rayons efficaces, c'est-à-dire pour lesquelles la déviation D est *maximum* ou *minimum*, ou bien Λ minimum ou maximum, puisqu'il ne diffère de D que par un certain nombre de fois 360° . Il faut que Λ ne varie pas pour des variations infiniment petites di , dr de i et r . La dérivée de la valeur [1] de Λ doit donc être nulle, et l'on aura

$$\frac{di}{dr} = m + 1. \quad \text{On a aussi} \quad \frac{di}{dr} = \frac{n \cos r}{\cos i}, \quad [2]$$

déduit de la relation $\sin i = n \sin r$; d'où

$$n \cos r = (m + 1) \cos i, \quad [3]$$

qui, avec $\sin i = n \sin r$, servira à déterminer les angles i et r qui correspondent aux rayons efficaces. Remplaçant dans l'égalité [3], $n \cos r$ par sa valeur $\sqrt{n^2 - \sin^2 i}$, tirée de $\sin i = n \sin r$, on obtient,

$$\cos i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{(m + 1)^2 - 1}}; \quad \text{et} \quad \cos r = \frac{m + 1}{n} \sqrt{\frac{n^2 - 1}{(m + 1)^2 - 1}}, \quad [4]$$

formules qui font connaître les angles d'incidence et de réfraction qui correspondent aux rayons efficaces. On voit qu'il ne peut exister de semblables

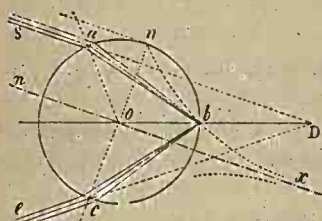


Fig. 1894.

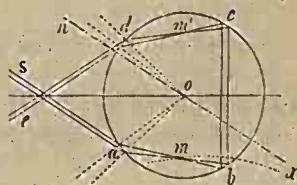


Fig. 1895.

rayons s'il n'y a pas au moins une réflexion intérieure; car pour $m = 0$, les *cosinus* deviennent infinis, ce qui indique une impossibilité.

2714. Marche symétrique des rayons efficaces. — Les rayons efficaces suivent dans la sphère une marche symétrique qui n'a pas lieu pour les rayons inefficaces. Il est facile de voir (fig. 1894) qu'un faisceau n'éprouvant qu'une seule réflexion doit converger au point de réflexion b quand le faisceau réfléchi bc , symétrique de ab , donne un faisceau émergent cylindrique; et alors la droite oD , qui passe par le sommet de l'angle de déviation aDc , divise la figure en deux parties symétriques. Le point b n'est autre chose que le point de rencontre de la demi-circonférence abc , avec la génératrice de la *diacaustique* nba

formée par les rayons parallèles qui se réfractent à la surface sphérique *nae*, considérée comme limitant un milieu indéfini vers la droite; car chaque point de la surface caustique est formé par la rencontre des rayons réfractés provenant de rayons incidents très-voisins (2497). Dans ce cas, la déviation correspondant aux rayons efficaces est *maximum*.

S'il y a deux réflexions (fig. 1895), il faut que le faisceau soit cylindrique entre les deux points de réflexion *b* et *c*; car alors le faisceau *cde* étant symétrique de *sab* par rapport au diamètre perpendiculaire à *cb*, *de* sera cylindrique. Le point *m* appartient à la *diacaustique mx*, qui a pour axe, *nx* parallèle à *sa*. Dans ce second cas, la déviation des rayons efficaces est *minimum*.

On verrait de même que, pour que le faisceau émergeant après trois réflexions soit cylindrique, il faut que les rayons convergent au point où se fait la seconde réflexion... En général, quand il y aura un nombre *impair* de réflexions, les rayons qui composent le faisceau efficace devront se rencontrer au milieu de l'arc compris entre les points d'incidence et d'émergence, arc sur lequel sont distribués tous les autres points de réflexion. Quand il y aura un nombre *pair* de réflexions, le faisceau devra être cylindrique entre les deux points consécutifs de réflexion qui se trouvent à égale distance des extrémités de cet arc.

2715. Application au cas d'une sphère d'eau. — Il résulte des formules [4], que les valeurs de *i* et *r* pour un même nombre de réflexions, ne dépendent que de l'indice *n*; il en est donc de même de la déviation *D* correspondante. Ces valeurs seront donc différentes pour les divers rayons simples qui composent la lumière blanche. Si l'on considère une sphère d'eau, on a pour les indices des rayons extrêmes du spectre $n_v = \frac{100}{81}$, et $n_r = \frac{108}{81} = \frac{4}{3}$. Faisant *m* = 1, ce qui suppose une seule réflexion, portant successivement ces valeurs de *n_v* et *n_r* à la place de *n* dans la première formule [4], calculant les valeurs de *i* au moyen des tables trigonométriques, et portant ces valeurs dans celle de *D*, qui est ici $4r - 2i$, on trouve

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour les rayons violets, } i_v = 58^\circ 40' \quad \text{et par suite, } \left\{ \begin{array}{l} D_v = 40^\circ 17'. \\ \text{Pour les rayons rouges, } i_r = 59^\circ 23' 30'' \quad \left\{ \begin{array}{l} D_r = 42^\circ 1' 40''. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Dans le cas de deux réflexions, il faut faire *m* = 2, et l'on trouve de même :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour les rayons violets, } i'_v = 71^\circ 49' 55'' \quad \left\{ \begin{array}{l} D'_v = 54^\circ 9' 20''. \\ \text{Pour les rayons rouges, } i'_r = 71^\circ 26' 10'' \quad \left\{ \begin{array}{l} D'_r = 50^\circ 58' 50''. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

2716. Explication de l'arc intérieur. — L'arc intérieur est produit par les rayons solaires qui ont éprouvé une seule réflexion dans les gouttes sphériques d'une pluie calme. Ces gouttes se succédant très-rapidement, il y en a toujours quelques-unes qui rencontrent une droite donnée, de manière que leur centre soit à une distance demandée de cette droite. Les choses se passent

done comme si une de ces gouttes était fixe. Cela posé, soit o la position de l'œil de l'observateur (*fig.* 1896), soa une droite passant par le point le plus bas du disque solaire, et à laquelle tous les rayons partant de ce point sont parallèles, à cause de l'immense distance du soleil ; menons la droite ov faisant avec soa , du côté opposé au soleil, l'angle aov égal à la déviation $D_r = 40^\circ 17'$, qui correspond aux rayons violets efficaces. Il y aura à chaque instant sur cette ligne une goutte de pluie dans une position convenable pour réfléchir suivant vo , les rayons violets efficaces provenant du faisceau incident s_1i , parallèle à so , l'angle s_1io étant égal à D_r . L'observateur verra donc un point violet dans la direction ov .

Supposons maintenant que le plan de la figure tourne autour de soa ; tout se passant de la même manière dans chaque position de ce plan, pourvu qu'il rencontre des gouttes de pluie, l'observateur verra une courbe violette qui, se

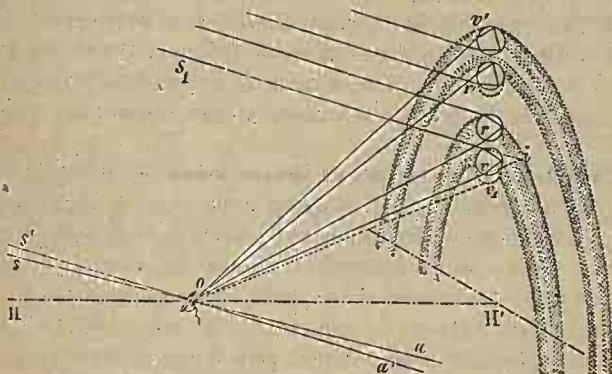


Fig. 1896.

trouvant sur la surface d'un cône dont son œil occupe le sommet, se projettera sur le ciel sous forme d'un arc de cercle ayant son centre sur soa . — Faisons la même construction pour le bord supérieur du soleil ; nous aurons une direction ov_1 suivant laquelle on verra aussi un point violet ; et comme on peut raisonner de la même manière pour tous les points du disque solaire, on voit que l'observateur verra dans le plan de la figure, un trait violet v_1v_2 , et par conséquent une bande circulaire violette ayant une épaisseur angulaire v_1ov_2 égale à sos' , c'est-à-dire au diamètre apparent du soleil, dont la valeur moyenne est de $31'$.

Menons la droite or faisant avec soa un angle égal à la déviation $D_r = 42^\circ 1' 40''$, qui correspond aux rayons rouges, et une seconde droite faisant le même angle avec $s'oa'$, nous verrons, de même, qu'il arrivera à l'œil des rayons rouges dans l'angle que font ces deux droites, et que, par conséquent, l'observateur verra une bande circulaire rouge d'épaisseur égale au diamètre apparent du soleil, et placée au-dessus de la bande violette.

Les rayons colorés autres que les rouges et les violets, éprouvant des déviations comprises entre celles des rayons de ces deux couleurs, produiront d'autres arcs colorés distribués entre les bords rouge et violet. Tous ces arcs auront 31' d'épaisseur; ils se superposeront donc en partie, et les couleurs en seront peu distinctes, excepté sur les deux bords de l'arc.

L'éclat de l'arc dépend du diamètre des gouttes d'eau; les faisceaux efficaces ayant une section d'autant plus grande, que ces gouttes sont plus grosses (2713). C'est pourquoi, les gouttelettes excessivement fines qui forment les nuages, ne donnent pas d'arc-en-ciel; les faisceaux efficaces étant trop fins pour produire une impression distincte de celle de la lumière diffuse répandue dans l'atmosphère.

Dimensions de l'arc intérieur. — L'épaisseur totale *rov*, de l'arc intérieur est égale à la différence $roa - voa = vor$ augmentée du diamètre apparent du soleil, c'est-à-dire à $1^{\circ} 41' 40'' + 31' = 2^{\circ} 15' 40''$. Newton a vérifié ce résultat par des mesures directes. Il a constaté aussi que le demi-diamètre angulaire du bord inférieur de l'arc est bien égal à $D_r = 40^{\circ} 17'$.

2717. Explication de l'arc extérieur. — L'arc extérieur, ou *second arc*, est produit par des rayons qui ont éprouvé deux réflexions dans l'intérieur des gouttes de pluie; il est beaucoup plus faible que le premier, une partie de la lumière émergeant à chaque réflexion. On se rend compte de la formation de cet arc, au moyen d'une construction semblable à celle que l'on fait pour l'arc intérieur; en menant les droites *or'*, *ov'* (*fig.* 1896) faisant avec *soa* des angles égaux aux déviations $D'_r = 50^{\circ} 58' 50''$, et $D'_v = 54^{\circ} 9' 20''$. D'_v étant plus grand que D'_r , le violet sera en dehors et le rouge en dedans. — L'épaisseur de l'arc sera $D'_v - D'_r + 31' = 3^{\circ} 41' 30''$; et son demi-diamètre intérieur sera D'_r . — La distance angulaire entre les bords les plus rapprochés des deux arcs sera $D'_r - D_r = 8^{\circ} 57' 40''$. Tous ces résultats ont été vérifiés par Newton, autant que le permet la diffusion des bords des arcs.

Quand l'arc-en-ciel est brillant et qu'il se projette sur un fond sombre, l'espace compris entre les deux arcs paraît plus sombre que le reste du ciel. Cette particularité tient à ce que les rayons réfléchis provenant des faisceaux non efficaces sont plus relevés, après une seule réflexion, que les rayons efficaces, dont la déviation est *maximum* (2714), et plus abaissés après deux réflexions. Les gouttes d'eau placées entre les deux arcs n'envoient donc aucuns rayons réfléchis à l'œil, rayons qui, quoique divergents, répandent une lueur sensible, dont l'atmosphère est illuminée à l'intérieur du premier et à l'extérieur du second arc.

Il résulte de ce qui précède, que l'arc-en-ciel est un phénomène *local*, c'est-à-dire que deux observateurs ne doivent pas voir le même arc; et, en effet, quand l'arc est assez rapproché, et les observateurs un peu éloignés l'un de l'autre, ils voient ses extrémités s'appuyer sur différents points du sol.

2718. Arcs surnuméraires. — Quand l'arc-en-ciel est très-brillant, on aperçoit souvent, en dedans de l'arc intérieur et en dehors de l'arc extérieur

des bandes colorées, désignées sous le nom d'arcs *secondaires*, *supplémentaires* ou *surnuméraires*. Immédiatement après le violet, on distingue du rouge, puis du vert et du violet. Quelquefois, ces couleurs se répètent plusieurs fois dans le même ordre au bord intérieur de l'arc principal; elles se montrent plus rarement à l'extérieur du second. Young, Arago, Babinet, ont expliqué ces couleurs supplémentaires par des effets de *diffraction*; nous y reviendrons donc.

2719. Hauteur des arcs au-dessus de l'horizon. — Soit III' (fig. 1896) l'horizon, et s'OH la hauteur du bord inférieur du soleil au-dessus de ce plan; on voit que l'arc-en-ciel est coupé par ce plan à une distance d'autant plus grande de l'axe du cône sur lequel il se trouve, que l'angle s'OH est plus grand. On ne verra donc qu'une partie d'autant plus petite du demi-arc, que le soleil sera plus élevé au-dessus de l'horizon. Quand la hauteur de cet astre sera égale à D_0 pour l'arc intérieur et à D'_0 pour l'arc extérieur, ces arcs ne pourront plus se voir, même dans une plaine unie. Aux *équinoxes*, la hauteur du soleil à midi étant le complément de l'angle de la latitude, on voit que l'arc-en-ciel ne sera pas visible vers midi, pour les latitudes moindres que D_0 . — Quand le soleil est à l'horizon, on aperçoit la moitié de chacun des arcs. On n'en peut voir davantage dans une plaine; mais quand on se trouve au sommet d'une montagne isolée qui laisse passer latéralement les rayons du soleil voisin de l'horizon, il peut arriver, quand la pluie tombe à une faible distance, qu'on aperçoive les cercles irisés à peu près complets.

2720. Des rayons qui ont subi plus de deux réflexions. — La théorie indique qu'un faisceau de lumière peut donner des rayons efficaces après 3, 4, 5... réflexions. Le calcul indique en outre que ces rayons, après trois ou quatre réflexions, sortent du côté de la goutte opposée au faisceau incident. Pour voir le troisième et le quatrième arc-en-ciel, il faudrait donc se tourner vers le soleil, et il devrait tomber de la pluie entre cet astre et l'observateur. Le diamètre apparent du troisième arc serait de $41^{\circ} 37'$ et $37^{\circ} 9'$ pour les rayons rouges et violets; et celui du quatrième arc, de $43^{\circ} 53'$ et $49^{\circ} 53'$. Le cinquième arc serait à l'opposé du soleil. — Les rayons lumineux sont tellement affaiblis après trois réflexions qu'il faudrait, pour que le troisième arc fût visible, qu'il tombât des gouttes de pluie d'une grosseur inusitée; aussi, n'a-t-on jamais pu l'apercevoir. Babinet rapporte que, se trouvant dans les circonstances les plus favorables, sur le mont Dore ou sur le Canigou, ayant en face le soleil couchant, et au-dessous, dans l'ombre, des bois de pins formant un fond complètement noir, il lui a été impossible de distinguer le troisième arc. Cependant on cite des observations de trois arcs-en-ciel vus simultanément; mais comme ils étaient tous les trois opposés au soleil, un d'eux devait être produit par la réflexion des rayons solaires sur quelque nappe d'eau (2722).

2721. Expériences sur l'arc-en-ciel. — Rohaut, disciple de Descartes, a vérifié la marche des rayons lumineux dans une sphère d'eau, par l'expérience suivante, attribuée quelquefois, à tort, à A. de Dominis. On suspend dans la chambre noire, une sphère de verre mince remplie d'eau, au moyen de cordons

passant sur des poulies (*fig. 1897*). On fait tomber sur la sphère un mince pinceau horizontal de rayons solaires, *sa*, entrant en *s*; on place l'œil en *o*, de manière que l'angle que fait *sa* avec *bo* soit à peu près de 42° ; on élève et on abaisse peu à peu la sphère, et quand sa position est telle que l'angle d'incidence corresponde aux rayons efficaces rouges, on aperçoit une tache d'un rouge vif dans la direction *ob*. Si alors on laisse *descendre* peu à peu la sphère, on voit la tache lumineuse prendre successivement toutes les couleurs du spectre. Pour peu que l'eau soit trouble, on distingue la marche du faisceau dans ce liquide, et l'on reconnaît qu'il éprouve une seule réflexion. — Si, le pinceau entrant par le bas de la sphère, comme en *s'a'*, on place l'œil en *o'*, de manière que l'angle *s'Do'* soit de 44° , on voit, dans la direction *o'b'*, une tache rouge qui devient successivement orangée, jaune, etc., quand on fait *monter* la sphère, et l'on reconnaît, quand l'eau est un peu trouble, que le pinceau subit deux réflexions intérieures.

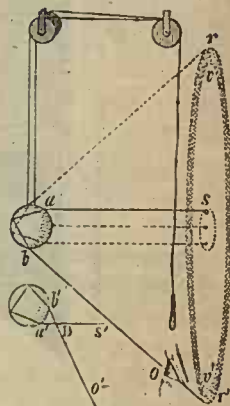


Fig. 1897.

On peut recevoir le pinceau émergent sur le volet de la chambre noire; si alors on emploie un faisceau incident assez gros pour illuminer la sphère entière, il y a, dans chaque section passant par l'axe du faisceau, des pinceaux efficaces de toutes les couleurs, ayant subi une et deux réflexions, et ces pinceaux viennent peindre quatre spectres, deux d'un côté du centre et les deux autres du côté opposé, et, par conséquent, il se forme deux cercles irisés, qui correspondent aux deux arcs-en-ciel.

On peut, par ce moyen, ou mieux, en recevant les faisceaux émergents dans l'œil, voir le troisième et le quatrième arc au moins. Babinet a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet¹. Il a pu, avec des cylindres de verre, distinguer des faisceaux efficaces ayant éprouvé jusqu'à quatorze réflexions, et mesurer leur déviation. Sept de ces faisceaux émergent du côté du faisceau incident, les sept autres du côté opposé. Il a aussi opéré en faisant tomber les rayons du soleil ou d'une flamme, sur un jet liquide cylindrique. — La déviation observée lui a fourni un moyen original de déterminer l'*indice de réfraction* de divers liquides, cet indice entrant dans l'expression de la déviation (2713). M. Billet a répété ces expériences et a vérifié les formules jusqu'au cas de dix-sept réflexions intérieures.

M. Duboscq a imaginé d'imiter l'arc-en-ciel dans les théâtres, en projetant directement la lumière électrique décomposée par un prisme, sur la toile de fond représentant le ciel. Les rayons d'un arc voltaïque (*fig. 1898*) rendus parallèles par une première lentille, traversent une fente courbe et donnent un

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. IV, p. 645.

faisceau cylindrique en forme de lame courbe, qu'une seconde lentille concentre en son foyer. Ce foyer est reçu dans un prisme parallèle à la corde de l'arc que forme la fente, et qui donne une courbe irisée dans laquelle les couleurs sont distribuées d'un bord à l'autre. Pour que le rouge soit en dehors, il faut que le sommet du prisme soit en haut. Les nuances sont vives et ressortent bien sur le fond, quoique la scène soit éclairée. Auparavant, on cherchait à imiter l'arc en en peignant les couleurs sur une zone transparente ménagée dans le fond, et l'éclairant par derrière, ce qui constituait une imitation grossière, et dans d'étranges conditions, car il fallait que la scène fût très-sombre.

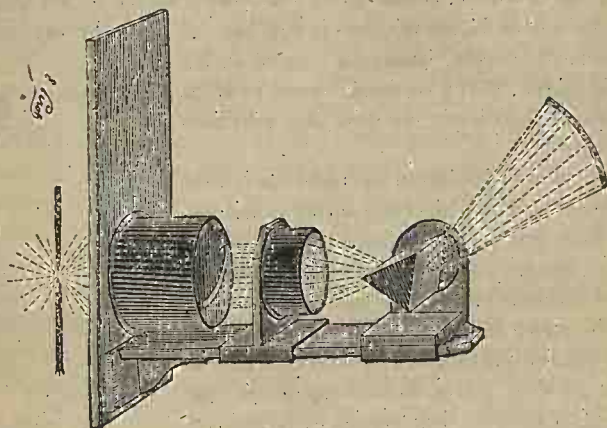


Fig. 1898.

2722. Cas particuliers d'ares-en-ciel. — L'arc-en-ciel présente, parfois, des particularités singulières, mais qui s'expliquent facilement dans la théorie de Newton, et ne font que la confirmer.

Ares à double courbure. — L'arc-en-ciel est situé sur un cône dont le demi-angle au sommet est d'environ 42° pour l'arc principal, et de 54° pour l'arc extérieur, et comme l'œil se trouve au sommet de ce cône, et que le météore se forme ordinairement à une grande distance, il apparaît sous la forme d'un cercle. Mais si la pluie qui traverse la région où se forme l'arc, tombe à différentes distances de l'observateur, assez petites pour qu'il puisse les comparer à des objets terrestres, l'arc lui paraîtra former une courbe à double courbure peinte sur la surface d'un cône dont son œil occupe le sommet. Il pourra arriver, par exemple, que l'un des pieds de l'arc, soit caché par une colline, tandis que l'autre se projette sur des objets placés en avant de cette colline.

Ares horizontaux. — On a vu plusieurs fois l'arc-en-ciel se former dans les gouttes d'eau déposées par la pluie ou la rosée aux extrémités des brins d'herbes d'une prairie. L'arc, se trouvant alors à la fois sur une surface plane et

sur la surface d'un cône, présentera la figure distincte d'une section conique, les objets terrestres permettant d'apprécier les distances des gouttes d'où partent les rayons efficaces. Soit all (fig. 1899) la surface horizontale occupée par les gouttes d'eau, soa la droite qui passe par l'œil o de l'observateur et par le centre du soleil, dont la hauteur au-dessus de l'horizon est $sall = h$. Menons or' formant avec oa l'angle aor' égal à la déviation d qui correspond aux rayons efficaces, et faisons tourner cette droite autour de sa ; elle décrira un cône sur lequel sera situé l'iris.

Si l'angle $r'oa = d$ est plus grand que h , c'est-à-dire si la hauteur du soleil est moindre que d , le plan all ne pourra rencontrer l'arête or' et la courbe mn sera une branche d'hyperbole. Si l'on a $h = d$, la droite or' sera parallèle à all , et la courbe sera une parabole. Enfin, si la hauteur du soleil est plus grande que d , la courbe sera une ellipse d'autant moins allongée que h sera plus grand. Le cas le plus fréquent est celui d'un arc hyperbolique, parce que c'est surtout le matin que les prairies se trouvent couvertes de gouttelettes de rosée. Ce phénomène a été quelquefois désigné sous le nom d'*arc-en-terre*.

Quand la mer est très-agitée, et que les vagues lancent des gouttelettes d'eau, on aperçoit quelquefois des arcs horizontaux désignés sous le nom d'*arcs-en-ciel marins*. Les couleurs sont généralement peu distinctes, à cause de l'irrégularité des gouttes d'eau.

Arcs croisés, renversés. — Quand les rayons solaires se réfléchissent à la surface d'une eau calme, ils prennent la même direction que s'ils partaient de l'image symétrique du soleil formée par le miroir liquide, et ils peuvent former les deux arcs-en-ciel, dont le centre sera situé sur la droite passant par l'œil de l'observateur et par le centre de l'image solaire. On pourra donc voir, indépendamment des deux arcs directs, un ou deux autres arcs, présentant les mêmes couleurs que les deux premiers, ayant le même diamètre et pouvant les couper en plusieurs points. Ces arcs sont nécessairement plus élevés que les arcs directs, et leurs points culminants s'écartent d'autant plus de ceux de ces derniers, que le soleil et son image sont plus écartés l'un de l'autre, c'est-à-dire que le soleil est plus élevé au-dessus de l'horizon. Les marins ont souvent été témoins de ce phénomène. Monge en cite un cas remarquable où les quatre arcs étaient parfaitement distincts. Halley observa, à Chester, trois arcs, dont un était formé par les rayons réfléchis sur la rivière de Dee. Cet arc partagea d'abord l'arc *extérieur direct* en trois parties à peu près égales; puis, le soleil s'abaissant vers l'horizon, les deux points de rencontre se rapprochèrent, se confondirent ensuite en un seul, et les couleurs étant en ordre inverse dans les deux arcs, la partie où ils étaient superposés fut complètement blanche. — Quand le soleil est assez élevé au-dessus de l'horizon,

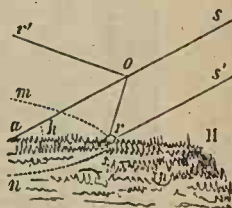


Fig. 1899.

il peut arriver que l'iris produit par les rayons réfléchis sur l'eau, forme un cercle entier; et si la partie supérieure vient à manquer, on a un *arc-en-ciel renversé*, phénomène qui a été observé plusieurs fois.

On a souvent désigné, à tort, sous le nom d'arc-en-ciel, les *couronnes*, les *halos* et d'autres cercles irisés, qui se montrent dans certaines circonstances atmosphériques, mais qui en diffèrent essentiellement par leur origine.

§ 3. — HALOS, PARHÉLIES ET PHÉNOMÈNES CONCOMITANTS.

2723. Description des phénomènes. — Les phénomènes complexes dont nous allons nous occuper sont produits par de petites aiguilles ou par des lames prismatiques de glace flottant dans l'atmosphère, ou descendant très-

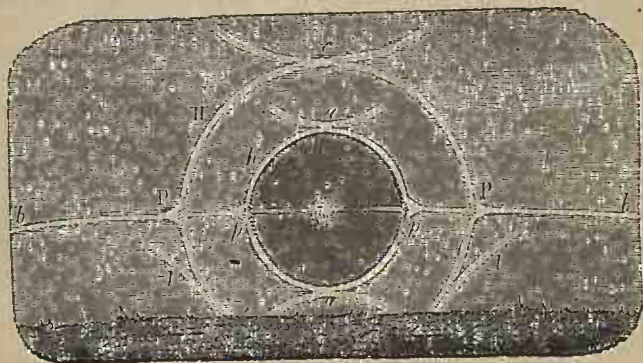


Fig. 1900.

lentement à cause de leur faible masse; leur présence donne à l'atmosphère un éclat particulier et une teinte blanchâtre; elles réfractent ou réfléchissent les rayons solaires, en produisant divers effets que nous allons d'abord énumérer.

1° Les *halos* sont deux cercles verticaux *h*, *H* (fig. 1900), concentriques au soleil, d'un rouge pâle en dedans, et blancs ou bleuâtres en dehors où le contour est très-diffus. Le diamètre apparent de ces cercles est constant : la moitié de celui du *petit halo* ou *halo intérieur*, *h*, est de 22 à 23°, et le demi-diamètre apparent du *grand halo* ou *halo extérieur* *H*, de 46°. L'intérieur du petit halo présente une teinte foncée qui contraste avec l'éclat de l'atmosphère à l'extérieur, et forme une aire sombre (*ζλως*), qui suffit pour faire remarquer le phénomène quand le cercle coloré est à peine visible. Souvent les *halos* paraissent allongés dans le sens vertical, et semblent diminuer de diamètre à mesure que le soleil s'élève au-dessus de l'horizon; mais ce sont là des illusions qui disparaissent devant des mesures directes.

2° Les *parhélies* ou *faux soleils*, sont des images diffuses du soleil *p*, *p*, qui

se montrent aux extrémités du diamètre *horizontal* du petit halo, et un peu en dehors de ce cercle, quand le soleil n'est pas trop près du zénith. Ces images sont colorées en rouge en dedans, puis viennent les autres couleurs du spectre, les plus réfrangibles très-faibles, et le violet, invisible et remplacé par une espèce de traînée horizontale blanche de 10 à 20° de longueur, dont l'éclat diminue rapidement. Il se forme aussi des parhélies P, P, sur le halo de 46°, mais plus rarement, et les couleurs en sont généralement très-peu distinctes.

3° On voit assez souvent des arcs *tangents a*, *a* aux extrémités du diamètre vertical du petit halo. Ils sont bordés de rouge en dedans, et leur forme diffère de celle d'un arc de cercle. Quelquefois, ces arcs ne sont visibles que dans les parties voisines du point de contact avec le halo; ils constituent alors ce qu'on nomme quelquefois *parhélies verticaux*.

4° Le halo de 46° peut être accompagné d'*arcs tangents*. On en voit de tangents à l'extrémité du diamètre vertical *c*; l'arc est alors horizontal et a pour pôle le zénith de l'observateur; c'est pourquoi il est souvent nommé *cercle circumzénithal*. Il peut être très-brillant pendant que le halo de 46° est invisible; on le prend alors quelquefois pour un arc-en-ciel renversé. Les autres arcs sont tangents en des points situés entre les extrémités du diamètre vertical et du diamètre horizontal; ce sont les arcs *infra-latéraux l*, *l*, et *supra-latéraux*; ils sont symétriques par rapport au plan azimutal du soleil, et leur point de contact dépend de la hauteur de l'astre. Les arcs supra-latéraux sont extrêmement rares.

Les apparences précédentes sont produites par réfraction, et présentent des couleurs; celles qui suivent sont dues à la réflexion.

5° Le *cercle parhélique*, ainsi nommé par Babinet, est un cercle *blanc* horizontal *bpb* ayant son pôle au zénith, et passant par le centre du soleil, en coupant les deux halos; il fait quelquefois tout le tour de l'horizon.

6° L'*anthélie* est une image blanche très-diffuse du soleil, située à l'opposé de cet astre, sur le cercle parhélique. Quelquefois, deux arcs blancs se croisent obliquement sur l'anthélie et s'étendent à des distances qui peuvent être considérables. L'anthélie peut être aussi accompagnée de plusieurs images du soleil faibles et diffuses, situées de part et d'autre et symétriquement sur le même cercle; on les nomme *paranthélies*.

7° Les *colonnes verticales* sont des traînées lumineuses blanches verticales, qui accompagnent parfois le soleil couchant, même dans nos climats, peuvent se voir avant son lever, et s'étendent au-dessus et au-dessous de l'astre, souvent à plus de 25°. Ces traînées forment, avec la partie du cercle parhélique qui coupe le soleil, une croix à bras inégaux dont le soleil occupe le point de croisement, et qui peut être entourée par le petit halo.

8° Enfin, les *faux soleils* sont deux images blanches du soleil à contours assez nets, situées au-dessus et au-dessous de l'astre, qu'elles semblent toucher. Ils ne se montrent que lorsque le soleil est près de l'horizon.

Les phénomènes que nous venons d'énumérer sont quelquefois accompagnés

de diverses autres apparences, mais très-rares. Ils peuvent être produits par les rayons de la lune et portent alors le nom de *halos lunaires* et de *parasélènes*; mais leur éclat est beaucoup plus faible, et les couleurs sont à peine distinctes. Les explications sont les mêmes quand le météore est produit par le soleil ou par la lune. Ajoutons qu'il est très-rare qu'on aperçoive en même temps toutes les apparences dont nous venons de parler; les plus fréquentes sont le *petit halo*, les *parhélies* et le *cercle parhélique*.

2734. Origine des halos et des parhélies. — Les halos et les phénomènes qui les accompagnent ont été décrits par les anciens, qui ont même tenté de les expliquer. Sénèque considère les parhélies comme des images du soleil, formées dans des nuages lisses et brillants. Huyghens, qui le premier a considéré les principales circonstances du phénomène, supposait en suspension dans l'air, des cylindres et des globules de glace opaque enveloppés d'une couche d'eau; mais de semblables corps n'existent pas. Mariotte, vers 1740, puis Venturi, trouvaient la véritable origine des halos et des parhélies dans des aiguilles de glace à angle réfringent de 60° flottant dans l'atmosphère. La théorie de Mariotte, d'abord abandonnée pour celle d'Huyghens, a été reprise par Brewster et par Arago, puis adoptée par tous les physiciens qui se sont occupés du même sujet, parmi lesquels Fraunhofer, Young, Brandes, Galle, Babinet, Bravais.

La première chose à faire était de prouver la présence des aiguilles de glace pendant l'apparition des halos; c'est ce qu'a fait Bravais, auquel on doit un travail étendu sur ces curieux météores, en relevant les circonstances d'un grand nombre de halos décrits par divers observateurs¹. On a vu des halos très-rapprochés se produire dans une pluie de particules glacées, être interrompus dans les mêmes endroits que cette pluie, et cesser en même temps qu'elle. C'est surtout dans les régions polaires que ces faits ont pu être observés. Quelquefois, les parcelles de glace forment une espèce de brouillard d'un éclat éblouissant. Les cirrus étant formés de parcelles de glace, et se montrant à toutes les latitudes dans les régions élevées de l'atmosphère, on conçoit que des halos aient pu être observés en toute saison, et même entre les tropiques, où l'on en a, en effet, plusieurs fois observé. La forme des cristaux de glace flottant dans l'air est très-variable; nous en avons donné plusieurs dessins (II, 1467). Les prismes sont généralement hexagonaux; aucun rayon ne peut traverser quand il rencontre deux faces consécutives, dont l'angle est de 120° , mais deux faces séparées par une troisième font entre elles un angle de 60° , et c'est à travers de semblables faces, qui, considérées deux à deux, forment six prismes égaux, que passent les rayons qui produisent les halos.

Puisque ces météores sont produits par la réfraction dans des cristaux de glace, la mesure de l'indice et de la dispersion de la glace devait précéder toute théorie complète de ces phénomènes. C'est ainsi qu'a procédé Bravais. Ayant

¹ Ann. de ch. et de phys., 3^e série, t. XXI, p. 36, et Journ. de l'Éc. polytech., t. XVIII.

taillé un prisme de glace pure, et dressé ses faces au moyen d'un fer chaud, il l'engagea entre deux lames de verre, un peu chaudes pour que la coïncidence fût complète. Il mesura ensuite l'indice de réfraction du rayon moyen, dans chaque couleur, et trouva les résultats suivants, à 0,001 près :

rouge	orange	jaune	vert	bleu	violet
1,3070	1,3085	1,3095	1,3115	1,3150	1,3170

2725. Explication des halos. — Le halo de 22° a été expliqué par Mariotte et Venturi. Supposons qu'il y ait en suspension dans l'air, entre le soleil et l'observateur, une multitude de petites aiguilles prismatiques de glace, orientées et tournées sur elles-mêmes de toutes les manières : celles qui sont à un peu près *perpendiculaires* à un plan quelconque passant par le soleil et par l'œil de l'observateur, enverront de la lumière réfractée, suivant toutes les directions dans ce plan. Mais il y aura une direction dans laquelle la lumière sera la plus intense. En effet, les prismes, qui sont placés de manière à donner le *minimum de déviation*, peuvent être un peu tournés sur eux-mêmes sans que cette déviation change sensiblement. C'est donc comme si les prismes ainsi placés étaient plus nombreux que tous les autres. D'un autre côté, les prismes qui tournent sur eux-mêmes envoient dans l'œil un faisceau de lumière qui ne fait qu'y passer très-rapidement; mais ceux qui sont à une distance angulaire du soleil telle qu'ils jettent dans l'œil les rayons qu'ils réfractent au moment où ces rayons éprouvent la déviation minimum, produisent une impression plus vive, parce que le faisceau continue à passer par l'œil pendant une certaine rotation du prisme. Les rayons qui passent par l'œil après avoir éprouvé la déviation minimum, se nomment *rayons efficaces*.

La *déviation minimum* d est donnée par la formule $\sin \frac{1}{2}(d+a) = n \sin \frac{1}{2}a$ (2512). Faisant $a=60^\circ$, et $n=1,31$, qui est l'indice de réfraction de la glace pour les rayons rouges, on trouve $d=21^\circ 50', 2$, ou à très-peu près 22° .

Cela posé, soit *pos* (fig. 1901) un plan quelconque mené par l'œil o de l'observateur et par le centre du soleil, et p un prisme perpendiculaire à ce plan. Les rayons partant d'un point du soleil étant parallèles à la droite so qui passe par ce point, la déviation dans le prisme p , d'un rayon arrivant en o , sera égale à l'angle o . Si donc le prisme est à une distance angulaire du soleil égale à 22° , les rayons rouges qui en émergent arriveront à l'œil après avoir éprouvé la déviation minimum, la lumière sera plus vive dans cette direction que dans toute autre, et l'on observera un point rouge. Si l'on fait la même construction pour tous les points du disque solaire, on aura, dans le plan sop , une bande rouge, de $31'$; et, si l'on fait tourner ce plan autour de so , un cercle rouge ayant le demi-diamètre apparent, 22° , du petit halo. Les autres rayons colorés ayant des

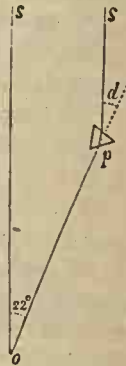


Fig. 1901.

indices plus grands que les rayons rouges, on voit que d sera plus grand, et par conséquent les cercles jaune, vert, etc., se disposeront en dehors du cercle rouge. Les couleurs se superposant en partie, à cause du diamètre apparent du soleil, il n'y a que le rouge qui soit à peu près pur. On voit que le halo, comme l'arc-en-ciel, est un phénomène local, c'est-à-dire que deux observateurs ne voient pas le même halo.

La teinte sombre que nous avons signalée dans l'intérieur du petit halo (2723) s'explique facilement; car il ne peut arriver aucun rayon réfracté par les aiguilles de glace, dans une direction formant avec os un angle moindre que 22° , c'est-à-dire moindre que le minimum. A une distance angulaire du soleil plus grande que 22° , il y aura parmi les prismes orientés de toutes les manières, quelques-uns qui enverront des rayons réfractés dans l'œil, ce qui explique l'éclat de l'atmosphère à l'extérieur du petit halo¹.

Halo de 46° . — On a fait beaucoup d'hypothèses sur le halo de 46° ; Cavendish en a donné la véritable explication, qui est la même que celle du petit halo, seulement, il faut considérer des angles réfringents de 90° , au lieu d'angles de 60° . Ces angles existent dans des prismes hexagonaux à bases planes, dont on a souvent constaté l'existence, et qui présentent douze angles de 90° , formés par les deux bases avec les six faces latérales. La déviation minimum pour $a=90^\circ$, est $d=45^\circ 44'$, valeur sensiblement égale au demi-diamètre apparent du grand halo. Comme les prismes de glace ne sont pas toujours terminés par des bases planes, on conçoit que le grand halo soit plus rare que le petit; les couleurs y sont mieux séparées, parce que l'angle réfringent est plus grand, mais elles sont moins vives, les bases étant très-petites et les pinceaux émergents ayant une très-petite section.

Il peut se former un troisième halo, dont le diamètre est de 90° , et dans lequel le violet est intérieur. Ce phénomène, extrêmement rare, est produit par des rayons qui éprouvent avant d'émerger une réflexion totale intérieure, à peu près comme cela a lieu pour le premier arc-en-ciel.

Brewster imite les halos, en regardant une bougie à travers une lame de verre recouverte d'une légère cristallisation d'alun ou de chlorure d'étain. Le premier sel permet de distinguer trois cercles concentriques².

2726. Explication des parhélies. — Si l'atmosphère est calme, ce qui a lieu ordinairement quand il se forme des halos, la plupart des aiguilles de glace, gênées par la résistance de l'air, tomberont verticalement, et l'éclat du petit halo sera beaucoup plus vif à chaque extrémité du diamètre horizontal, où il y aura des taches brillantes rouges en dedans, constituant les *parhélies*.

Quand le soleil monte au-dessus de l'horizon, le plan passant par le diamètre

¹ Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse, t. IV (1860), p. 370.

² Arago a reconnu que la lumière des halos est polarisée dans un plan perpendiculaire à leur diamètre; on en doit conclure, comme nous le verrons plus tard, que cette lumière est réfractée, ce qui confirme les explications de Mariotte et de Cavendish.

horizontal du halo et par l'œil de l'observateur devenant plus oblique aux prismes verticaux, les rayons arrivant à l'œil devront traverser ces prismes dans une section oblique, et seront dans le même cas que s'ils avaient traversé, suivant la section droite, un prisme de plus grand angle. La déviation minimum sera donc plus grande, et, par conséquent, les parhélies devront s'éloigner du halo. C'est, en effet, ce qui a lieu; Bravais a calculé l'écart en fonction de la hauteur du soleil, et a trouvé un accord satisfaisant entre les résultats du calcul et les mesures prises dans un grand nombre d'observations, dont il a fait le relevé dans les recueils scientifiques. Le calcul indique que les parhélies sont impossibles quand la hauteur du soleil dépasse $60^{\circ} 45'$, hauteur pour laquelle les rayons incidents et émergents seraient couchés sur les faces du prisme. Mais, en réalité, on n'a pas vu de parhélies quand la hauteur du soleil dépasse 50° , les rayons incidents très-obliques éprouvant une très-grande perte, par les réflexions sur les faces d'entrée et de sortie.

Parhélies de 46° . — Brandes a voulu expliquer ces parhélies de la même manière que ceux du petit halo, au moyen de prismes dont une des arêtes de la base serait verticale, de manière à former un angle réfringent de 90° à arête verticale. Mais, comme le remarque M. Galle, il n'y a aucune raison pour qu'une arête quelconque de la base soit plutôt verticale que dans toute autre position. Bravais pense que les parhélies de 46° , peu brillants et plus rares que ceux du petit halo, sont des effets secondaires de ces derniers; ils seraient produits par des rayons ayant prouvé des déviations minimum de même sens dans deux prismes verticaux, de manière que la déviation totale, égale à la somme de deux déviations, projeterait l'image formée, à une distance angulaire du soleil égale à $22^{\circ} \times 2 = 44^{\circ}$, qui diffère peu de 46° .

2727. Explication des arcs tangents au halo de 22° . — Ces arcs a , a (fig. 1900) sont symétriques par rapport à la verticale. Quand le soleil sort de l'horizon, les branches forment d'abord un angle de 42° avec la verticale, puis elles tournent peu à peu leur convexité vers le zénith, *nen'* (fig. 1902). Ce renversement de courbure est très-sensible à partir de 6° du point de contact. — Venturi et M. Galle avaient voulu expliquer ces arcs tangents par la réfraction dans les pyramides qui surmontent souvent les petits prismes hexagonaux; mais Young a trouvé la véritable explication dans la présence de prismes horizontaux flottant dans l'atmosphère, et orientés de toutes les manières. Ceux qui sont perpendiculaires au plan vertical P, qui passe par le centre du soleil et par l'œil de l'observateur, et qui sont tournés sur eux-mêmes de manière à lancer dans l'œil des rayons ayant éprouvé la déviation minimum, donnent deux taches brillantes situées l'une en haut, l'autre en bas du halo; ce sont les *parhélies verticales*. Les prismes horizontaux inclinés par rapport au plan P, envoient à l'œil des rayons, qui, ayant traversé une section oblique, et se trouvant, par conséquent, dans le même cas que s'ils avaient traversé suivant la section droite un prisme à angle plus grand que 60° , auront une déviation minimum plus grande que les premiers. Ceux de ces prismes qui enverront des

rayons efficaces à l'observateur, seront donc d'autant plus écartés du plan P, qu'ils seront plus inclinés sur ce plan. Cette théorie a été adoptée par Brande et par Bravais qui, l'ayant soumise au calcul, a trouvé des résultats parfaitement d'accord avec les observations.

Halo circonscrit. — L'observation et la théorie ont prouvé que les branches de l'arc s'abaissent d'autant plus, que le soleil est plus élevé au-dessus de l'horizon. Quand la hauteur est de 20° environ, le calcul indique que les branches des arcs tangents supérieur et inférieur se joignent, de manière à ne former qu'une seule courbe; mais les parties latérales de cette courbe sont très-faibles, et ne commencent à être distinctes que lorsque la hauteur du soleil est de 39 à 40° ; alors la courbe ressemble à une ellipse *acb* (fig. 1902), touchant le petit halo en haut et en bas, et nommée *halo circonscrit*. C'est Venturi qui, le premier, a expliqué le halo circonscrit par des prismes horizontaux. Quand ces prismes sont très-nombreux, le halo circonscrit peut apparaître pendant que le petit halo est invisible.

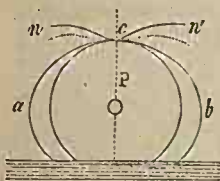


Fig. 1902.

2728. Arcs tangents au halo de 46° . — Ces arcs peuvent être tangents aux extrémités du diamètre vertical, ou latéralement. L'arc tangent supérieur forme souvent la partie la plus brillante du système des halos, les couleurs y présentent un éclat comparable à celui d'un bel arc-en-ciel, les contours en sont très-nets et les couleurs bien séparées; on peut même distinguer le violet. Cet arc paraît horizontal; il semble entourer le zénith, dont il est écarté de 20 à 25° , et vers lequel il tourne son bord violet; sa longueur embrasse de 90° à 120° ; il ne se montre jamais quand le soleil est au-dessous de 12° et au-dessus de 31° . Il paraît souvent sans le halo de 46° , tandis que les arcs tangents du petit halo ne se voient jamais sans lui.

Cet arc tangent supérieur a été expliqué par M. Galle, au moyen de prismes verticaux à base plane, que les rayons solaires traversent en entrant par la base et sortant par une face latérale. M. Galle pensait que les rayons ne pouvaient être efficaces que s'ils étaient également inclinés sur les deux faces de l'angle droit; et il était forcé alors de supposer que les prismes oscillaient autour de leur position verticale, de manière à passer, à chaque oscillation, par la position convenable. Mais Bravais remarque que cette condition n'est pas nécessaire; il suffit que le prisme soit à une hauteur telle que les faisceaux réfractés, qui sont tous parallèles pour une même orientation des prismes verticaux, passent par l'œil de l'observateur. Cette hauteur dépend de celle du soleil, et est plus grande pour les rayons violets que pour les rouges. Si nous considérons des prismes placés à une certaine distance angulaire du vertical P (fig. 1902), il faudra, pour qu'ils envoient dans l'œil le pinceau qu'ils réfractent, que le plan d'émergence passe par l'œil, et par conséquent qu'une des faces latérales du prisme soit tournée vers l'observateur. Comme le plan d'incidence reste toujours parallèle à P, on voit que le faisceau émergent sera oblique à ce plan. Le calcul montre que,

lorsqu'un prisme tourne sur lui-même pendant qu'un rayon fixe entre par sa base, le rayon émergent par une des faces latérales décrit un cône droit autour de l'axe du prisme. On voit donc que tous les rayons émergents entrant dans l'œil, seront sur un cône vertical droit, ayant son sommet dans l'œil, et que l'arc sera un petit cercle horizontal ayant son pôle au zénith. — L'arc tangent inférieur ne se voit que très-rarement; il faut que le soleil soit au moins à 46° de l'horizon; il s'explique de la même manière, seulement les rayons solaires entrent, dans ce cas, par la face latérale des prismes verticaux, et sortent par la base inférieure.

Les arcs *infra-latéraux* et *supra-latéraux* sont engendrés par des prismes horizontaux; aussi se montrent-ils quand les arcs tangents au petit halo sont très-brillants. Leur position dépend de la hauteur du soleil. Bravais en a développé la théorie par le calcul, et a retrouvé par ce moyen toutes les circonstances du phénomène.

2729. Reproduction artificielle des phénomènes engendrés par des prismes verticaux. — Bravais reproduit ces phénomènes, au moyen d'un

petit appareil qui consiste en un prisme vertical p (fig. 1903) fixé sur un arbre qu'un ressort d'horlogerie fait tourner avec une vitesse d'une centaine de tours par seconde, de manière à réaliser en un temps très-court la série des positions des prismes verticaux de glace. L'appareil est installé dans une chambre obscure. Pour imiter les parhélies, on place une bougie B à une distance de 7 à 8 mètres de l'appareil et à la hauteur du prisme; on couvre une des faces de ce dernier, et le regardant pendant

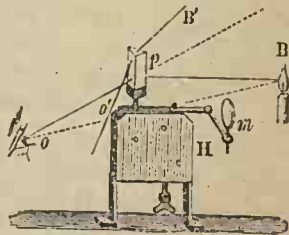


Fig. 1903.

qu'il tourne, dans une direction faisant un angle de 20 à 25° avec la ligne oB , de manière que les rayons qui arrivent à l'œil o aient éprouvé la déviation minimum, on voit une image irisée de la bougie, le rouge en dedans, avec une queue blanche en dehors.

Pour imiter les cercles tangents circumzénithaux, on masque deux faces du prisme, et l'on place la bougie en B' , de manière que l'angle formé par les rayons qui tombent sur la base supérieure fassent un angle de 15 à 20° avec l'horizon. On place l'œil en o' très-près du prisme, et l'on aperçoit, pendant la rotation, un arc irisé au plafond de la chambre. Quelquefois le cercle est double, ce qui provient de réflexions intérieures, qu'on peut éviter en couvrant de papier noir les parties inférieures de la face non masquée. — Dans ces expériences, il faut masquer certaines faces, parce que les arêtes n'étant pas toujours exactement parallèles, les apparences pourraient être multiples.

2730. Explication du cercle parhélique. — Ce cercle, qui passe par le soleil, et aussi nommé *cercle blanc*, est produit par réflexion, comme Huyghens l'a admis dès le principe. Young l'a expliqué par la réflexion sur des prismes verticaux supposés en majorité, et orientés de manière à envoyer des

rayons réfléchis à l'observateur. Le cercle parhélique est toujours horizontal; car, quelle que soit la hauteur du soleil, l'image de cet astre est toujours symétrique par rapport à la surface réfléchissante, qui est verticale. Babinet joint aux réflexions sur les faces latérales des cristaux verticaux, celles qui se font sur les bases de lames prismatiques, tombant les bases verticales; et Bravais, les réflexions multiples, qui peuvent avoir lieu dans l'intérieur des prismes verticaux.

Babinet imite le cercle blanc, en regardant une bougie, ou le soleil, à travers un cristal à structure fibreuse, taillé en lame parallèle aux fibres et que l'on place verticalement; on voit alors une bande horizontale blanche, produite par les fibres miroitantes orientées de toutes les manières.

On voit, très-rarement, des cercles parhéliques inclinés à l'horizon. MM. Galle et Bravais les attribuent à des réflexions sur les faces de pyramides terminant les prismes verticaux.

2731. Anthélics et paranthélics. — L'*anthélic*, qui se montre à l'opposé

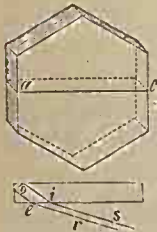


Fig. 1904.

du soleil, sur le cercle parhélique, a été expliquée par Bravais, au moyen de lamelles hexagonales tombant verticalement un angle en bas, l'axe cristallographique étant horizontal. Ces lamelles présentent différents angles réfringents: 1° en considérant deux faces latérales non contiguës, il y a trois angles dièdres de 60° à arêtes horizontales; 2° quatre angles de 90° à arêtes verticales, et pouvant donner lieu au parhélisme de 46° (2726); 3° huit angles droits à arêtes inclinées de 30° sur l'horizon. Cela posé, soit *ac* (fig. 1904) un plan horizontal traversant le cristal. Un rayon réfléchi en dedans en rencontrant trois faces verticales, comme en

sioer, reviendra sur lui-même après deux réflexions, et produira dans les lamelles opposées au soleil et convenablement orientées, une tache blanche appartenant à l'*anthélic*. Si le soleil s'élève au-dessus de l'horizon, il en sera de même; seulement le plan *ac* sera oblique aux arêtes verticales du prisme.

Les arcs obliques qui se croisent à l'*anthélic*, et qui se prolongent quelquefois jusqu'au soleil, sont attribués par Bravais à des stries d'accroissement qui recouvrent parfois les bases hexagonales des lamelles de glace. S'il y a un grand nombre de cristaux orientés de la même manière, ces stries donnent lieu à des effets lumineux.

Les *paranthélics* sont produits par des réflexions sur des aiguilles verticales présentant des angles rentrants, dont la section *a*, par exemple, la forme d'une étoile à six ou à un plus grand nombre de pointes. La réflexion *intérieure* sur deux faces formant quelques-unes des pointes, donne, pendant que les cristaux tournent sur eux-mêmes, une déviation constante égale au double de l'angle des faces réfléchissantes (2437). Les cristaux qui sont convenablement orientés, et à une distance angulaire de l'azimut du soleil égale à la déviation, donnent une image de cet astre, qui est un *paranthélic*. La déviation, et par conséquent

la position de cette image, dépendant de l'angle des deux faces réfléchissantes, on conçoit que les paranthélies se montreront à des distances variables de l'anthélie, suivant le nombre d'angles rentrants du cristal. On n'a observé de paranthélies que dans un espace compris entre 90° et 140° du soleil. Ils peuvent être colorés ; cela dépend de la manière dont se combinent les réfractions et les réflexions intérieures (2577).

2732. Imitation du cercle parhélique et des anthélies. — Le prisme tournant *p* (fig. 1903) placé à une distance de 7 à 8 mètres à la hauteur de la bougie B, laisse voir de la lumière blanche réfléchi, dans quelque direction que l'on regarde ; cette lumière est celle qui forme le cercle parhélique. Si l'on emploie un prisme creux en verre, et si l'on regarde à 12° de la bougie, on voit une tache blanche qui est un paranthélie. Si l'on remplit ce prisme d'eau, on voit, à 98° , un paranthélie coloré ayant le rouge à l'opposé de la bougie.

Pour reproduire l'anthélie, on installe, sur l'axe tournant, une plaque de verre formant un parallépipède rectangle dont quatre arêtes sont parallèles à l'axe de rotation. Comme les rayons incidents seraient interceptés par la tête de l'observateur, les rayons qui produisent l'anthélie revenant sur eux-mêmes, on fait réfléchir les rayons incidents par un petit miroir *m* à support articulé (fig. 1903). Trois faces latérales de la plaque étant masquées, on voit une tache blanche produite par les réflexions intérieures qui donnent l'anthélie.

On imite les arcs obliques qui passent quelquefois par l'anthélie, en recouvrant la face de la plaque tournante, d'une couche grasse imperceptible, sur laquelle on produit des stries obliques bien parallèles entre elles, au moyen d'une brosse guidée par une règle.

2733. Colonnes verticales et faux soleils. — Venturi attribuait les leurs verticales, à la réflexion des rayons solaires sur des prismes horizontaux à axe perpendiculaire au plan azimutal du soleil. Babinet a complété cette théorie en admettant des prismes à axe très-court, tendant à tomber les bases verticales, et orientés de façon que ces bases soient parallèles au plan azimutal du soleil. Les réflexions sur les faces latérales produisent des images solaires dont la hauteur dépend de l'inclinaison de ces faces sur l'horizon, et qui ne peuvent se voir que dans le vertical de l'astre, passant par l'œil. Bravais suppose des réflexions sur les bases planes, ou mieux terminées par des tablettes planes (II, 1467) de prismes verticaux oscillant pendant leur chute, de manière à présenter périodiquement aux rayons solaires leurs bases sous différentes obliquités. Quand la traînée est très-longue, il admet plusieurs réflexions dans l'intérieur du cristal.

Kaentz a été témoin d'un phénomène qui vient à l'appui de l'explication de Babinet. Il a vu une traînée lumineuse qui, partant du soleil, se continuait sur le sol et arrivait jusqu'à ses pieds. L'atmosphère était remplie de lames hexaédriques de $\frac{1}{2}$ mm de diamètre, à bases très-brillantes.

Les faux soleils n'ont pas reçu jusqu'à ce jour d'explication complète. Quelques physiciens ont voulu y voir des effets de mirage, d'autant mieux qu'ils

ne se montrent que lorsque le soleil est tout près de l'horizon. Bravais est parvenu à très-bien représenter les différents cas observés, en supposant des prismes verticaux terminés par des pyramides dont les faces sont inclinées de $89^{\circ} 58'$ sur l'axe. Les rayons qui, entrant par une face latérale du prisme, éprouvent deux réflexions totales intérieures sur deux faces opposées de la pyramide formant un angle de $179^{\circ} 46'$, et sortant par la face opposée du prisme, donneraient lieu à l'une des images du soleil; l'autre serait produite de la même manière par la pyramide opposée.

2734. Remarque. — Il résulte des différentes explications que nous venons d'exposer, que les divers phénomènes qui constituent le système des halos, sont produits par des cristaux de glace de formes différentes ou différemment placés. Il doit donc arriver rarement que les diverses conditions soient réalisées toutes en même temps, ce qui explique pourquoi l'on n'observe ordinairement qu'une partie des phénomènes. C'est dans les régions polaires qu'on observe le plus souvent les apparences les plus complètes. Quant au petit halo, il peut être fréquent dans des latitudes assez basses. Nous en avons souvent observé à Toulouse, entre autres 12 cas au printemps des années 1860 et 1861¹, ainsi que des parhélies, des colonnes verticales, et quelquefois l'arc tangent supérieur au grand halo.

Indépendamment des phénomènes que nous avons décrits, il se présente, mais très-rarement, d'autres cercles concentriques au soleil, ou coupant horizontalement les halos au-dessus ou au-dessous de l'astre, ou en passant par son centre; ou bien des arcs tangents, des parhélies blancs ou colorés autres que ceux dont nous avons parlé. Ces apparences rares sont produites par des faces pyramidales terminant les cristaux; par des rayons qui ont subi plusieurs réflexions intérieures; par des rayons qui ont traversé successivement plusieurs cristaux; ou enfin, par les parhélies ou les différents arcs que nous avons étudiés, se comportant eux-mêmes comme sources de lumière, et donnant lieu à des systèmes d'apparences semblables, mais très-faibles. On conçoit combien les phénomènes doivent être compliqués, quand il se produit ainsi des effets secondaires.

Dans une notice contenant la description d'un grand nombre de ces météores, MM. Decharme et A. Cheux en signalent plusieurs brillants et compliqués, observés en France. M. Decharme conclut de ses nombreuses observations à Angers, que les halos annoncent la pluie ou la neige pour le jour même, le lendemain, ou au plus tard le surlendemain; ce qui s'explique en remarquant que ces phénomènes attestent la présence dans les régions supérieures de l'atmosphère de vastes nuages de parcelles glacées, qui s'abaissent peu à peu jusqu'à la région des nimbus.

¹ *Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse*, t. V (1684), p. 413.

CHAPITRE VII

VISION SIMPLE ET INSTRUMENTS GROSSISSANTS

O multiscium, et quovis sceptro preciosius
 Perpicillum I an, qui te dextrâ tenet, ille non
 Rex, non Dominus constituatur operum Dei?
 Verè tu, Quod supra caput est, magnos cum
 motibus, orbes subjicis ingenio.

(J. KEPLERI *Dioptrice*, prefatio.)

2735. La *vision* est la fonction physiologique par laquelle nous percevons, au moyen de l'organe de la vue, la forme, les couleurs et, en général, toutes les qualités des corps qui dépendent de la lumière. Une simple impression produite dans l'œil par la lumière ne constitue pas la vision. Ainsi, on ne *voit* pas, quand on perçoit la lumière qui a traversé une feuille de papier ou du verre dépoli; il faut, pour qu'il y ait *vision*, que l'on puisse discerner la forme et les détails des corps lumineux ou éclairés.

La vision est *simple*, quand l'organe de la vue est abandonné à ses seules ressources; et *composée*, quand il est aidé par des instruments d'optique destinés, à en étendre les limites.

§ 1. — VISION SIMPLE

I. Description de l'œil et mécanisme de la vision.

2736. Appareil de la vision chez l'homme. — Cet appareil consiste principalement en deux globes, NT (*fig. 1905*), contenant différentes humeurs, et logés dans des cavités pyramidales nommées *orbites de l'œil*, formées par divers os du crâne et de la face, et où ils sont préservés du contact des parois osseuses par des masses de graisse. Trois paires de muscles impriment à chaque globe (*fig. 1905*) divers mouvements sur lui-même. Les *muscles droits*, au nombre de quatre, le meuvent, les uns, *m, m*, dans le plan vertical, les autres dans le plan horizontal, suivant une amplitude de 110° environ. Les deux *muscles obliques* le font tourner autour d'un axe dirigé d'avant en arrière; ils sont placés obliquement, celui qui se trouve du côté du nez plus haut que l'autre.

Le globe de l'œil est retenu dans son orbite par ces six muscles, et aussi

par une membrane, *aa*, qui adhère à sa surface antérieure et se rattache à la partie interne des paupières *p, p*. Cette membrane, nommée *conjonctive*, se replie sur elle-même quand celles-ci se ferment, et dans ce mouvement étend sur la face antérieure de l'œil un liquide aqueux, sécrété par la *glande lacrymale* située derrière la conjonctive, à la partie externe et supérieure de chaque globe oculaire. L'excédant de ce liquide se rend dans les narines, par un petit canal qui s'ouvre à l'angle interne des paupières. Quand la sécrétion en est trop abondante, par exemple, sous l'influence des émotions de l'âme, par l'action de l'air froid ou de vapeurs irritantes, il déborde et forme les *larmes*. Les *sourcils* arrêtent la sueur qui découle du front, interceptent la lumière qui vient d'en haut, et la saillie osseuse de l'arcade sourcilière préserve le globe de certains chocs. Les *cils* arrêtent les impuretés qui flottent dans l'air et qui viendraient ternir la surface de la conjonctive, ou y produire une irritation douloureuse.

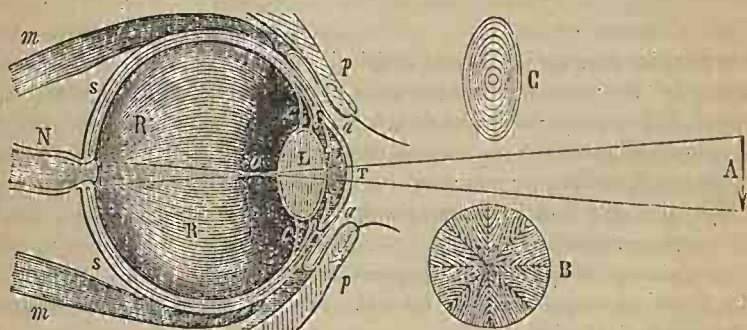


Fig. 1905.

2737. Description du globe de l'œil. — La figure 1905 représente une coupe du globe de l'œil par un plan vertical dirigé d'avant en arrière. Ce globe est formé d'une enveloppe composée de deux parties de courbure différente : l'une très-résistante, blanche, opaque, forme la plus grande partie de l'enveloppe; on la nomme *cornée opaque* ou *scélrotique*; l'autre, *T*, d'un moindre rayon, placée en avant, est transparente et incolore; on la nomme *cornée transparente*; on peut sentir la saillie qu'elle forme, en appuyant le doigt sur la paupière abaissée et faisant mouvoir l'œil. Ces deux parties, de structure différente, sont soudées l'une à l'autre par leur bord taillé en biseau, et peuvent être séparées après la mort, par la macération.

Iris, pupille. — Derrière la cornée transparente est tendue verticalement la membrane de l'*iris*, *ii*, diaphragme circulaire coloré en brun, bleu ou gris, et constituant la prunelle, autour de laquelle on aperçoit une partie de la scélrotique, formant le blanc de l'œil. La membrane de l'iris est composée de fibres rayonnantes transparentes; son opacité et sa couleur proviennent d'une membrane très-mince, l'*uvée*, qui la tapisse en dedans, et sur laquelle on distingue

des stries irrégulièrement rayonnées, formées par un lacis très-délicat de nerfs et de vaisseaux. Au centre de l'iris, est une ouverture circulaire nommée *pupille*, qui peut s'agrandir par la contraction des fibres rayonnantes de l'iris, et se rétrécir par la contraction de fibres circulaires formant un bourrelet sur son contour, du côté interne. Les fibres de l'iris sont excitables par l'électricité; seulement, au lieu de se contracter brusquement, comme les fibres musculaires, elles le font avec une lenteur caractéristique.

Cristallin. — Derrière la pupille se trouve le *cristallin* L, corps lenticulaire transparent, assez mou, et dont la face postérieure est plus convexe que l'antérieure. Il contient assez d'albumine et de gélatine pour se coaguler entièrement dans l'eau bouillante. Il est formé de couches superposées, figurées à part en C, et dont l'indice de réfraction va en augmentant, de l'extérieur à l'intérieur. Suivant Brewster et Gordon, les indices des couches extérieures moyennes et centrales, sont 1,377, 1,386 et 1,399. Le cristallin est enveloppé d'une membrane mince, qui forme la *capsule cristalline*; il est soutenu, sur son contour, par une membrane plissée, la *couronne ciliaire*, dont les plis triangulaires se nomment *procès ciliaires*. La ligne droite qui passe par le centre de la pupille et le centre de figure du cristallin, forme l'*axe de l'œil*.

Chambres de l'œil. — Le cristallin et la couronne ciliaire divisent l'œil en deux parties inégales nommées *chambre antérieure* et *postérieure*. La première est remplie par l'*humeur aqueuse*, qui n'est que de l'eau contenant de très-petites quantités de gélatine et d'albumine. Son indice de réfraction, 1,337, ne dépasse que de 0,001 celui de l'eau. La *chambre postérieure* est remplie par l'*humeur vitrée*, substance incolore, parfaitement transparente, ayant la consistance d'une gelée tremblante, et dont l'indice est 1,339.

Hyaloïde. — Le corps vitré est enveloppé par une membrane transparente très-délicate, l'*hyaloïde*, dont une partie enveloppe le cristallin en formant la *capsule cristalline*. Demour, en 1741, a avancé que l'hyaloïde envoyait des replis multipliés à travers le corps vitré, de manière à le soutenir sans que ses parties supérieures comprimassent les parties inférieures. Mais ce fait a été contesté depuis, et l'on n'est pas d'accord sur la structure du *corps vitré*, que certains physiologistes supposent formé de couches concentriques.

Choroïde. — L'intérieur de la sclérotique est tapissé par la *choroïde*, membrane mince sur laquelle est appliquée l'hyaloïde, et qui est remplie de fibres et de vaisseaux par lesquels elle adhère à la sclérotique, et qui sont contournés d'une manière très-compiquée. La choroïde est recouverte sur sa face interne d'un pigment noir. Les *procès ciliaires*, qui soutiennent le cristallin par son contour, en sont la continuation, et elle s'étend, en avant, sur la partie postérieure de l'iris, où elle constitue l'*uvée*, qui lui donne sa couleur. Le pigment noir manque chez les *albinos*; il en résulte que le fond de leur œil, qui se voit à travers la pupille, paraît rouge.

Rétine. — La partie sensible de l'œil, celle qui reçoit l'impression de la lumière, est la *rétine*. Elle consiste en une membrane nerveuse, formée par

l'épanouissement d'un gros nerf, le *nerf optique*, N (fig. 1905), qui traverse la sclérotique et la choroïde, sur lesquelles il étale ses fibrilles, RR. Ce nerf appartient à la deuxième paire des nerfs qui partent du cerveau, et entre dans l'œil latéralement, du côté du nez.

Le tableau qui suit contient les dimensions et les rayons de courbure moyens des différentes parties de l'œil humain :

	Dimensions.	Millimètres.		Noms des observateurs.
Profondeur de l'œil..	22	à 24	Petit.
Sclérotique	Rayon de courbure	10	à 11	Petit.
	Épaisseur.....	1,27	à 1,39	Krause.
Cornée transparente.	Rayon de courbure....	7	à 8	Petit.
	Épaisseur.....	0,92	à 1,16	Krause.
	Distance à l'Iris.....	2,47	à 3,24	Krause.
Iris et pupille.....	Diamètre de l'Iris.....	11	à 12	Petit.
	Diamètre de la pupille..	3	à 7	Petit.
	Distance au cristallin..	4		Petit.
Cristallin....	Diamètre.....	9,26	à 9,49	Krause.
	Épaisseur.....	4,63	à 7,17	Krause.
	Rayon antérieur.....	7	à 10	Petit.
	Rayon postérieur.....	5	à 6	Petit.

Les rayons de courbure ont été évalués en supposant que les surfaces appartiennent à des sphères, ce qui n'est vrai qu'à peu près. Il résulte des mesures de Chossat, Krause, Vallée..., qui ont mesuré les distances des différents points de ces surfaces à un plan perpendiculaire à l'axe de l'œil, qu'elles appartiennent à des ellipsoïdes à peu près de révolution autour d'un axe dirigé d'avant en arrière.

2738. Mécanisme de la vision. — Considérons un objet A (fig. 1905), situé à une certaine distance de l'œil; les rayons qui, partis de ses différents points, entreront par la pupille, ayant à traverser différents milieux terminés par des surfaces à peu près sphériques, iront former sur la *surface concave* de la rétine une image renversée de l'objet A. Pour construire cette image, il faudra mener des différents points de A, des axes secondaires passant par le centre optique *o* du système lenticulaire composé du cristallin et du ménisque formé par l'humeur aqueuse, centre optique qui, d'après Volkmann et Vallée, est situé dans le corps vitré, à une petite distance du cristallin. Nous obtiendrons ainsi l'image très-petite de l'objet. Cette image est renversée, et chacun de ses points étant le foyer conjugué d'un point correspondant de l'objet, la rétine est impressionnée par la lumière qui y est concentrée, et l'impression est transmise par le nerf optique, au cerveau, siège de la perception.

Vérification par l'expérience. — La formation de l'image au fond de l'œil, qui constitue le phénomène de la vision, a été constatée directement par

Descartes; voici comment se fait l'expérience : On prend un œil fraîchement extrait du cadavre, et, après l'avoir débarrassé des muscles et de la graisse qui l'enveloppent, on amincit la partie postérieure de la sclérotique, pour la rendre translucide. On engage ensuite l'œil ainsi préparé dans l'ouverture d'une chambre obscure, et l'on voit, à travers la rétine et la sclérotique, l'image renversée et très-petite des objets extérieurs. — On peut encore procéder en pratiquant à la partie supérieure de la sclérotique, une ouverture par laquelle on regarde en dedans à travers le corps vitré, l'image formée sur la rétine. Magendie a eu l'idée d'expérimenter sur des yeux d'animaux albinos, par exemple, de lapins blancs, dont la sclérotique est translucide.

2739. Historique. — Les philosophes de l'antiquité n'avaient sur la vision que des idées erronées. Les pythagoriciens supposaient un feu invisible partant de l'œil et allant palper les objets; c'était le *souffle visuel* des stoïciens. Leucippe suppose des images ou simulacres des objets, flottant autour d'eux, et allant à l'âme en passant par l'œil. Empédocle admet des effluves partant à la fois des corps et des yeux et allant les unes vers les autres. Démocrite, qui regardait la lumière comme une émanation des corps, vise plus juste, quand il dit que l'humeur de l'œil forme un miroir dans lequel se peignent les objets. Euclide, Ptolémée, Héliodore, dont il nous reste quelques fragments sur l'optique, considèrent un cône de rayons partant de l'œil et enveloppant l'objet. Gallien a fait faire un grand pas à la question, en distinguant les nerfs des sens, et en particulier le nerf optique, dont la rétine est une expansion qui arrive jusqu'au *glacial* (cristallin), qu'il croyait en être ainsi la terminaison, et qu'il regardait comme le siège de l'impression; erreur qui a régné longtemps, et que l'on enseignait encore plus de cinquante ans après la découverte des images faites au fond de l'œil. Alhazen, puis Vitellion et Maurolicus, reconnaissent le rôle de la réfraction dans la vision, mais aucun d'eux ne remarque la formation des images. Porta compare l'œil à une chambre noire *simple*, dont la pupille serait l'ouverture, et le cristallin, l'écran destiné à recevoir l'image. Léonard de Vinci avait déjà émis une idée semblable et reconnu que l'image devait être renversée. Enfin, Kepler, après l'invention de la chambre noire à lentille par Porta, dévoile le rôle du cristallin, et découvre la formation de l'image sur la rétine, après avoir été longtemps arrêté par la difficulté qu'il trouvait à l'admettre renversée. Cette préoccupation de vouloir l'image droite a contribué à faire dévier de la bonne route Alhazen et d'autres physiiciens, qui avaient tellement approché de la vérité, qu'on est étonné qu'ils n'aient pas su faire le dernier pas.

La découverte des images formées sur la rétine est une des plus belles de la physiologie des sens. Mais si nous avons ainsi la clef du mécanisme de la vision, il reste à expliquer un grand nombre de faits relatifs au mode de formation et à la netteté de l'image, et à la manière dont nous rapportons les impressions reçues par la rétine à la cause extérieure qui les engendre. Ce sujet présente de nombreuses difficultés, les expériences étant très-déliées et souvent

impossibles. Divers mathématiciens, Sturm, Vallée, Gauss, Bessel, ... ont traité la question par l'analyse, en partant des courbures des surfaces de séparation des milieux que renferme l'œil, et des indices de ces milieux; mais ces données sont assez incertaines; aussi ces travaux, remarquables au point de vue mathématique, n'ont-ils que peu ajouté à nos connaissances relatives aux conditions physiques de la vision.

II. De la netteté de l'image et des conditions de sa formation.

2740. Des aberrations de courbure de l'œil. — Nous admettons, avec tous les physiologistes, que la perception est nette quand l'image sur la rétine est nette, et réciproquement; et nous considérerons toujours, si ce n'est quand nous avertirons du contraire, des yeux à l'état normal, c'est-à-dire ne présentant aucun de ces défauts que l'on rencontre si souvent parmi les gens d'étude, qui fatiguent outre mesure un organe délicat ayant besoin, plus que tout autre, d'un repos fréquent et prolongé.

Le premier point à remarquer, c'est que l'œil n'a qu'une *aberration de sphéricité* insensible. En effet, les images se forment avec netteté sur la rétine, comme l'atteste la facilité avec laquelle nous distinguons les détails des objets qui ne sont ni trop éloignés ni trop rapprochés. Cette perfection des images tient à trois circonstances : 1^o aux courbures de la cornée et des faces du cristallin, qui appartiennent à des ellipsoïdes (2737); 2^o à la présence de la membrane de l'iris, diaphragme à ouverture variable, qui arrête les rayons trop écartés de l'axe du cristallin; 3^o à la forme concave de la rétine (2532).

Jeu de la pupille. — La pupille se rétrécit quand on observe les objets rapprochés, et s'élargit pour les objets éloignés. Il est facile de s'en assurer en se regardant dans un miroir; on voit la pupille s'agrandir quand on éloigne le miroir, et se rétrécir avec assez de lenteur pour qu'on puisse en suivre les mouvements, quand on le rapproche brusquement.

Les variations de la pupille sont aussi produites par les changements d'intensité de la lumière, comme on peut le vérifier avec une glace, en interceptant par un écran et laissant passer alternativement une vive lumière qui arrive à l'œil. Le diamètre de la pupille peut varier ainsi, suivant Young, de 3^{mm} à 7^{mm} environ. Les variations sont faciles à observer chez les animaux qui, comme les chats, ont la pupille en forme de fente; cette fente, très-étroite au grand jour, se dilate au point de devenir circulaire quand il fait très-sombre.

Comme chacun des points d'un objet lumineux ou éclairé envoie un faisceau divergent dont l'intensité varie en raison inverse du carré de la distance, on pourrait croire que le rétrécissement de la pupille, quand on regarde des objets rapprochés, est occasionné par l'excitation que produit une lumière plus vive, et ce mouvement serait automatique et indépendant de la volonté. Il est incontestable que l'action de la lumière détermine la contraction de la pupille; mais, comme l'admettait Descartes, la volonté intervient aussi, et l'effort que l'on fait

pour voir nettement les objets rapprochés est accompagné du rétrécissement de la pupille. En effet, Magendie a constaté qu'elle se resserre quand on cherche à distinguer un objet très-petit. Si, comme l'a fait Dugès, on cache un des yeux avec la main, et qu'on le découvre ensuite subitement, on voit, dans un miroir, la pupille de l'autre œil se rétrécir, quoiqu'il reste soumis à l'action de la même lumière, à cause de l'habitude qu'il a contractée d'avoir ses mouvements concordants avec ceux de l'autre œil.

27-11. Champ de la vision. — On appelle ainsi, soit l'espace angulaire dans lequel sont compris les objets qui peuvent envoyer des rayons dans l'œil, soit l'espace dans lequel les objets doivent être renfermés pour donner une image nette sur la rétine. Ce dernier espace, très-étroit, est le *champ de la vision nette*. Le champ, dans la première acception, est, d'après Brewster, de 120° dans le sens vertical, et de 150° , dans le sens horizontal. Cette grande étendue provient de la courbure de la cornée transparente, qui forme le sommet du grand axe d'un ellipsoïde, ce qui est favorable à l'entrée des rayons très-obliques. Chaussat a constaté cette forme sur l'œil du bœuf¹. Il plaçait cet œil dans une caisse rectangulaire pleine d'eau, et projetait sur un écran, au moyen du mégascope, l'image grossie huit à dix fois, de la cornée vue de profil. Il traçait le contour, puis menant sur le dessin, des ordonnées et des abscisses, il cherchait si elles satisfaisaient à l'équation d'une ellipse, dont les axes étaient déduits de deux couples de ces coordonnées. Il a reconnu aussi que l'axe de l'ellipsoïde fait, dans le plan horizontal et du côté interne, un angle de 9 à 10° avec la perpendiculaire au plan de la pupille. Cet angle, que M. Sæmmering fils a aussi trouvé dans l'œil du cheval, existe-t-il chez l'homme? Cela est peu probable; les animaux dont il est question ici, ayant les yeux placés sur les côtés de la tête, cette déviation des axes vers le nez a, chez eux, une utilité qui n'existe pas chez l'homme, dont les yeux sont placés en avant. Chaussat a trouvé à la cornée de l'éléphant, une courbure d'hyperboloïde. Il est facile de reconnaître que celle de l'homme, qui est ellipsoïdale, n'est pas sphérique, en se regardant dans une glace et observant l'image d'une fenêtre, sur la cornée; en se tournant peu à peu, de manière que cette image change de place, on la voit grandir sensiblement en approchant du bord de la prune. Nous verrons aussi que cette surface n'est pas de révolution (2751).

Les surfaces du *crystallin* ont aussi des formes d'ellipsoïdes à peu près de révolution, mais autour du petit axe.

Outre la forme de la cornée, il est une autre circonstance qui concourt à diminuer l'aberration de sphéricité pour les rayons obliques. Vallée a reconnu que les axes secondaires des différents points d'un objet ne se croisent pas en un seul centre optique, mais se coupent deux à deux, en formant une petite surface derrière le cristallin, occupant un espace assez petit pour être considéré comme un point, quand on construit l'image formée au fond de l'œil.

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

Champ de la vision nette. — Le champ de la vision nette est extrêmement restreint; car, si l'on regarde la première lettre d'un mot, choisi dans cette page, par exemple, on ne distingue pas les dernières lettres du mot, et l'on ne peut distinguer la fin, qu'en déplaçant l'œil. Quand la page est à 30^{cm}, on ne peut distinguer que les lettres qui ne s'éloignent pas de plus de 10 à 15^{mm} de celle qu'on regarde directement. D'après Young, le diamètre du champ de la vision nette n'est pas de plus de 2° à 4°. Nous verrons que la surface qui lui correspond sur la rétine présente, autour de l'axe de l'œil, une tache jaune (*macula lutea*) de 3^{mm} environ de diamètre (2752). Si nous voyons *nettement* toutes les parties d'un corps, c'est que, comme l'avait remarqué Ptolémée, l'axe de l'œil se déplace avec une grande vivacité, pour se diriger vers les différents points du corps, de manière à avoir la perception presque simultanée de toutes ses parties.

27-12. Vision nette et vision distincte. — On a souvent établi une différence entre la vision *nette* et la vision *distincte*, entre la vision de détails et la vision d'ensemble. La vision est *nette* quand on distingue les petits détails des objets; mais la limite est difficile à préciser, et il y a de grandes différences d'un individu à un autre. Dans tous les cas, la vision nette a toujours une limite, puisque l'œil aidé du microscope, peut distinguer des détails de plus en plus déliés, à mesure que l'instrument grossit davantage. Cette limite provient, soit de ce que l'impression produite en un point de la rétine s'étend un peu tout autour de ce point, par une sorte de communication que nous étudierons plus loin, soit parce que l'aberration de sphéricité n'est pas complètement nulle. Quelle qu'en soit la cause, il existe sur la rétine, autour de l'image focale *d'un point*, un petit cercle impressionné qu'on appelle *cercle de diffusion*, et que Jurin nommait *cercle de dissipation*. Si les détails de l'objet forment des images plus resserrées que l'étendue des cercles de diffusion, ces images se superposent et se troublent mutuellement. La netteté dépend donc de l'espace occupé, sur la rétine, par les images des divers détails de l'objet, et par conséquent du diamètre apparent de ces images. Par exemple, on distinguera les détails d'un monument, sur une photographie de grandes dimensions, tandis qu'on ne pourra les voir sur une photographie beaucoup plus petite, quoiqu'ils y soient représentés, comme on peut s'en assurer au moyen d'une loupe. La vision peut être considérée comme nette, quand on ne distingue pas de diffusion sur la ligne de séparation de deux surfaces de teinte différente, ou sur les bords de traits fins et déliés.

La limite de détails à laquelle s'arrête la vision, est aussi déterminée par les dimensions des extrémités des fibrilles de la rétine (*cônes*, *bâtonnets*). Ces extrémités ont une certaine dimension; leur diamètre, d'après M. Kœlliker, varie de 0^{mm}, 0005 à 0^{mm}, 0045. Toute image ayant un diamètre moindre produira donc la même sensation qu'un point unique, et ne pourra être distinguée.

27-13. Chromatisme de l'œil. — L'œil est achromatique lors de la vision nette; car les objets vus directement ne sont pas irisés sur leur contour. On a admis pendant longtemps, en partant de l'idée préconçue que l'œil devait être un organe parfait, que cet achromatisme était vrai d'une manière absolue, et

l'on a cherché à l'expliquer par la réunion de plusieurs masses lenticulaires formées par les différentes humeurs de l'œil et par les couches superposées du cristallin. Mais les expériences de MM. Wollaston, Young, Muller, Plateau, Matthiessen..., ont montré que les rayons de différentes couleurs font leur foyer à des distances différentes du cristallin, et si les images des objets *vus nettement* ne sont pas irisés sur leurs bords, c'est que les rayons, peu divergents, qui passent par la pupille, n'étant que très-peu déviés, et la distance focale étant très-petite, la dispersion est insensible.

Voici quelques-unes des expériences par lesquelles on prouve le *chromatisme* de l'œil : 1^o Si, comme l'a fait Wollaston, on regarde une étoile à travers un prisme, on voit un spectre très-étroit; et si l'on fait en sorte de voir nettement l'extrémité rouge, la partie violette paraît élargie en éventail; les rayons violets ne font donc pas alors leur foyer sur la rétine. Si, au contraire, l'extrémité violette paraît nette, la partie rouge est, à son tour, étalée, et l'on ne peut voir le spectre nettement dans toute son étendue à la fois. 2^o M. Plateau et M. Dove regardent une bougie à travers une lame de verre bleu-cobalt, qui laisse passer les rayons rouges, indigos et violets. A la distance de la vision nette, la flamme paraît uniformément violette; mais si, sans modifier l'état de l'œil, on rapproche la flamme, le contour paraît rouge, et si on l'éloigne, le contour est violet et le milieu rouge. 3^o Ce n'est qu'à partir d'une certaine distance de l'œil que les objets sont vus sans trouble. Or, M. Matthiessen a constaté que la distance minimum à laquelle doit être placée une division tracée sur une lame de verre pour être vue nettement, est plus grande quand elle est éclairée par derrière au moyen de lumière rouge, que lorsqu'elle est éclairée au moyen de lumière indigo. Les distances peuvent être doubles l'une de l'autre quand on a la vue longue; les différences, moins prononcées pour les vues normales, sont à peine sensibles pour les myopes¹.

Le chromatisme de l'œil explique pourquoi on éprouve une grande fatigue, une sorte d'éblouissement, quand on veut lire des lettres rouges sur un fond vert *clair de même éclat*; c'est que l'œil fait effort pour voir nettement deux objets colorés qui ne peuvent former simultanément leur image sur la rétine. Si ce phénomène ne se produit pas toujours avec deux couleurs quelconques, c'est que, le plus souvent, l'une d'elles est plus éclatante que l'autre et attire particulièrement l'attention. — Wheatstone a fait beaucoup d'observations sur des dessins *verts et rouges* couvrant une grande surface; ces dessins semblent s'agiter quand on les regarde fixement, à cause des changements d'état continuels de l'œil cherchant à voir nettement les deux couleurs. D'autres nuances produisent le même effet, mais d'une manière moins prononcée. Cette expérience est connue sous le nom de *cœurs agités* de Wheatstone, les premières observations ayant été faites par hasard sur un tapis sur lequel étaient dessinés des cœurs.

Il résulte des expériences de Jurin, Scheiner, Trouessart et de Millet, que

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. XXIV, p. 875.

l'œil n'est plus achromatique pour les images confuses formées sur la rétine, quand on regarde au-delà ou en-deçà de l'objet qui les produit. Quand on regarde d'un seul œil un champ blanc sur un fond noir, en fixant son regard au-delà de ce champ, on le voit bordé de couleurs, principalement de jaune et de bleu, le bleu en dedans. Le bleu est en dehors, si l'on cherche à voir nettement des objets plus rapprochés que le champ.

III. Ajustement de l'œil. — Besicles.

27-11. Portée de la vue. — Les bonnes vues voient nettement, depuis 15 à 20^m jusqu'à une distance indéfinie. L'œil représente donc une chambre noire à foyer variable; seulement il faut, pour qu'on puisse distinguer toujours avec une égale netteté les détails des objets, que leur diamètre apparent reste le même. C'est ainsi qu'on peut lire les grosses lettres d'une affiche, d'une grande distance, et les caractères moins gros, d'une distance moindre. Si l'on s'approche très-près, on distingue des inégalités sur le contour des lettres, et même le grain du papier.

Distance de la vision distincte. — Quand la distance est trop petite, on cesse de voir nettement. La distance la plus petite pour laquelle la vision est nette, est la plus favorable, le diamètre apparent étant le plus grand possible; c'est celle à laquelle on place la page qu'on veut lire. On la nomme *distance de la vision distincte*, parce que certains yeux défectueux ne voient nettement qu'à cette distance (2748).

La position des images de la chambre noire variant avec la distance des objets, on doit se demander comment il se fait que les images faites sur la rétine restent nettes quand on déplace ces objets. Remarquons que la question n'est à poser que pour les petites distances; car nous savons que, pour les grandes, des déplacements, même considérables, des objets ne font varier la position de l'image formée par une lentille que de quantités insensibles (2526).

27-15. L'œil s'accommode aux distances. — Deux opinions principales ont partagé les physiciens et les physiologistes; dans l'une, on admet que l'œil se modifie, change quelques-unes de ses conditions optiques, en un mot, *se met au point*, pour voir nettement les objets placés à des distances différentes. Dans l'autre, on suppose que l'œil ne se modifie pas, et que l'image n'éprouve que des déplacements insensibles à cause des petites dimensions de l'œil, ou par suite de la marche particulière des rayons dans les humeurs que contient cet organe.

La première opinion est seule conforme à l'expérience. En effet, si l'on regarde, même avec un seul œil, un objet rapproché, les objets plus éloignés, placés dans la même direction, sont vus confusément. Réciproquement, si l'on regarde spécialement ces derniers, ceux qui sont plus rapprochés paraissent confus à leur tour. Quand on regarde l'image réelle formée au foyer d'un miroir concave, en se plaçant au-delà de cette image, on éprouve une sorte d'éblouissement, qui

provient de ce que l'attention étant attirée par le cadre du miroir, on cherche instinctivement à mettre l'œil dans l'état qui convient à la distance de ce cadre, en même temps que dans celui qui convient à celle de l'image. Les expériences de Wollaston sur le chromatisme de l'œil (2743) prouvent aussi que l'organe s'ajuste différemment pour les différentes couleurs. Remarquons encore que l'œil se fatigue, quand on regarde longtemps à la même distance; par exemple, quand on lit. Si l'on regarde ensuite subitement des objets éloignés, au premier moment ils paraissent troubles, l'œil éprouvant une certaine difficulté à changer un état dans lequel il est resté pendant longtemps; de même qu'on éprouve une certaine peine à changer d'attitude quand on a conservé longtemps la même position.

L'ajustement de l'œil d'après la distance, est soumis à la volonté; car si on laisse errer ses regards, sans intention de les fixer sur les objets environnants, l'œil prend un état de repos, dans lequel tous ces objets paraissent troubles; mais aussitôt que l'on veut, l'œil fait un effort dont on a conscience, et les objets que l'on regarde sont vus avec netteté.

Si l'on place alors devant l'œil une lentille à très-long foyer, on voit trouble; mais, par un nouvel effort volontaire, on arrive encore à distinguer nettement.

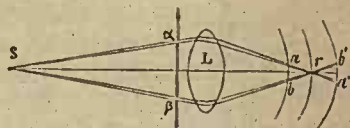


Fig. 1906.

L'expérience suivante, due à Schneider, montre que les images de points différemment éloignés ne se font pas à la même distance du cristallin. On regarde un très-petit objet, *s*, à travers deux trous d'épingle *α*, *β* pratiqués dans une carte (fig. 1906), et séparés par un espace moindre que le diamètre de la pupille; l'objet paraît double, si ce n'est pour une certaine distance. Ce résultat provient de ce que l'image focale allant se former au-delà ou en-deçà de la rétine, les pinceaux qui passent par les trous et se croisent au foyer, rencontrent cette membrane en deux points différents. Par exemple, *L* étant le cristallin, si la rétine est en *r*, l'image du point *s* sera unique; si elle est en *ab*, ou en *a'b'*, il y aura deux images *a*, *b*, ou *a'*, *b'*, formées par les pinceaux *sαa'*, *sβb'*. Si la rétine est en *ab*, et qu'on bouche le trou *α*, l'image qui est du même côté disparaîtra; ce sera le contraire si la rétine est en *a'b'*. — Si l'œil ne se modifie pas de manière à faire coïncider les deux images *a*, *b*, ou *a'*, *b'*, c'est que les deux pinceaux très-fins, forment des images qui seraient suffisamment nettes, même sans l'intervention de la réfraction dans les humeurs de l'œil, comme cela a lieu dans la chambre noire simple. L'œil n'éprouve donc pas le besoin de s'adapter à la distance, et prend l'état qui lui est le plus habituel.

Les expériences précédentes sont si faciles à répéter et prouvent d'une manière si évidente que l'œil doit s'accommoder aux distances, qu'on ne peut s'expliquer comment l'opinion contraire a pu être soutenue, qu'en remarquant que les bonnes vues étant rares parmi les hommes d'étude, plus d'un observateur a dû se trouver

dans de mauvaises conditions pour expérimenter sur ses propres yeux. — Les systèmes par lesquels on a cherché à expliquer la vision nette à distances différentes sans modification de l'œil, ne peuvent donc être acceptés. Parmi ces systèmes, nous citerons, à cause de son originalité, celui de Lehot, qui supposait que le corps vitré était sensible et qu'il percevait l'image à *trois dimensions* formée dans sa masse. Mais alors l'œil n'aurait pas besoin de s'ajuster, et l'on ne concevrait pas l'illusion des *dioramas*, et, en général, des peintures qui produisent l'effet du relief.

2716. Mode d'ajustement de l'œil. — On a fait un grand nombre d'hypothèses sur les modifications qu'éprouve l'œil, quand il s'adapte aux distances.

1^o Kepler, Bochrave, Rohaut, Olbers..., pensaient que le globe de l'œil s'allongait pour voir les objets rapprochés; ce qui serait impossible sans des changements de courbure de la cornée, changements qui n'existent pas, comme nous allons le voir.

2^o Kepler et divers physiologistes admettaient que le cristallin pouvait se rapprocher ou s'éloigner de la rétine, ce qui ne pourrait s'effectuer sans refoulement des humeurs de l'œil, et, par suite, modification de la cornée.

3^o Jurin, Mile, Musschenbroek..., admettaient ces changements de courbure de la cornée, combinés avec les variations de la pupille. Mais on a prouvé que de semblables changements de courbure n'existent pas. Young mesurait, avec un micromètre adapté à une lunette, la distance entre les images de deux bougies réfléchies par la surface de la cornée d'un individu regardant successivement des objets rapprochés et éloignés, placés dans la même direction; cette distance restait constante. En outre, Young voyait nettement des objets situés à des distances différentes, à travers un tube rempli d'eau, dont l'indice de réfraction diffère à peine de celui de l'humeur aqueuse, et dans laquelle la cornée était plongée, ce qui annulait l'influence de sa courbure.

4^o Une hypothèse longtemps en faveur est celle qui attribuait l'ajustement de l'œil aux variations de la pupille, combinées avec la structure du cristallin, hypothèse adoptée et développée par Lahire, Leroy, Haller, Sabbatier, Tréviranus..., et en dernier lieu par Pouillet. Tréviranus l'avait soutenue par des considérations mathématiques. Pouillet, après avoir remarqué que les couches du cristallin diffèrent en densité, et en courbure et épaisseur, considère cet organe comme une lentille ayant un grand nombre de foyers différents, les plus éloignés formés par les rayons passant près du contour. Lorsqu'on regarde un point rapproché, la pupille se contracte, et les rayons passant par les parties les plus réfringentes du cristallin, font leur foyer sur la rétine: Quand, au contraire, on regarde un point éloigné, le foyer tend à se faire en avant de la rétine; mais alors la pupille se dilate, et les rayons qui traversent le cristallin près de son contour, où la réfringence est moindre, vont faire leur foyer plus loin et sur la rétine; les rayons qui passent près de l'axe, moins nombreux que ceux qui passent près du contour, ne faisant que jeter sur l'image une lueur diffuse qui n'en altère pas la netteté.

Dugès a objecté qu'on voit nettement, avec la pupille étroite, les objets éloignés quand ils sont éclatants ; et avec la pupille large, les objets rapprochés quand ils sont très-sombres. Car si l'on regarde au loin un objet brillant, et si l'on reporte brusquement ses regards sur un objet sombre rapproché, on peut voir, au moyen d'une glace, la pupille s'agrandir. On devrait aussi être myope au grand jour et presbyte le soir, puisqu'une vive lumière détermine le rétrécissement de la pupille, et chacun sait combien il est facile de voir à de grandes distances, pendant les journées les plus éclatantes de l'été.

5° Les systèmes qui précèdent étant exclus, il ne reste plus que celui dans lequel on considère le cristallin comme une lentille vivante pouvant changer de foyer suivant la distance des objets.

2747. Rôle du cristallin dans l'adaptation. — Descartes, Sauvage, Bourdelot, ont, les premiers, cherché dans des modifications du cristallin l'explication de l'adaptation de l'œil aux distances. Home, Pemberton, Albinus, Hunter, ont adopté la même opinion, qui a été reprise et développée par Young¹, puis confirmée par les recherches d'Arago, de Dugès, etc.

On a commencé par montrer que le cristallin n'est pas un simple produit de sécrétion, mais qu'il est organisé et vivant. Dugès l'ayant déchiré sur un lapin vivant, en ménageant autant que possible la capsule cristalline, le vit se cicatriser en quelques semaines. Zinn a vu une injection pénétrer par deux ramuscules dans le cristallin d'un veau ; il y a donc des vaisseaux comme dans toutes les parties vivantes. De plus, il a signalé l'existence d'une petite artère transparente, venant du fond de l'œil, et aboutissant au centre de la face postérieure du cristallin, après avoir traversé le corps vitré.

La structure du cristallin peut se prêter à des changements de forme ou de densité. Hunter, Young ont montré que cet organe est formé de fibres transparentes entrelacées. Longtemps auparavant, Leuwenhoek suivait et dessinait ces fibres dans l'œil d'un poisson. Pour bien voir la structure du cristallin, on le fait macérer dans de l'acide nitrique ; il devient blanc à l'extérieur et d'un jaune clair à l'intérieur, et les fibres sont alors très-distinctes, peuvent se séparer facilement, et ressemblent à de la soie écru.

L'arrangement, assez compliqué, de ces fibres est très-régulier. Dugès a reconnu qu'elles forment plusieurs couches superposées². La couche extérieure présente seize sutures rayonnantes, visibles à la loupe après un commencement de coagulation par l'alcool, et formées par la réunion de fibrilles se rencontrant très-obliquement, comme on le voit en B (*fig.* 1905). Ces sutures ne se correspondent pas sur les deux faces de la lentille ; elles alternent, et chaque fibrille passe d'une face à l'autre, en se ployant sur le bord et se contournant un peu en forme d'S. De plus, celles qui commencent près du centre sur une des faces, se terminent près du contour, sur l'autre face, et réciproquement. Les

¹ *Trans. phil.* (1801), 1^{re} part., et *Bibl. univ. de Genève* (Sc. et arts), t. XVIII, p. 225.

² *Traité de physiologie comparée*, t. I, p. 261.

couches intérieures sont organisées de la même manière; seulement les sutures paraissent diminuer de nombre; près du centre on n'en compte plus que trois. Chez le bœuf et le mouton le cristallin n'a que trois sutures sur chaque face; chez le lapin il n'en présente qu'une.

La structure fibreuse du cristallin a conduit à le regarder comme un muscle. Les fibrilles qui le composent ressemblent beaucoup à celles de l'iris; comme ces dernières, elles sont linéaires ou moniliformes. Berzélius n'a trouvé que des différences douteuses de composition avec les fibres musculaires. Coagulées par l'alcool ou par la chaleur, elles ressemblent étonnamment à la chair des poissons. Enfin, le cristallin est imbibé d'un liquide qui, chauffé, se prend en une masse grenue comme le caillot du sang, dont elle ne se distingue que par l'absence de couleur. Ce liquide semble donc être du sang incolore, approprié à la formation d'un tissu fibreux incolore.

On voit, par ce qui précède, qu'on est en droit de regarder le cristallin comme une lentille à *foyer variable* pouvant éprouver des contractions qui en changent la forme et la densité, et s'accomplissent sous l'influence de la volonté, par l'effort que l'on fait pour distinguer nettement. Voici quelques faits qui viennent confirmer cette théorie : 1° Les individus affectés de la *cataracte*, c'est-à-dire dont le cristallin est devenu opaque, et auxquels on rend la vue en enlevant ce corps, ne peuvent voir nettement à différentes distances, quoi qu'on ait dit le contraire. La lentille convergente placée devant l'œil pour suppléer à l'absence du cristallin, ne donne la vision nette qu'à une distance déterminée, qui dépend du foyer de cette lentille. 2° L'habitude de regarder de très-près finit par rendre *myope*, comme cela arrive aux hommes d'étude, aux horlogers, aux graveurs; le cristallin acquiert alors une convexité trop grande et permanente, ce qui montre qu'il devient plus convexe quand on regarde des objets très-rapprochés.

Les seules objections que l'on ait faites à la théorie que nous venons d'exposer, consistent en faits négatifs. Ainsi, on a invoqué l'inutilité des essais faits pour exciter des contractions du cristallin, au moyen de l'électricité; mais il peut arriver que l'irritabilité de ces sortes de fibres cesse presque immédiatement après la mort; les contractions lentes de l'iris (2737) nous avertissent, d'ailleurs, que nous ne devons pas nous attendre à trouver dans les fibres transparentes des organes de l'œil, les mêmes propriétés que dans les fibres des muscles proprement dits. Cependant, pour lever tous les doutes, il restait à montrer directement les modifications du cristallin.

Observation des changements du cristallin. — Ribes avait remarqué que, lorsqu'on regarde un objet très-rapproché, l'iris est poussé en avant; mais ce mouvement pouvait être attribué au déplacement du cristallin, aussi bien qu'à un accroissement de convexité. Dernièrement, deux physiologistes, M. Cramer, en Hollande, et M. Helmholtz, en Allemagne, ont, chacun de leur côté, montré les changements de courbure du cristallin¹. Voici comment se fait l'expérience.

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc. phys.), t. I (1858), p. 71.

On approche une bougie S (*fig. 1907*) de l'œil d'une personne placée dans une chambre obscure, et l'on regarde dans cet œil, au moyen d'un microscope peu grossissant OR, muni d'un micromètre focal. On voit trois images, qui avaient été signalées par Sanson et Purkinge, et qui sont représentées à part en A. L'image antérieure, 1, la plus brillante, est droite, virtuelle et formée par réflexion sur la cornée; l'image moyenne, 2, la moins distincte, est droite aussi et formée par réflexion à la surface antérieure du cristallin, et l'image postérieure, 3, très-petite et renversée, est réelle et produite par la surface postérieure du cristallin agissant comme miroir concave. Si la personne en expérience regarde d'abord un point éloigné, puis, subitement, un point rapproché placé exactement dans la même direction, on voit l'image 2 se rapprocher de 1, qui ne change pas de position, ce qui montre que la surface antérieure du cristallin est devenue plus convexe, et que la cornée n'a pas changé de courbure. En même temps, l'image 3 est devenue plus vive et plus petite, d'où l'on conclut que la face postérieure du cristallin a pris aussi une courbure plus prononcée.

Ces expériences remarquables lèvent tous les doutes, et l'on peut aujourd'hui regarder comme bien démontré : 1^o que l'œil s'ajuste d'après les distances; 2^o que la principale modification qu'il éprouve alors consiste dans les changements de forme du cristallin, qui constitue une lentille à foyer variable.

2748. Défauts de la vue. —

Nous avons dit que l'on peut distinguer nettement depuis 16 à 20^{cm}, jusqu'à une distance indéfinie. Mais cela n'a lieu que pour les vues bonnes et flexibles. Il n'en est pas de même des yeux affectés de *myopie* ou de *presbytie*, défauts fréquents de la vue.

Presbytie. — Chez les *presbytes*, l'image tend à se faire derrière la rétine, et le minimum de distance de la vision nette est beaucoup augmenté; on dit qu'ils ont la *vue longue*. Le plus souvent, ils peuvent voir nettement à toute distance plus grande que cette limite, quand il n'y a pas d'autre vice congénère, comme l'affaiblissement de sensibilité de la rétine, le défaut de transparence de la cornée ou des humeurs de l'œil. Le presbytisme se rencontre surtout chez les vieillards; il est dû à la diminution d'épaisseur du cristallin, qui perd de sa substance sous l'influence de l'âge, comme cela a lieu pour tous les muscles, au défaut de flexibilité de cet organe, qui ne peut plus s'adapter aux petites distances, pour lesquelles l'œil doit se modifier beaucoup plus que pour les distances moyennes. Il peut se faire enfin que l'aplatissement du fond de l'œil rapproche la rétine du cristallin.

Myopie. — La *myopie* présente de nombreuses variétés. Tantôt la vision

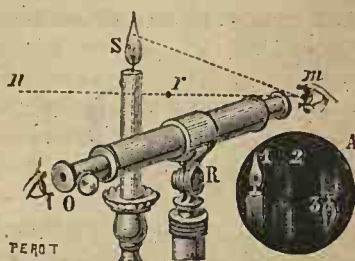


Fig. 1907.

nette n'a lieu qu'à une seule distance, qui est très-petite, ce qui indique un manque complet de flexibilité de l'œil; tantôt elle peut avoir lieu entre certaines limites plus ou moins resserrées, de manière qu'elle est confuse à de grandes distances. Chez les myopes, l'image tend à se former en avant de la rétine. Ce défaut peut provenir de la conformation vicieuse de l'œil, et il est alors souvent héréditaire; le cristallin peut être trop convexe, l'œil trop gros, ce qui fait que la rétine est trop éloignée du cristallin; la cornée peut être trop convexe, quelquefois, elle est presque conique, et alors, le plus souvent, on ne voit nettement qu'à une seule distance. La myopie peut aussi s'acquérir par l'habitude de regarder de très-près de petits objets, par l'usage fréquent de la loupe ou du microscope, par l'abus de la lecture. Ware a trouvé 32 myopes parmi 127 étudiants; tandis qu'il n'en a trouvé que 3 parmi 1,300 enfants. Dans les observations faites par Holke sur 14,065 personnes, les hommes ont fourni, entre 16 et 60 ans, 39 pour 100 de myopes, et les femmes 18 pour 100; de 60 à 90 ans, il ne s'est plus trouvé que 13 pour 100 d'hommes myopes et 9 pour 100 de femmes. Les savants ont donné la proportion énorme de 73,52 myopes

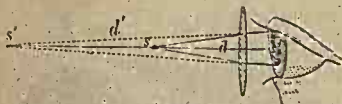


Fig. 1908.

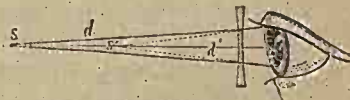


Fig. 1909.

de 16 à 60 ans; et 29,21 de 60 à 90, tandis que les artisans n'en ont présenté, à tout âge, que de 8 à 10 pour 100. La myopie est très-rare dans les campagnes. Tous les voyageurs sont d'accord pour attester qu'ils n'en ont pas trouvé de cas chez les sauvages, les peuples nomades, comme les Tartares, les Arabes, etc. On a vu cette affection disparaître peu à peu pendant des voyages dans des pays à vastes horizons, où l'œil devait continuellement regarder au loin.

2749. Besicles. — Pour suppléer aux imperfections de la vue, on se sert de paires de lentilles à très-longs foyers, nommées *besicles* ou *lunettes*.

Les *presbytes* ne peuvent voir qu'à des distances trop grandes pour lire commodément; de plus, à ces distances, le diamètre angulaire des lettres est trop petit pour qu'on puisse les distinguer facilement, et la lumière reçue dans l'œil est plus faible. On corrige ces inconvénients en plaçant devant leurs yeux des lentilles convergentes à très-long foyer, qui donnent aux rayons partant d'objets rapprochés, le même degré de *divergence* que s'ils partaient d'une plus grande distance. On peut calculer la longueur focale f que doit avoir la lentille pour qu'on puisse lire à une distance d , plus petite que f , quand on connaît la distance de la vision nette d' . Soit s (fig. 1908) le point lumineux, et négligeons la distance de la lentille à l'œil. Cette lentille devra être telle que les rayons partant de s aient le même degré de *divergence* que s'ils partaient de s' situé à la distance d' de la vision distincte. Le point s' est donc le foyer conjugué *virtuel* du point s , et l'on a, d'après la formule des lentilles,

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}, \quad \text{d'où } f = \frac{dd'}{d' - d}.$$

Les myopes se servent de verres divergents. Soit s le point lumineux (fig. 1909), et s' la position très-rapprochée qu'il devrait avoir pour que la vision fût nette. La lentille divergente devra être telle que les rayons partant du point s divergent en émergeant, comme s'ils venaient de s' ; s et s' sont donc des foyers conjugués,

et l'on aura, pour déterminer le foyer de la lentille, $\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$, d'où $f = dd' : (d - d')$. Tantôt le myope armé de ses besicles, voit comme s'il avait bonne vue, l'œil ayant conservé sa flexibilité; tantôt il y a un maximum de distance au-delà duquel la vision est confuse; seulement le maximum et le minimum de distance sont augmentés, et diffèrent davantage l'un de l'autre; tantôt, enfin, la vision continue à n'avoir lieu qu'à une distance déterminée, mais qui est plus grande que sans verres.

Les opticiens indiquent la force des verres qui correspondent aux différentes vues, par des numéros qui expriment, en pouces, la longueur focale de la lentille; de sorte que, plus la vue est défectueuse, plus est faible le numéro du verre qui doit la corriger. Pour les myopes, on va généralement du n° 60 au n° 2; et pour les presbytes, de 80 à 2. Ce dernier numéro est une véritable loupe.

Verres périscopiques. — On ne voit bien, avec des besicles, que dans les directions peu éloignées de l'axe des lentilles; quand on regarde obliquement, il y a beaucoup d'aberration de sphéricité, et l'image focale virtuelle est trouble. Wollaston a obvié à cet inconvénient au moyen de verres qu'il nomme *périscopiques*. Ce sont des ménisques convergents ou divergents, dont la face concave est tournée du côté de l'œil, de manière que les pincesaux de rayons obliques à l'axe principal tombent à peu près normalement à la surface convexe.

Œil artificiel. — On trouve dans les cabinets de physique un petit appareil destiné à vérifier les effets des lentilles sur la distance de la vision nette. Il consiste en une chambre noire globulaire *el* (fig. 1910), dont le fond *e*, en verre dépoli, peut se rapprocher plus ou moins de la lentille *l*. Après avoir placé le fond de manière que l'image d'un objet s'y fasse nettement, on amène devant la lentille le verre convergent *c*, et l'on reconnaît qu'il faut rapprocher l'objet pour qu'il continue à donner une image nette, et l'éloigner quand on remplace le verre convergent par un verre divergent *d*.

2750. Historique. — On ne sait pas au juste quel est l'inventeur des besicles, sans lesquelles une foule de personnes seraient en partie privées de l'usage de leurs yeux. On a dit que Roger Bacon les connaissait; mais il recommande seulement d'appliquer un segment sphérique sur la page qu'on veut lire. Tout ce qu'on peut dire, c'est que cette précieuse invention remonte à la fin du



Fig. 1910.

treizième siècle. Le médecin italien Rédi cite un manuscrit de 1299, dont l'auteur dit ne pouvoir plus lire « sans ces verres, qu'on a inventés depuis peu, au grand avantage des pauvres vieillards. » Le dictionnaire *Della Crusca* cite, au mot *occhiali* (besicles), un sermon prononcé en 1305, dans lequel il est dit que cette invention ne date que de vingt ans à peine. Quant au nom de l'inventeur, on ne le connaît pas. Manni cite bien une inscription d'un tombeau de la cathédrale de Florence, indiquant qu'il renfermait les restes d'un banquier, Salvino degl' Armati, inventeur des besicles, mort en 1307¹; mais peut-on se fier à une épitaphe, qui n'existe même plus? Ce qui paraît certain, c'est que la découverte, qui avait d'abord été tenue secrète, a été divulguée par le P. A. di Spina.

Il est à remarquer que, dans tous les écrits où l'on parle des besicles, il n'est question que des presbytes. Il paraîtrait donc qu'on ne serait venu que plus tard au secours des myopes, au moyen de verres divergents. Pline parle bien d'émeraudes *concaves*, à travers lesquelles Néron regardait les combats des gladiateurs; mais, comme on attribuait les propriétés de ces émeraudes à leur substance et non à leur forme, ainsi que l'atteste la défense de graver les émeraudes concaves



Fig. 1911.

on ne peut regarder les anciens comme ayant connu l'usage des lentilles pour aider la vue, d'autant plus qu'ils croyaient que ces émeraudes convenaient indifféremment à tous les yeux.

2751. Optomètres. — P. Arfield,

Young, Mile, Lehot, ont imaginé des

instruments nommés *optomètres* ou *opsiomètres*, destinés à mesurer les limites de la vision distincte des différents yeux. La fig. 1911 représente l'optomètre le plus simple. AB est une règle horizontale de 1 mètre de longueur, sur laquelle est tracée une raie fine longitudinale, noire sur fond blanc, ou blanche sur fond noir. En AD, est un écran percé de deux fentes étroites verticales, dont la distance est moindre que le diamètre de la pupille. On regarde la raie à travers ces fentes, en appliquant un œil tout près de l'écran. Les rayons envoyés par les points de la raie les plus rapprochés de l'écran, allant faire leur foyer derrière la rétine, les pinceaux qui passent par les fentes rencontrent cette membrane en des points différents, et la raie paraît double. La séparation des deux images va en diminuant à mesure qu'on regarde plus loin de l'écran, pour se confondre à une distance *oa*, qui est la limite inférieure de la vision nette. Pour certaines vues, la raie se dédouble de nouveau à partir d'un point *e* (*punctum remotum*), qui indique la limite maximum de la vision distincte, et l'espace *ac* donne le champ de la vision. Il y a certains myopes pour lesquels cette distance se réduit à un point; ce sont ceux dont l'œil n'a aucune flexibilité. Pour les bonnes vues, et pour la plupart des presbytes, la raie ne se sépare pas une seconde fois, e reste simple à toute distance, à partir du point *a* (*punctum proximum*). — Au

¹ Qui Giace Salvino d'Armato degl' Armati, di Firenze, inventor delli occhiali, etc., MCCCVII.

lieu de deux fentes, on peut n'en employer qu'une seule moins large que le diamètre de la pupille; alors la raie paraît trouble et épanouie en-deçà du point *a* et au-delà du point *c*.

Optomètre d'Young. — AB (fig. 1912) est un tube composé de deux parties pouvant s'enfoncer l'une dans l'autre. En A est un disque, *a*, percé de deux fentes auxquelles on applique l'œil, et en B, un disque, *b*, présentant une fente unique fermée par un verre dépoli, et tourné vers la lumière. Tant que la fente *b* paraît simple pendant qu'on enfonce plus ou moins les deux tubes l'un dans l'autre, la distance AB est comprise dans le champ de la vision distincte; et dès que l'image commence à paraître double, cette distance a atteint une des limites. — Young avait calculé des tables au moyen desquelles chacun pouvait, en partant des résultats donnés par l'optomètre, trouver immédiatement le verre convenable à sa vue.

Si l'on éclaire la raie ou la fente de l'optomètre d'Young, par de la lumière colorée, on trouve que la limite inférieure n'est pas la même pour toutes les couleurs; nouvelle preuve du *chromatisme* de l'œil (2743).

Astigmatisme. — Quand les deux fentes, *a*, sont placées horizontalement, on trouve que la séparation des images n'a pas généralement lieu pour la même distance AB que lorsqu'elles sont verticales; d'où l'on conclut que les surfaces de l'œil ne sont pas des surfaces de révolution. C'est, du reste, ce que M. Plateau a prouvé directement au moyen des expériences suivantes: on regarde, à une distance d'une vingtaine de pas, une croix noire dont un des bras est vertical, et l'on remarque que ce bras paraît trouble pendant que l'autre est vu nettement, ou réciproquement, suivant les individus. Si l'on incline la tête de manière que la ligne des yeux soit verticale, c'est le bras qui paraissait net qui est vu trouble, et réciproquement. Quand l'inclinaison est de 45°, les deux bras paraissent également nets: Si l'on remplace la croix par un anneau, cet anneau paraît plus épais aux extrémités du diamètre horizontal ou du diamètre vertical. Si l'on s'éloigne peu à peu de hautes rectangulaires verticales et horizontales, les premières disparaissent avant les autres, ou réciproquement. — Ce défaut de la vue, que M. Whewell a désigné sous le nom d'*astigmatisme*, provient de l'inégalité de courbure des divers méridiens de la cornée; le méridien vertical présente tantôt le plus grand rayon, tantôt le plus petit. Le cristallin peut présenter les mêmes particularités, de manière à compenser l'effet de la cornée, ou à l'amplifier. D'après M. Javal, qui a étudié les moyens de corriger les effets de l'astigmatisme au moyen de verres cylindriques, peu de personnes seraient exemptes de ce défaut, qui est surtout prononcé chez les myopes ¹.

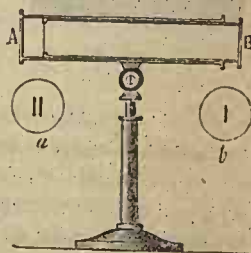


Fig. 1912.

¹ Journal de physiologie de M. d'Almeida, t. VI, p. 265.

IV. Phénomènes relatifs à la sensibilité de la rétine.

2752. Structure de la rétine. — L'épaisseur de la rétine est de $0^{\text{mm}},4$ au milieu, et va en diminuant jusqu'au bord, où elle n'est plus que de $0^{\text{mm}},1$. On distingue, dans cette membrane, 5 couches principales. La première, celle qui reçoit directement l'action de la lumière, est hérissée de fibres perpendiculaires microscopiques, les unes en forme de cylindres très-fins, nommées *bâtonnets*, *b* (fig. 1913); les autres en forme de fuseaux *c*, nommées *cônes*, dont le diamètre maximum est de $0^{\text{mm}},005$ environ. Les cônes sont d'autant moins nombreux qu'on s'approche davantage des bords de la rétine, où il n'y en a plus. D'après Schultz, les cônes serviraient à la perception des couleurs, et les bâtonnets, à celle de la lumière en général.



Fig. 1913.

Ophthalmoscopes. — La surface de la rétine présente diverses particularités qu'on peut observer au moyen de l'*ophthalmoscope*, inventé par M. Helmholtz. On se propose, avec cet instrument, d'éclairer vivement la surface de la rétine et d'en distinguer nettement les détails, malgré les réfractions dans les milieux de l'œil. Il y a des ophthalmoscopes de diverses sortes, qu'on emploie habituellement pour étudier l'état pathologique du fond de l'œil. La figure 1914 représente un des modèles les plus simples. La lumière d'une bougie est réfléchiée par un miroir sphérique

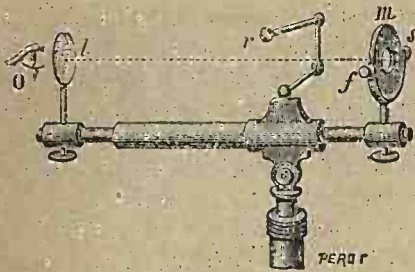


Fig. 1914.

concave *m*, concentrée par une lentille convergente *l*, et introduite dans l'œil à étudier *o*. La rétine ainsi éclairée envoie des rayons qui en donnent, en *f*, une image réelle renversée formée par le cristallin et la lentille *l*. Le miroir *m* est percé d'un trou fermé par une lentille oculaire, à travers laquelle l'observateur, dont l'œil est en *s*, voit nettement cette image, quand les distances *ol* et *lm* sont convenablement établies. Si l'on supprimait la lentille *l*, le cristallin formerait à lui seul l'image renversée, mais confusément. En *r*, est une perle servant à maintenir fixe la direction de l'axe de l'œil *o*.

Observée au moyen de l'ophthalmoscope, la surface de la rétine présente une teinte rouge pourpre, quand elle n'a pas été frappée par une vive lumière; qui

tend à la décolorer, même après la mort, comme l'a découvert M. Boll. Sur cette surface, on distingue une tache blanchâtre un peu bombée, de 2^{mm} de diamètre, qui est la papille du nerf optique, d'où partent, en rayonnant irrégulièrement, des artères et des veines. Au point où aboutit l'axe de l'œil, se voit la tache jaune (*macula lutea*) de 3^{mm} de diamètre environ (2741). Cette tache, qui ne contient pas de bâtonnets et où les cônes se touchent, correspond à la vision nette; mais ce n'est pas là que la sensibilité est la plus grande; et, lorsqu'on veut constater la présence d'un objet peu brillant, comme une faible comète, une nébuleuse, il faut regarder un peu à côté, de manière que l'image se projette à une certaine distance de la tache jaune, en des points où la sensibilité est plus grande. On peut ainsi percevoir la lumière émise par l'objet; mais on ne distingue que confusément sa forme.

M. N. Kühne a tiré parti de la décoloration de la surface de la rétine par la lumière, pour fixer sur cette surface l'image d'objets brillants, qui s'y trouvent ainsi *photographiés*¹. Parmi les expériences qu'il a faites à ce sujet, nous citerons la suivante: Ayant exposé devant une lucarne grillée éclairant son laboratoire, l'œil d'un lapin qu'il venait de décapiter après l'avoir tenu quelque temps dans l'obscurité, il trouva sur la rétine, une image blanche de la lucarne, sur laquelle les barreaux se dessinaient en rouge. On a conclu de là qu'il serait possible de reconnaître sur la rétine l'image d'objets qui s'y seraient peints peu de temps avant la mort; par exemple, dans le cas d'assassinat, distinguer l'image du lieu où se serait commis le crime, et peut-être celle du meurtrier. Cette image serait amplifiée par la photographie ordinaire, qui pourrait même faire apparaître des détails invisibles de cette image (2675). Mais on ne peut, jusqu'à présent, que pressentir la possibilité d'une aussi merveilleuse application.

2753. Mode de sensibilité de la rétine. — La sensibilité de la rétine est spéciale pour la lumière: on peut pincer, déchirer cette membrane, comme l'a fait Magendie sur des animaux vivants, et même sur l'homme, quand il introduisait des aiguilles dans l'œil pour l'opération de la cataracte, sans qu'ils paraissent s'en apercevoir. Certaines substances chimiques, certaines actions mécaniques peuvent néanmoins communiquer aux fibres de la rétine le même mode d'ébranlement que la lumière, et alors on peut voir des lueurs incolores dans l'obscurité. C'est ainsi qu'un coup sur l'œil, ou la secousse produite quand on étrenue, font apercevoir comme un éclair qui passe à travers l'organe. — La simple pression d'un corps étroit détermine l'apparition de courbes brillantes incolores, en forme de cercles ou de croissants, placées à l'opposé du point comprimé. Les images ainsi formées, nommées *phosphènes*, ont été utilisées par M. Serre, d'Uzès, pour étudier l'état pathologique des divers points de la surface de la rétine.

Radiations extrêmes. — La rétine échappe, en grande partie, à l'action de la chaleur qui accompagne le plus souvent la lumière. Les rayons obscurs sont

¹ *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. VI, p. 99.

surtout absorbés par les humeurs de l'œil, particulièrement par l'humeur aqueuse, qui, comme l'eau, est athermane pour ces sortes de rayons (II, 875); ce qui, du reste, a été constaté directement par MM. Janssen et Frantz. D'après M. Cima, les humeurs de l'œil absorbent 91 pour 100 des rayons calorifiques d'une lampe de Locatelli. M. Tyndall a introduit dans son œil, en employant de grandes précautions, les rayons calorifiques émanant d'une lampe électrique et séparés de leur partie lumineuse par un écran de sulfure de carbone iodé (II, 884); il ne ressentit aucune impression de chaleur, quoique ces rayons obscurs fussent capables de faire rougir une lame de platine platinée. Dans ces expériences, il arrive évidemment une petite portion des rayons sur la rétine; mais celle-ci n'en reçoit pas l'impression lumineuse, ses fibres ne pouvant répondre aux vibrations trop lentes qui sont, de même, impuissantes à produire la plupart des effets chimiques.

Les rayons chimiques obscurs paraissent aussi être, au moins en partie, interceptés. Pour le prouver, il suffisait de montrer que certains milieux de l'œil deviennent *fluorescents* sous l'influence de ces rayons (2694). Or, M. J. Regnaud, entre autres, a annoncé que la cornée, l'hyaloïde, et surtout le cristallin, sont fluorescents; il explique aussi, par la grande quantité de rayons chimiques qu'elle contient, l'action dangereuse de la lumière électrique sur les yeux.

Pour que la lumière impressionne la rétine, il faut qu'elle ait une intensité suffisante. On admet généralement qu'il suffit que cette intensité soit environ $\frac{1}{90000}$ de celle des rayons de la lune. Cette limite est très-vague; elle varie beaucoup d'un individu à un autre. Ainsi, on ne distingue ordinairement à l'œil nu que 7 ou 8 étoiles dans les Pléiades, tandis que certains astronomes en voient 10. Mœstlin en comptait jusqu'à 14. On cite des astronomes, des chasseurs de montagne, qui distinguent à l'œil nu les satellites de *Jupiter*; ce qui explique comment les Chinois ont pu les figurer dans leurs annales, avant l'invention des lunettes. La sensibilité de l'œil varie aussi, pour un même individu, avec l'état de la rétine, suivant qu'elle sort du repos, ou qu'elle vient d'être excitée. Par exemple, quand on a passé plusieurs jours dans une obscurité complète, comme l'ont fait Lavoisier et d'autres physiiciens pour se préparer à des recherches de photométrie, la rétine acquiert une sensibilité extrême. Une vive lumière émue, au contraire, cette sensibilité. C'est ainsi qu'on ne distingue rien, au premier moment, quand on passe du grand jour dans un endroit sombre.

Si une lumière trop faible n'agit pas sur la rétine, une lumière trop vive empêche aussi de rien distinguer: on dit qu'on est ébloui; alors la pupille se resserre fortement, pour arrêter le plus possible de rayons. C'est ce qui arrive quand, sortant d'un endroit sombre, où la rétine a éprouvé un repos relatif qui a exalté sa sensibilité, on passe brusquement au grand jour.

2754. Punctum cœcum. — Il y a un petit espace de la rétine qui est à peu près insensible à l'action de la lumière, il se trouve à 5^{mm} de l'axe de l'œil, du côté du nez. Cet espace n'est autre chose que l'extrémité du nerf optique, au point où il pénètre dans l'œil. On le nomme *punctum cœcum*. Mariotte, qui l'a

découvert, en démontrait l'existence par l'expérience suivante : On trace sur un plan, deux points n, n' (fig. 1915) situés à une distance de 10^{cm} environ l'un de l'autre ; puis, fermant l'œil qui est du côté opposé au point n , on place l'autre sur la perpendiculaire no , de manière que la ligne des yeux soit parallèle à nn' . Rapprochant ou éloignant ensuite l'œil peu à peu, en le maintenant sur no , quand on arrive à une distance de 25 à 30^{cm} , on voit le point n' disparaître subitement. C'est que l'image a' de ce point se déplace au fond de l'œil et finit par tomber en b' sur la papille du nerf optique, pendant que l'image a du point n reste fixe. On peut faire l'expérience sur la tache (fig. 1916) en fermant l'œil droit et regardant fixement la croix (fig. 1917), avec l'œil gauche que l'on déplace sur la perpendiculaire à la page ; quand il arrive à 30^{cm} de distance environ, la tache disparaît. Au lieu de faire varier la distance de l'œil à la page, on peut se contenter de déplacer latéralement l'axe de l'œil jusqu'à ce qu'on ne voie plus la tache. On rapporte que Mariotte, à la cour de Charles II d'Angleterre, montrait aux courtisans la manière de voir ainsi, sans tête, l'un d'eux placé à 3 ou 4 mètres de distance ; amusement assez déplacé à la cour du successeur de l'infortuné Charles I^{er}.

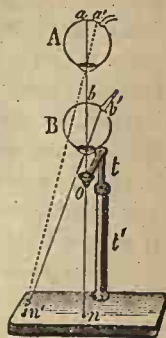


Fig. 1915.

2755. Sensibilité pour des impressions superposées. — Quand deux impressions se superposent sur la rétine, la plus faible disparaît devant la plus forte, quand la dernière vaut environ 64 fois la première ; car, comme nous l'avons vu, une ombre portée sur une surface éclairée, ne se distingue plus quand son éclat ne diffère que de $\frac{1}{64}$ de celui de la surface. Une lumière 64 fois plus faible ne peut donc ajouter un éclat sensible autour de l'ombre portée. Cependant, quand on fait mouvoir cette ombre, son image se déplace sur la rétine et devient alors sensible (2419).

Visibilité des étoiles. — On ne voit pas les étoiles pendant le jour, parce que l'éclat de l'atmosphère est au moins 64 fois plus grand que celui de ces astres. Mais un fait qui paraît bien établi, c'est qu'on peut distinguer certaines

étoiles en plein jour, quand on est au fond d'un puits très-profond. Ce fait curieux, cité par Aristote, admis par Scheiner et J. Herschel, ne paraît pas facile à expliquer ; car chaque point de la rétine ne reçoit, dans tous les cas, que les rayons qui viennent des points de l'atmosphère situés sur l'axe optique qui lui



Fig. 1917.

correspond. Pour en rendre compte, Arago admet que la rétine reçoit de la lumière diffusée par l'œil lui-même. Or, quand on regarde à travers un tube, la quantité de lumière ainsi diffusée est d'autant plus petite que l'espace visible de la voûte céleste est plus étroit ; l'éclat de l'étoile peut donc alors se trouver plus grand que $\frac{1}{64}$ de la lumière totale que reçoit la rétine. Quant à la cause de la diffusion, Arago l'attribuait à des stries ou autres inégalités de la cornée ; nous



Fig. 1916.

verrons qu'elle peut s'expliquer, en outre, par l'existence de corpuscules disséminés dans les humeurs de l'œil.

2756. Irradiation. — Quand on regarde, d'une certaine distance, un corps très-brillant, il semble empiéter sur le fond plus sombre qui l'entoure, de manière à paraître plus grand qu'il n'est réellement. Par exemple, de deux petits carrés égaux (fig. 1918), le blanc sur fond noir paraît plus grand que le noir sur fond blanc. Si l'on dessine des traits parallèles alternativement blancs et noirs exactement de même épaisseur, les premiers paraissent plus épais que les noirs, sur lesquels ils empiètent. Par la même cause, un point noir, un trait fin sur fond blanc peuvent disparaître, tandis qu'un point blanc sur fond noir paraît plus large; il y a donc avantage à écrire les inscriptions en lettres blanches sur fond noir ou très-soncé. — Un écran paraît échancré à l'endroit où il semble couper la flamme d'une bougie qu'il cache en partie. Quand la lune ne montre qu'un mince croissant, tout en laissant apercevoir le reste de son disque, sous forme de

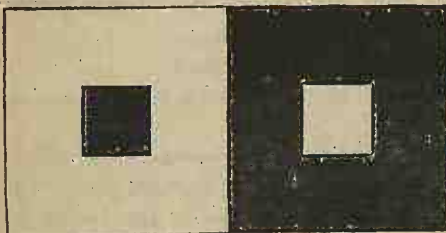


Fig. 1918.

lumière cendrée, on remarque que le croissant déborde notablement la partie du disque faiblement éclairée.

M. Plateau, entre autres, a constaté que l'irradiation est d'autant plus étendue que l'objet est plus brillant et qu'on le regarde plus longtemps; elle varie suivant les individus, et, pour le même individu, d'un jour à l'autre; les lentilles

convergentes la diminuent, et les lentilles divergentes l'augmentent.

On explique généralement l'irradiation, en admettant que l'impression produite sur la rétine par les rayons intenses, se propage au-delà du contour de l'image formée. Telle est la théorie développée par M. Plateau¹; et nous verrons, en parlant des couleurs accidentelles, qu'une semblable propagation est évidente dans certains cas. Trouessart² trouve une autre cause de l'irradiation, dans la formation d'images multiples qui se dépassent un peu les unes les autres, de manière à augmenter l'étendue de l'image résultante. Ces images multiples, très-distinctes chez les yeux myopes, mais difficiles à apercevoir sur les vues normales, disparaissent à la distance de la vision distincte; ce qui explique pourquoi l'irradiation n'est plus sensible, à cette distance². La cause des images multiples, qui ont été aussi observées par Lahire, Mile, Dugès, et étudiées par M. Helmholtz³, a été attribuée par Trouessart à la présence de points opaques ou

¹ Mémoires de l'Académie des sciences de Bruxelles, t. XI.

² Recherches sur quelques phénomènes de la vision, etc.; Brest, 1854.

³ Optique physiologique (1867), traduction française, p. 187.

transparents distribués sur la cornée, ou dans des corpuscules disséminés dans l'humeur aqueuse, le cristallin et le corps vitré, et observés par Lewenhoek. Ces corpuscules forment une espèce de réseau qui multiplie les images, comme le font une fine toile ou une carte criblée de petits trous, interposées entre l'œil et un point lumineux. Les faits suivants, décrits et expliqués par Peclet, viennent confirmer l'existence des points obscurs de l'œil.

Raies dans une fente. — Quand on regarde une surface lumineuse, à travers une fente étroite placée à une distance moindre que celle de la vision distincte, on aperçoit un grand nombre de raies obscures parallèles à la fente, dont la position et l'aspect sont indépendants de la couleur et de la grandeur de la surface éclairée. Ces raies, moins nombreuses quand on éloigne la fente, disparaissent quand elle est à la distance de la vision distincte, et changent de place et s'affaiblissent quand on l'élargit. Peclet regarde chacune d'elles comme formée par l'ombre d'un point obscur de l'œil; les ombres sont linéaires à cause de la forme de la fente; elles se réduisent à des points quand la fente est remplacée par un petit trou. Si l'on place très-près de l'œil, derrière la fente, une lame de verre sur laquelle est marqué un point noir, on voit une raie noire parallèle à la fente, ce qui confirme l'explication ¹.

Rayonnance. — Quand on regarde un objet brillant assez éloigné pour que son diamètre apparent soit très-petit, on le voit comme un point d'où partent des traits brillants plus ou moins nombreux, rayonnant dans toutes les directions. Ces traits se forment dans l'œil, car si l'on incline la tête, le système des rayons tourne avec l'œil. Parmi ces rayons, il y en a de verticaux, ordinairement plus longs que les autres, et qui s'expliquent par la réfraction des rayons lumineux dans le liquide qui lubrifie la cornée et forme un ménisque entre la conjonctive et les paupières. Ils sont d'autant plus longs que l'œil est plus humide, et qu'on rapproche davantage les paupières. Les autres rayonnances, plus ou moins obliques, sont attribuées par Young aux sutures du cristallin (2747), opinion partagée par Dugès. D'autres n'y voient qu'un effet d'irradiations intenses modifiées par la structure de la rétine.

2757 DURÉE DE L'IMPRESSION. — L'impression produite sur la rétine, dure quelques instants après que la cause qui l'a produite a cessé d'agir. Par exemple, si l'on fait passer plusieurs fois de suite et très-rapidement un charbon ardent derrière une petite ouverture, elle paraîtra constamment illuminée, l'impression produite pendant un des passages persistant encore quand le charbon passe de nouveau. Un objet brillant qui tourne avec rapidité fait voir une courbe continue. L'aspect uni d'une roue qui tourne rapidement, le mélange des couleurs dans les disques tournants, le renflement apparent d'une corde vibrante, sont dus à la même cause. Un corps sombre, une balle de fusil, un boulet de canon, qui passent rapidement devant l'œil, ne sont pas aperçus, l'impression de la lumière de l'atmosphère persistant pendant le temps que l'image du corps emploie à

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LIV, p. 379.

parcourir son propre diamètre, c'est-à-dire pendant qu'elle se projette sur un point donné de la rétine. Si le corps était brillant, sa rapidité n'empêcherait pas de le voir, seulement on verrait une ligne lumineuse à la suite du corps, l'image produite sur la rétine persistant en chaque point qu'elle vient de quitter.

2758. Mesure de la durée de l'impression. — D'Arcy mesurait la durée de l'impression sur la rétine, par le temps employé pour faire une révolution par un charbon ardent tournant en cercle, quand la courbe lumineuse devenait continue. Aimé employait un procédé plus précis : Deux disques de carton tournent *en sens contraire* sur un même axe, avec des vitesses égales communiquées par des cordes sans fin ; l'un des disques est percé, près du bord, d'ouvertures étroites, égales et équidistantes ; l'autre ne possède qu'une ouverture semblable. L'appareil étant placé devant une vive lumière, et tournant lentement, on aperçoit un rectangle lumineux, qui change de place et se montre partout où l'ouverture du second disque passe derrière une des ouvertures du premier. Mais si la vitesse de rotation est assez grande pour que l'impression produite par l'une des apparences lumineuses persiste quand la suivante se produit, on aperçoit deux rectangles lumineux à la fois ; si la vitesse est encore plus grande, on en aperçoit trois. La durée de l'impression est alors égale, au moins, au temps que met l'ouverture unique à parcourir l'arc sur lequel sont distribuées celles qui paraissent illuminées simultanément, temps qui est connu d'après la vitesse de rotation et le nombre d'ouvertures du disque. Les rectangles illuminés peuvent l'être avec des intensités différentes, ce qui permet d'évaluer la durée de l'impression, en tenant compte de son accroissement et de son affaiblissement progressifs.

M. Plateau, qui a fait beaucoup d'expériences par ce procédé, qu'il a varié et perfectionné, a obtenu les résultats suivants : 1^o la durée moyenne de la sensation est d'environ 0^s,14 ; 2^o il faut que la lumière agisse pendant un certain temps, pour que l'impression soit complète ; 3^o l'impression maximum persiste, avant de décroître, pendant un temps d'autant plus long qu'elle a été *plus faible* ; ce temps est moindre que 0^s,008 pour un papier blanc exposé au grand jour, si le papier est moins blanc, ce temps est plus long, et il augmente quand le papier est jaune, rouge, bleu ; 4^o la durée *totale* de l'impression augmente avec l'éclat de la lumière ; 5^o l'impression ayant eu le temps de devenir complète, la durée totale diminue quand l'œil est plus longtemps impressionné, la sensibilité étant alors émoussée.

2759. Effet produit par la persistance des impressions. — Il résulte de la durée des impressions sur la rétine, qu'on ne peut distinguer la forme d'un corps qui se meut rapidement. C'est que l'axe de l'œil ne pouvant se déplacer assez vite pour suivre ce corps, l'image de ce dernier se déplace sur la rétine, et y forme une série d'images persistantes qui se superposent en partie et produisent une bande confuse parallèle à la direction du mouvement. Pour distinguer la forme du corps, il faudrait ne le voir que pendant un temps assez court pour qu'il n'ait pas le temps de se déplacer sensiblement. C'est ce qu'on obtient en l'éclairant au moyen d'une étincelle électrique. Malgré la courte durée de

celle-ci, comme l'impression persiste, on distingue les principaux détails du corps. — M. Plateau emploie un autre moyen, applicable particulièrement aux corps dont le mouvement est périodique : on regarde le corps à travers les ouvertures étroites et disposées circulairement, d'un disque de carton noir, auquel on imprime un mouvement rapide de rotation. Le corps est vu d'abord par une des ouvertures, comme s'il était en repos, le temps étant trop court pour qu'il ait le temps de se déplacer. Si la vitesse de rotation du disque est telle que le même corps ou des corps semblables passent devant l'œil au moment où une autre ouverture se présente, il se forme au même point de la rétine une suite d'impressions identiques qui se confondent en une seule, à cause de leur durée, et l'objet est vu comme s'il était en repos. On peut ainsi distinguer et compter les dents d'une roue tournant rapidement.

Pour étudier la constitution de la partie trouble de la veine liquide, Savart faisait mouvoir, derrière la veine verticale, un ruban sans fin, passant sur deux rouleaux tournant rapidement. Ce ruban portait des bandes blanches transversales de 1^{cm} de largeur, séparées par des bandes noires de 7^{cm}. L'eau étant fortement noircie, quand la vitesse du ruban ascendant atteignait celle de la veine, les bandes blanches arrivaient à une hauteur donnée, au moment où y arrivaient également les espaces compris entre deux gouttes, et l'on apercevait une série de bandes noires séparées par des bandes blanches et paraissant absolument fixes. — M. Billet-Gelis obtient le même résultat par un moyen beaucoup plus simple ; il fait tomber la veine un peu en-deçà du centre d'un grand miroir sphérique, qui en donne une image réelle renversée, dont le mouvement a lieu de bas en haut ; il place l'œil de manière que cette image se projette sur la veine, et voit les gouttes immobiles.

Anorthoscope. — Voici d'autres résultats étudiés d'abord par M. Plateau¹, et plus tard par Faraday. Si l'on fait tourner en sens inverse et avec la même vitesse, deux roues égales assemblées sur le même axe, on aperçoit une roue fixe, ayant deux fois plus de rais que chacune des roues réelles. Pour expliquer ce résultat, remarquons que chacune des roues présenterait, en tournant seule, une surface unie. Quand les roues tournent en même temps, et qu'un des rayons de l'une passe entre deux rais de l'autre, l'impression est uniforme et égale à la somme des impressions que produirait chaque roue séparément ; mais quand deux rais se superposent, l'impression est différente : plus faible si les rais sont noirs, plus vive s'ils sont brillants. Si les coïncidences ont lieu toujours au même point, on verra des rais fixes, à cause de la persistance des impressions. Or, si l'une des roues était fixe, les coïncidences auraient lieu là où sont ses rais ; mais si elle tourne en sens contraire de la première et avec la même vitesse, les lieux de croisement seront évidemment deux fois plus nombreux. Si les vitesses n'étaient pas tout à fait égales, les lieux de croisement se déplaceraient, et l'on verrait une roue tournant lentement, dans l'un ou l'autre sens.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XLVIII, p. 291.

Quand on regarde dans une glace une roue dentée, tournant avec une certaine vitesse, à travers les dents supposées en nombre multiple de celui des rais, ces derniers paraissent fixes. Ici, le mouvement se fait dans le même sens; mais on ne peut voir un rais qu'au moment où il passe devant l'œil en même temps qu'un intervalle de deux dents.

2760. Instruments relatifs à la persistance des impressions. — Nous avons eu plusieurs fois à citer des applications de la durée des impressions dans l'œil : le photomètre de Wheatstone (2416), les flammes manométriques, les expériences de M. Lissajous sur la comparaison des sons (I, 666), la combinaison des couleurs par le disque de Newton... On a aussi construit divers instruments dont le jeu est fondé sur cette durée.

Chromatope. — Deux disques de verre, tournant en sens contraire, portent des rayons courbes de différentes couleurs qui, en s'entre-croisant de diverses manières, produisent des effets variés, en présentant des lignes en mouvement lent, partout où il y a superposition des rayons. Comme les points de croisement changent de distance au centre, à cause de la courbure des rayons, on aperçoit en même temps des mouvements autour du centre et d'autres dans le sens du rayon. En plaçant des disques de verre et à peintures transparentes dans un faisceau divergent donné par une lentille, on projette ces images mobiles sur un écran.



Fig. 1919.

Thaumatrope. — Si, comme l'a imaginé le docteur Paris, on fait tourner rapidement autour d'un de ses diamètres un carré de carton sur lequel est représenté un dessin, on distingue ce dessin malgré le mouvement, parce qu'il paraît plus longtemps que dans toute autre, dans la position où son plan est à peu près perpendiculaire à l'axe de l'œil. Si, maintenant, une partie du dessin se trouve d'un côté du carton, et l'autre du côté opposé, à une place convenable, ces deux parties paraîtront réunies pendant le mouvement, et le dessin se trouvera complété. — Si l'axe de rotation est dans une des faces, la partie du dessin qui est sur cette face paraît plus éloignée que l'autre, comme cela a lieu réellement. C'est ce qu'a constaté M. Claudet en écrivant, dans la direction de l'axe, un mot dont les lettres sont alternativement d'un côté et de l'autre. Si l'on regarde avec un seul œil, l'effet disparaît; il montre l'influence du concours des deux yeux pour faire apprécier avec rapidité de très-petites variations de distance.

Avec deux cartons perpendiculaires entre eux et tournant autour du diamètre commun, on peut mettre sur chacune des quatre surfaces, un quart seulement du dessin, et les quatre parties paraîtront réunies pendant la rotation. Ces deux carrés de carton *ab*, *cd* se montent souvent sur un gros fil de fer tournant avec une sorte de toupie *n*, *n*, qu'on lance avec les doigts, et dont la pointe repose au fond d'une petite coupe (fig. 1919).

Phénakistiscope. — Imaginons un même dessin répété un certain nombre de fois tout autour d'un disque de carton C (fig. 1920), et regardons-le à travers des ouvertures équidistantes en nombre égal, pratiquées près du bord d'un autre disque D un peu plus grand, parallèle, et tournant dans le même sens avec la même vitesse, nous verrons le

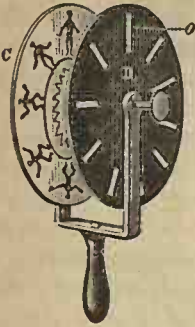


Fig. 1920.

dessin comme s'il était au repos (2759). Si, maintenant, nous supposons que les dessins représentent un même sujet dans des attitudes qui changent un peu quand on passe de l'un à l'autre, les impressions successives produites dans l'œil feront voir le sujet dans des positions se modifiant progressivement, de manière qu'il semblera s'animer et exécuter les mouvements se

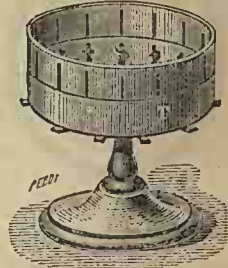


Fig. 1921.

rapportant aux diverses attitudes représentées. — Comme celles-ci ne passent pas graduellement des unes aux autres, le mouvement apparent semble se faire par petites secousses. — Au lieu de regarder le carton peint, à travers le carton troué, on peut appliquer le premier sur le second, et regarder, à travers les trous, l'image du premier réfléchi dans un miroir.

S'il y a plus de figures en C que de trous au disque D, l'image se déplacera en même temps qu'elle changera d'attitude; en effet, les figures étant plus rapprochées les unes des autres que les trous, la figure qui en remplacera une autre se trouvera avancée par rapport au trou par lequel elle doit être vue; elle semblera donc avoir marché dans le sens de la rotation. S'il y avait moins de figures que de trous, elle semblerait reculer.

L'appareil que nous venons de décrire a reçu de son inventeur, M. Plateau, le nom de *phénakistiscope*. Vers la même époque, Strampfer imaginait, sous le nom de *stroboscope*, des appareils fondés sur le même principe. On a beaucoup varié ces sortes d'appareils. La figure 1921 représente le *dédaleum* de M. G. Horper, qui ne diffère du phénakistiscope qu'en ce que les trous sont pratiqués au bord d'un tambour tournant T. Les figures sont peintes sur une bande de



Fig. 1922.

papier appliquée en dedans, de manière qu'elles marchent, par rapport à l'œil, en sens inverse des trous. — Dans le *praxinoscope* de M. Reynaud (fig. 1922), il n'y a plus de trous. Chaque figure fait son image dans une petite glace appliquée en face de lui sur le prisme a. Quand le tambour t, t' tourne, l'œil placé en o voit, pendant un instant, chaque image, au moment où la glace qui la réfléchit se présente en face de lui de manière que le plan de réflexion

passé par la pupille. — Le thaumatrope (*fig. 1919*) forme un phénakistoscope, quand on dessine sur les quatre surfaces un même sujet dans quatre attitudes différentes.



Fig. 1923.

Cercle stroboscopique. — Si l'on imprime au système de cercles concentriques (*fig. 1923*) un léger mouvement giratoire dans son plan, sans faire tourner la feuille sur elle-même, on voit ce système tourner dans le sens et avec la vitesse de la main qui déplace la feuille. Ce phénomène, découvert par M. S.-P. Thompson, peut s'observer avec un seul cercle. Pour l'expliquer, remarquons que le côté du cercle qui s'éloigne de la position première du centre, forme un renflement, dont la persistance des impressions permet de suivre le déplacement en rond, de sorte que l'effet est le même que si ce cercle tournait réellement autour d'un point placé à côté de son centre. Le contour étant uni, on ne peut être averti de l'absence du mouvement sur lui-même; et, en effet, on fait disparaître l'illusion en y faisant des marques prononcées.

Appareils de projection. — M. Uchatius a trouvé moyen de projeter les

images mobiles du phénakistoscope.

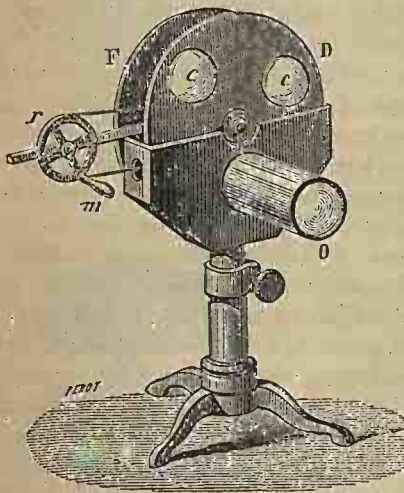


Fig. 1924.

La figure 1924 représente un appareil donnant ce résultat, construit par M. Duboscq. Les dessins gradués, peints sur fond noir en couleurs transparentes, sont distribués au nombre de 12 autour d'un plateau de verre F. Quand on fait tourner ce plateau au moyen d'une roue, *mr*, et d'une corde sans fin, ces dessins passent successivement devant un cylindre muni d'un objectif O. Un disque de bois D portant 4 lentilles convergentes *c*, *c*..., tourne 3 fois plus vite que le plateau C, ce que l'on obtient par une disposition d'engrenages, de manière qu'une lentille vient se placer en face de chaque dessin au moment où il passe devant le cylindre à objectif O. Le

système de la lentille et de l'objectif donne une image du dessin, que l'on reçoit sur un écran, comme dans la lanterne magique, dont la lentille mobile représente la demi-boule. Cette image ne se voit qu'un instant, une partie pleine du disque de bois s'interposant presque aussitôt, et elle est remplacée par l'image

du dessin suivant, quand celui-ci et une nouvelle lentille arrivent en face de l'objectif. Un tube placé par derrière, sur le prolongement du tube O, amène la lumière du soleil ou d'une lanterne à projection, sur le dessin transparent qui se trouve en face de lui. — M. Reynaud a obtenu facilement la projection des images de son praxinoscope, agrandies par une lentille.

M. Em. Daguin a imaginé de former un phénakistoscope de projection par un moyen très-simple, qui consiste à introduire dans le *lampadorama* (2540), le *thaumatrope* (fig. 1919), et à lui imprimer un mouvement de rotation autour d'un axe fixe, par un moyen mécanique quelconque. Les figures qui se présentent successivement en face de l'objectif projettent leur image sur l'écran, avec les mouvements qui résultent des attitudes différentes sous lesquelles elles sont représentées.

Applications. — Le phénakistoscope, sous ses diverses formes, peut être employé avec avantage pour montrer les états successifs d'une machine en mouvement. On s'en est servi pour représenter les diverses phases des différentes allures du cheval. M. Müller en a fait usage pour faire comprendre les mouvements ondulatoires de l'air libre ou confiné dans les tuyaux sonores, ainsi que ceux qui animent l'éther dans les différentes circonstances de la propagation de la lumière.

V. Rapport entre le jugement et la sensation.

2761. La lumière agit sur la rétine; c'est l'image qu'elle reçoit que nous percevons, et nous avons la faculté de remonter, de l'impression produite sur les divers points de cette image, aux objets extérieurs d'où émane la lumière. Nous pouvons apprécier les distances, juger de la forme, de la grandeur, des positions relatives des objets; mais ces divers jugements ne se font pas avec sûreté: les erreurs et les illusions sont faciles, et le moindre changement dans les habitudes de l'observateur suffit souvent pour le tromper grièvement. Les explications qui ont été données des divers phénomènes qui vont nous occuper ont été confirmées par les observations faites sur des aveugles de naissance auxquels on a rendu la vue au moyen d'opérations chirurgicales. Parmi ces observations, les plus célèbres sont celles du chirurgien anglais Cheselden, faites, en 1714, sur un jeune homme très-intelligent, auquel il rendit la vue par la perforation de la membrane de l'iris, suivant les uns, par l'opération de la cataracte, suivant les autres.

2762. Pourquoi on ne voit pas renversé. — Remarquons d'abord que l'âme n'étant pas un personnage debout, regardant l'image formée sur la rétine, le jugement de la situation des objets ne dépend pas nécessairement de celle de l'image. Cela posé, trois systèmes principaux ont été mis en avant sur ce sujet. Les métaphysiciens, Locke, Condillac..., attribuent le jugement de la position droite des objets à l'habitude de comparer l'impression produite dans l'œil, avec

la connaissance, donnée par le tact, de leur position réelle; mais l'aveugle de Cheselden a vu les objets droits, dès qu'il a commencé à en distinguer la forme. — On a dit aussi que, tout étant renversé dans les images faites sur la rétine, même le sol et le ciel, auxquels on rapporte le *haut* et le *bas*, tous les objets doivent nous paraître droits. Mais, dans une lunette qui renverse, les objets, quoique tous renversés, ne nous paraissent pas droits; c'est que nous avons, par la pesanteur, le sentiment du haut et du bas de notre corps, et il en est de même quand nous percevons les images faites sur la rétine.

Voici la véritable explication, trouvée par les géomètres, Descartes, Kepler..., puis Musschenbrœck. Nous avons le sentiment de la direction dans laquelle arrivent les rayons, de manière que nous rapportons les positions des points lumineux, à leurs axes secondaires se croisant au centre optique de l'œil. Descartes compare ces axes à deux bâtons croisés qu'un aveugle tiendrait dans ses mains; quand le bâton tenu dans la main droite rencontre un obstacle, l'aveugle *sent* que cet obstacle est à gauche, et réciproquement. Cette théorie a été développée par d'Alembert, puis par Brewster, qui a posé en loi que *nous transportons l'impression reçue, dans la direction normale à la surface de la rétine*, qui est à peu près sphérique; et, en effet, un objet placé à droite ou au-dessus de l'axe de l'œil est vu là où il est, quoique son image sur la rétine se fasse à gauche ou au-dessous de l'axe.

2763. VISION BINOCULAIRE. — Nous avons deux yeux, dans chacun desquels se forme l'image des objets; comment se fait-il que nous ne voyons pas double? Porta admettait que, la sensibilité d'un des yeux l'emportant toujours sur celle de l'autre, une des sensations faisait disparaître l'autre. Mais, si l'on déplace l'un des yeux avec le doigt, on voit double, et, si l'on place devant les yeux des verres de couleur différente et qu'on regarde un corps blanc, ce corps paraît coloré de la nuance qui résulte du mélange des deux couleurs; les deux impressions existent donc.

La fusion de ces deux impressions en une seule vient simplement, comme l'admettaient Aristote et Ptolémée, de l'habitude que nous avons contractée de sentir certains points des deux rétines impressionnés simultanément, quand ils reçoivent la lumière émanant d'un même centre. Ces points, nommés *points identiques*, sont situés à la rencontre des rétines par les axes des yeux convergeant vers le centre lumineux. Si l'on pousse un œil avec le doigt, de manière que les deux images ne se fassent plus en des points identiques, on voit double. Il en est de même quand on louche volontairement, les points frappés sur les deux rétines, quoique placés symétriquement, n'étant plus ceux de la *tache jaune*, qui sont habituellement affectés simultanément. Par la même raison, on voit aussi doubles les objets plus éloignés ou plus rapprochés que ceux que l'on regarde directement, et vers lesquels convergent les axes des yeux. Si l'on ferme un œil et qu'on l'ouvre brusquement, au premier instant, on voit double l'objet que l'on regardait, l'œil fermé n'ayant pas son axe dirigé vers cet objet; mais cet œil se dirige aussitôt, et les deux images se confondent. Quand on

ferme et qu'on ouvre alternativement les deux yeux, on voit l'objet osciller en se portant du côté de l'œil qu'on ouvre ou qu'on ferme, suivant la distance, l'axe de l'œil fermé se plaçant, sous l'influence de l'élasticité des muscles droits, dans une direction normale à la ligne des deux yeux.

Du reste, cet effet de l'habitude se manifeste dans le toucher, et l'on ne sent pas 10 objets quand on palpe un corps au moyen des 10 doigts. Mais si l'on vient, comme l'indique Aristote, à placer un corps dans l'angle de deux doigts croisés l'un sur l'autre, de manière que ce corps les touche en des points qui, d'habitude, ne sont impressionnés simultanément que par deux corps différents, on *sentira double*, et l'on aura quelque peine à se défendre de l'illusion.

Voici deux autres expériences très-curieuses, qui montrent bien la fusion des images faites sur les points identiques. On regarde une bougie *s* (fig. 1925) avec les deux yeux, puis on interpose un prisme *p* ayant un angle de 2 à 3°, dans le trajet des rayons qui vont à l'un d'eux, *o*; aussitôt on voit double. Mais l'œil *o* se déplace bientôt de manière à recevoir l'image réfractée au point correspondant à celle

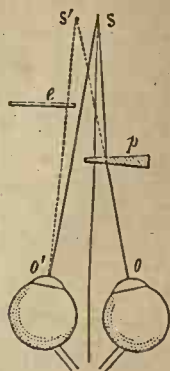


Fig. 1925.

de l'autre œil, et les deux sensations se confondent. Si, alors, on place une autre bougie en *s'*, sur le prolongement du rayon dévié par le prisme, en la cachant à l'œil, au moyen d'un écran *e*, quand on enlèvera brusquement le prisme, les deux bougies se confondront en une seule¹.

La seconde expérience est due à Wheastone : on regarde un point lumineux *a* (fig. 1926) à travers deux tubes noirs, auxquels on applique les yeux, et qui sont dirigés vers le point *a*. On place deux objets identiques en *b* et *b'*, ou en *c* et *c'*, sur les directions *oa*, *o'a'*, et l'on ne voit qu'un objet, qui semble situé en *a*; les images des deux objets *b*, *b'* ou *c*, *c'* se confondant, parce qu'elles se font en des points correspondants des deux rétines. — Quant à l'utilité de la

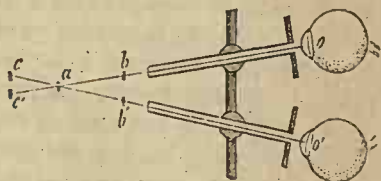


Fig. 1926.

vision binoculaire, elle a d'abord pour effet de rendre l'impression plus vive, comme on peut le reconnaître par divers moyens, entre autres en déplaçant un des yeux avec le doigt, de manière que les images d'un carré de papier paraissent séparées en se superposant en partie; l'éclat est plus grand dans les parties superposées, et si la feuille est colorée, la couleur y est plus vive. Nous verrons, en outre, que l'action simultanée des deux yeux joue un rôle important dans le jugement de la distance et dans l'appréciation du relief des objets.

¹ Herschel, *Traité d'optique*, traduction française, t. I, p. 190.

2764. Horoptre. — Les points identiques voisins des axes optiques ne sont pas les seuls dont les images se confondent, pour un même état de l'œil; les points placés symétriquement plus loin de ces axes, peuvent donner aussi une sensation unique, seulement l'image est trouble, parce qu'elle sort du champ de la vision nette (2741). Le lieu des points lumineux qui jouissent de la propriété de former dans les deux yeux des images symétriques, et qui par conséquent sont tous vus simples, se nomme *horoptre* ou *horoptère*. Agulonius, Porterfield, pensaient que cette ligne était une droite parallèle à la ligne des yeux; mais M. Vieth et M. Müller ont trouvé que, si l'on suppose le centre optique de l'œil confondu avec le centre de la sclérotique, ce qui a lieu approximativement, l'horoptre est une circonférence passant par les centres optiques c, c' (fig. 1927) et par le point de convergence A des axes des yeux¹. En effet, soit M un point de cette circonférence, et m, m' les images de ce point; les arcs $am, a'm'$ étant égaux, comme mesurant des angles égaux $McA, Mc'A$, ces images sont également distantes des extrémités a, a' des axes optiques, et par conséquent les sensations se confondent. On voit aussi que les angles cMc', cAc' , ayant la même mesure $\frac{1}{2}cc'$, l'horoptre est une courbe telle que les axes des yeux convergeant vers un de ses points forment toujours le même angle. On voit enfin que le déplacement ma de l'image sur la rétine, quand le point passe de A en M, est, en degrés, la moitié du déplacement de ce point; car l'arc AM contient deux fois plus de degrés que am , puisqu'il en faut prendre la moitié pour mesure de l'angle McA , qui est

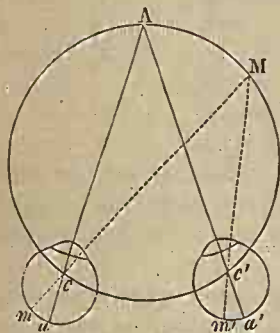


Fig. 1927.

égal à mca . Si nous faisons tourner le plan de la figure autour d'une droite passant par les points c, c' , nous obtiendrons un tore, dont tous les points jouiront des propriétés de l'horoptre dans le plan $cAMc'$.

On a objecté à cette théorie que les divers points d'un même objet ne devraient être vus simples qu'autant qu'ils seraient distribués sur la surface d'un tore. Mais, comme le remarque Brewster, la vision n'étant nette que pour les points situés sur les axes ou très-près des axes des yeux, la perception des autres est trop confuse pour qu'on puisse y reconnaître s'ils sont vus simples ou doubles, à moins qu'il ne s'agisse d'un corps très-brillant, qui produit généralement une impression double. Ces images confuses, qui se font autour de l'axe de l'œil, servent à le guider dans les déplacements rapides par lesquels il explore successivement les divers points de l'objet (2741). Sans cette indication confuse de la position de ces points, l'œil chercherait au hasard les détails qu'il doit voir successivement avec netteté.

¹ A. Prévost, de Genève, ajoute à cette circonférence, la perpendiculaire au plan des axes passant par leur point de rencontre A.

2765. Semi-décussation des nerfs optiques. Héliopsie. — Wollaston a essayé d'expliquer la fusion des sensations dans les deux yeux, et la convergence spontanée de leurs axes vers le point que l'on regarde, par la manière dont les fibres nerveuses partant des deux côtés du cerveau se distribuent dans les nerfs optiques¹. Il remarqua un jour qu'il ne distinguait que la moitié des objets; en regardant, avec un seul œil ou avec les deux yeux, le milieu d'un mot, il n'en distinguait que la dernière moitié. Ce phénomène, connu sous le nom d'*héliopsie*, avait été déjà observé; il se manifeste assez souvent dans le cas de migraine, comme nous l'avons souvent éprouvé nous-même, et le côté frappé d'insensibilité est opposé au côté où siège la douleur. Cet état anormal disparaît assez rapidement; cependant, Wollaston cite un cas d'*héliopsie* permanente; le côté droit des objets était invisible, et cet état s'était déclaré après une douleur aiguë à la tempe gauche.

Pour expliquer ce phénomène, Wollaston remarque que les nerfs optiques partant des deux côtés du cerveau se réunissent et semblent se confondre, pour se séparer de nouveau et se rendre à chaque œil. On a cru longtemps que les fibres se croisaient au point de jonction, toutes celles qui partent du côté droit du cerveau continuant à rester réunies pour former le nerf optique de l'œil gauche, et réciproquement, comme cela a lieu, du reste, chez certains animaux. Pour expliquer l'*héliopsie*, Wollaston a admis que chez l'homme, les nerfs n'éprouvent qu'une *semi-décussation*, et que chacun d'eux se bifurque: une partie se portant dans l'œil du même côté, et formant la rétine de ce côté; l'autre partie allant à l'autre œil et formant la moitié de la rétine qui est aussi du même côté; de manière que les moitiés droites, par exemple, des deux rétines sont insensibles simultanément, si la partie du cerveau d'où part le nerf qui, en se bifurquant, leur donne naissance, se trouve altérée.

La *semi-décussation* a été prouvée directement, depuis, au moyen de dissections attentives, chez l'homme et les vertébrés supérieurs; elle a pour premier effet d'intéresser les deux moitiés du cerveau dans la vision par un seul œil. En outre, les images d'un même point M (*fig.* 1927) se forment du même côté sur les deux rétines, c'est-à-dire sur des parties composées de fibres nerveuses ayant la même origine; ce qui donne l'explication de la fusion des deux sensations. Wollaston trouve aussi, dans la *semi-décussation*, la cause qui dirige les axes optiques vers le point lumineux, les yeux cherchant à éprouver l'impression des images d'un même point extérieur, sur des fibres ayant la même origine dans le cerveau. Cependant, on peut aussi attribuer l'orientation des axes à la tendance des yeux à chercher la position pour laquelle on voit nettement, c'est-à-dire pour laquelle les images se forment sur la tache jaune, où les axes des yeux rencontrent la rétine (2752); et, en effet, on rapporte que l'aveugle de Cheselden ne vit pas double, quand on l'opéra du second œil, un an après qu'il l'eut été du premier.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVII, p. 402.

2766. JUGEMENT DE LA DISTANCE. — Le jugement des distances dépend d'éléments très-complexes, et n'est un peu certain que pour les objets rapprochés.

Cas des petites distances. — Quand l'enfant en bas âge commence à discerner les impressions de la lumière, tous les objets lui semblent toucher à ses yeux ; aussi, le voit-on tendre la main pour saisir ceux qui sont éloignés, et la porter au-delà de ceux qui sont très-rapprochés. Ce n'est qu'à la suite d'une longue expérience qu'il peut rapporter à une cause extérieure l'ébranlement produit au fond de son œil. L'aveugle de Cheselden, qui a pu rendre compte de ses impressions, crut pendant longtemps que tout ce qu'il voyait touchait ses yeux, comme les objets qu'il palpait touchaient ses doigts ; ce ne fut que peu à peu qu'il arriva à voir les corps dans leur véritable position. L'éducation de l'organe se fait à cet égard par des comparaisons répétées entre les données du tact, qui permet d'apprécier les distances, et celles de la vue. On finit par avoir conscience du degré de convergence des axes oculaires et de l'effort que chaque œil doit faire pour s'accommoder à chaque distance, et l'on en déduit cette distance. Le concours des deux yeux joue ici le rôle le plus important, comme il est facile de s'en assurer en regardant avec un seul œil ; alors on peut se tromper notablement. Par exemple, quand on écrit, ce n'est qu'avec hésitation qu'on peut, avec un seul œil, poser la plume sur la lettre qu'on vient de quitter, et ce n'est qu'après plusieurs tâtonnements, qu'on parvient à faire passer une baguette dans un anneau vu de profil. Cependant, les borgnes finissent par acquérir, au moyen de l'adaptation de l'œil, l'habitude de juger avec quelque précision des petites distances, mais avec moins de sûreté que ne le font ceux qui voient des deux yeux. Ce que l'on apprécie, en définitive, avec un seul œil, c'est le degré de divergence du faisceau qui entre par la pupille, degré de divergence qui détermine l'état que doit prendre l'organe pour voir nettement. Il en résulte que, quelle que soit la position du point lumineux, il apparaît toujours au sommet géométrique du cône formé par les rayons divergents qui entrent dans l'œil. Ce fait, établi par Barrow, est la source d'une foule d'illusions d'optique ; il nous a servi, entre autres, à expliquer les effets des miroirs plans ou courbes.

Cas des objets éloignés. — Quand il s'agit d'objets très-éloignés, les éléments d'appréciation dont nous venons de parler nous manquent, les axes des yeux ne changeant plus sensiblement de position, et l'œil n'ayant plus besoin de s'adapter (2744). Le jugement de la distance ne s'établit alors que d'une manière incertaine. Tantôt on considère l'éclat des objets, tantôt la netteté avec laquelle on les distingue à travers l'air plus ou moins pur. C'est ainsi qu'un objet éloigné paraît plus éloigné encore quand on le regarde à travers un verre bleu qui en diminue l'éclat. De deux lumières vues pendant la nuit, la plus éloignée semble la plus rapprochée si, malgré la distance, elle paraît la plus brillante. Les peintres ont soin de donner moins de netteté aux parties du paysage placées sur les derniers plans. Un habitant des plaines, transporté dans les montagnes, où l'air est généralement très-pur, voit toujours les distances beaucoup trop

petites; les flancs des montagnes semblent plus escarpés qu'ils ne sont réellement, les sommets paraissent rapprochés dans la direction horizontale; aussi a-t-on soin, dans les représentations en relief, d'exagérer la hauteur des pics par rapport à leur base; sans cela on ne les reconnaîtrait pas.

Les objets interposés jouent aussi un rôle important dans l'évaluation des grandes distances; plus ils sont nombreux, plus la distance paraît grande; parce qu'ils forment autant de repères qui servent à l'évaluer. Un clocher vu par-dessus un toit qui cache tous les objets intermédiaires, semble toucher au toit, quoiqu'il en soit très-éloigné. Quand deux objets sont ainsi placés à peu près dans la même direction, il suffit, pour constater qu'ils ne sont pas à la même distance, de se déplacer latéralement; on voit le plus éloigné marcher dans le même sens, et d'autant plus qu'il est plus éloigné de celui qui est en avant.

Enfin, la grandeur connue des objets peut aider à apprécier leur distance, leur image sur la rétine étant d'autant plus petite qu'ils sont plus éloignés. C'est ainsi qu'on juge de la distance d'un navire, par la difficulté plus ou moins grande de distinguer les détails du gréement. C'est en modifiant les dimensions des images de la fantasmagorie qu'on produit, dans l'obscurité, l'illusion qui fait croire que ces images avancent ou reculent (2541).

2767. JUGEMENT DE LA GRANDEUR. — Quand plusieurs objets sont à la même distance de l'œil, nous jugeons de leur grandeur relative en comparant les dimensions des images faites sur la rétine; ces dimensions étant alors entre elles comme les diamètres apparents des objets. Mais la forme d'un objet et ses dimensions relatives en divers sens peuvent donner lieu à des illusions nombreuses. Par exemple, un cylindre un peu plus large que haut, comme un chapeau, peut paraître plus haut que large; un mât, une flèche de clocher paraissent moins élevés qu'une grosse tour de même hauteur. — Quand les distances sont différentes, le jugement des grandeurs relatives dépend à la fois des dimensions de l'image sur la rétine, et de l'idée que nous nous faisons de la distance de ces objets.

Grandeur de l'image. — On admet généralement que le diamètre absolu de l'image sur la rétine est en raison inverse de la distance de l'objet à l'œil, ou mieux au centre optique de l'œil. Ce principe géométrique pourrait être vrai, si l'œil, ne changeant pas d'état d'après la distance des objets, l'image se formait toujours à la même distance du centre optique; mais nous savons qu'il n'en est pas ainsi. La grandeur de l'image doit donc varier suivant une loi plus compliquée.

M. Lubinoff a montré, en outre, que la grandeur de la pupille a une influence marquée sur les dimensions de cette image¹. Pour mettre ce fait en évidence, on prend deux disques inégaux AB, ab (fig. 1928); on fixe le plus grand derrière le plus petit sur une règle divisée fixe, et on les regarde par une ouverture pp' plus grande que la cornée transparente; on trouve que le plus grand disque, p , pour être complètement caché par le plus petit, doit être plus éloigné que ne

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LIV, p. 43.

l'indique la loi géométrique, les distances étant comptées, soit de la surface de la cornée, soit du centre optique de l'œil. Ces résultats dépendent de la grandeur de la pupille; car, si l'on regarde par un très-petit trou, ils disparaissent, et, avec une fente étroite, les effets n'ont lieu que dans la direction de la fente. Voici comment ils s'expliquent: Menons, du centre de la pupille, l'angle visuel aob par les bords du petit disque ab (fig. 1928). Si les points A et B sont sur le prolongement de oa et ob , le disque AB sera à la distance pour laquelle il serait caché géométriquement. Mais remarquons que, si nous menons la droite $p'bc$, passant par le bord p' de la pupille, les points situés en eB envieront des rayons dans l'œil; ces rayons se réuniront sur la rétine et feront voir ces points. Le disque AB paraîtra donc autour de ab , et il faudra éloigner le premier jusqu'à ce que ses bords touchent les droites cap et ebp' , pour qu'il soit invisible. Il est facile de voir que si ab était remplacé par une ouverture pratiquée dans un écran, on apercevrait un espace de largeur égale à Be' , tout autour du disque AB placé dans l'angle aob .

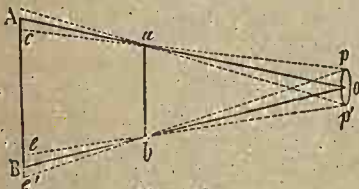


Fig. 1928.

— Si l'on remplace le petit disque par un anneau mince formé, par exemple, d'un fil de fer noirci, on obtient à la fois les résultats donnés par le petit disque et par l'ouverture qui le remplace; on voit le grand disque dépasser le bord extérieur de l'anneau, pendant que le bord intérieur paraît bordé d'une auréole formée par le fond sur lequel est peint le grand disque. On voit donc que la vision n'est pas bornée par les limites géométriques de l'angle visuel, à cause des dimensions de la pupille.

2768. Influence de la distance. — A égalité de grandeur de l'image sur la rétine, nous jugeons les objets d'autant plus grands que nous les supposons plus éloignés, parce qu'une longue expérience nous a appris que l'éloignement d'un objet est accompagné d'une diminution dans les dimensions de l'image. Ainsi, un homme ne nous semble pas plus grand à 3 mètres qu'à 20, quoique l'image sur la rétine soit beaucoup plus petite dans le dernier cas. L'aveugle de Cheselden ne pouvait d'abord reconnaître les grandeurs relatives des objets; il ne concevait pas comment un portrait en miniature pouvait être renfermé tout entier dans sa main, tandis que la tête du modèle ne pouvait être contenue dans ses deux mains. Ce ne fut qu'après une longue expérience qu'il put comparer les dimensions des objets, qui lui parurent d'abord tous très-grands. L'influence de la distance le jetait aussi dans des erreurs continuelles, qu'il apprit peu à peu à rectifier.

Il résulte de là que tout ce qui peut nous tromper sur les distances, nous trompe également sur les grandeurs. Par exemple, un grand nombre d'objets interposés faisant juger les distances plus grandes (2766), font paraître plus grands les corps éloignés. C'est ainsi qu'un homme placé au haut d'une pente couverte de pierres, de végétaux, etc., nous semble un géant. Les constellations, la

lune, le soleil, près de l'horizon, paraissent beaucoup plus grands qu'au zénith; cependant, le diamètre angulaire de la lune est moindre. Cette illusion, expliquée par Alhazen, vient de ce que la voûte céleste nous paraît surbaissée au zénith, parce qu'elle y est plus éclairée qu'à l'horizon, et alors les astres nous semblent plus éloignés quand ils sont très-bas. Les objets terrestres interposés concourent aussi à faire paraître la distance plus grande. Si l'on regarde l'astre à travers un tube qui empêche de les voir, ainsi que la voûte céleste, l'illusion disparaît.

Quand, les objets étant très-grands, l'œil a besoin de beaucoup se déplacer pour en observer les différentes parties, le jugement de leur grandeur dépend aussi des détails qu'ils présentent et qui font apprécier le déplacement éprouvé par l'œil. C'est ainsi qu'une chambre vide paraît plus petite que quand elle est meublée. Les édifices dits gothiques paraissent très-grands à cause des nombreuses sculptures qui les décorent et qui sont d'autant plus nombreuses, et non d'autant plus grandes, que l'édifice est plus élevé. Dans l'architecture grecque, au contraire, les proportions restent ordinairement les mêmes, la grandeur absolue des détails changeant seule, de sorte que ces édifices, quand ils dépassent les dimensions communes, ne produisent pas un effet en rapport avec leur grandeur. Par exemple, tous les voyageurs ont remarqué que l'on ne se fait une idée des dimensions colossales de la façade grecque de l'église Saint-Pierre de Rome qu'en l'examinant de très-près.

2769. Jugement de la forme et des positions relatives. — L'image formée sur la rétine n'a que deux dimensions, et nous n'acquérons la faculté de juger des positions relatives des divers points de cette image qu'à la suite d'expériences souvent répétées. L'aveugle de Cheselden ne pouvait pas d'abord distinguer un triangle d'un cercle; il n'éprouvait qu'une impression, sans pouvoir discerner de différences entre ces deux figures. Au bout de quelque temps, il put se rendre compte du contour des objets, et plus tard il parvint à acquérir le sentiment du relief et de la forme des corps à trois dimensions, après avoir fait un grand nombre de comparaisons entre les indications du tact et les conditions de l'image plane faite sur la rétine. Il y a encore ici deux cas à considérer : celui des objets rapprochés et celui des objets très-éloignés.

Objets rapprochés. — Dans ce cas, le sentiment du relief vient, en partie, de l'appréciation de la distance à l'œil, des divers points de l'objet. De plus, les différentes lignes qui forment une image plane sur la rétine, sont déformées suivant certaines lois; celles qui sont droites paraissent former des angles différents de ceux qu'elles forment réellement, et nous nous accoutumons peu à peu à remonter à la forme du corps qui a produit l'image ainsi modifiée. C'est ainsi que, dans les arts graphiques, on imite le relief des corps en donnant aux différentes lignes de la figure plane d'un objet à trois dimensions, les mêmes positions relatives qu'elles ont dans l'image que cet objet forme sur la rétine; de manière que le dessin produit cette même image dans l'œil. Il est une autre condition dont les peintres tirent un grand parti; nous voulons parler de la distribution des ombres et des pénombres sur les corps éclairés. Par exemple, un cercle semblera

une sphère, si les ombres y sont peintes telles qu'elles se présentent à la vue sur une sphère réelle éclairée d'un côté. Mais ce n'est encore qu'après une longue expérience que nous nous habituons à voir le relief des corps. Pour l'aveugle de Cheselden, tous les objets étaient d'abord plans; un tableau n'était pour lui qu'une surface couverte de différentes couleurs. Plus tard, quand il fut arrivé à apprécier le relief des corps, les figures d'un tableau lui parurent en relief, et il demandait quel était le sens qui le trompait, du tact ou de la vue.

La position relative des lignes qui se coupent peut donner lieu à des illusions singulières, signalées par M. Zollner. Par exemple, la droite *ab* (fig 1929) paraît brisée aux deux endroits où les hachures qui la coupent changent d'inclinaison; parce que ces hachures sont inclinées dans le sens où elles le seraient si, étant toutes parallèles et perpendiculaires à la droite *ab*, on pliait celle-ci comme elle semble l'être. De même les deux bandes parallèles *mn*, *pr* paraissent plus écartées au milieu qu'aux extrémités, et les bandes *pr* et *st*, plus éloignées aux deux extrémités qu'au milieu.

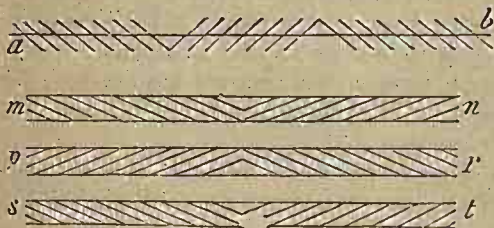


Fig. 1929.

Objets éloignés. — Nous n'avons guère, pour juger de la forme des objets éloignés, que le secours des ombres; aussi, les jugements sont-ils alors très-incertains. Par exemple, en l'absence d'ombres bien marquées, il est impossible de reconnaître de loin si une tour est ronde ou carrée. Les effets de perspective peuvent quelquefois aider au jugement; mais il faut alors que la distance ne soit pas trop grande, ou que le corps, de grandes dimensions, comme un édifice, soit orienté de manière à montrer différentes lignes, dont on puisse observer les angles.

Perspective. — Nous jugeons plus facilement de la situation des objets placés à différentes distances, par les positions relatives de leurs images sur la rétine, positions que nous avons appris à comparer avec celles des objets, en nous aidant de l'appréciation des distances par la locomotion ou par les différents moyens indiqués ci-dessus (2766). Les positions relatives des images sur la rétine sont soumises à certaines règles géométriques, de manière qu'on peut tracer sur une surface plane un dessin produisant dans l'œil la même image que les objets réels. C'est en quoi consiste la *perspective linéaire*, dont la science paraît avoir pris naissance dans les décorations théâtrales, et dont, d'après Vitruve, un nommé Agatarchus, guidé par Eschyle, aurait donné les premiers principes. C'est au moyen de la perspective linéaire, en combinant les ombres et les teintes, diminuant la grandeur des objets qui doivent paraître les plus éloignés; affaiblissant leur éclat pour imiter les effets de l'absorption de la

lumière par l'atmosphère (*perspective aérienne*), que les peintres obtiennent les effets que produisent leurs dessins quand on s'en éloigne convenablement. Les bords du tableau nuisent singulièrement à l'illusion, en fournissant à l'œil des lignes de repère, auxquelles il compare involontairement les distances des différents points du dessin, de manière à les voir à leur véritable place. On évite cet effet en regardant à travers un tuyau qui cache le cadre. C'est par un semblable artifice qu'on produit les illusions des *dioramas* et des *panoramas*. Dans le *diorama*, le spectateur est à une sorte de fenêtre dont le contour lui cache les bords du tableau. Dans le *panorama*, la peinture est disposée circulairement autour du spectateur, placé au milieu sur une petite terrasse, dont le plancher fait saillie de manière à cacher la limite inférieure du tableau. La limite supérieure est cachée de même par le bord d'un toit qui recouvre la terrasse.

2770. INFLUENCE DES DEUX YEUX SUR L'APPRÉCIATION DU RELIEF. — Un des éléments les plus importants du jugement du relief des corps *rapprochés* est

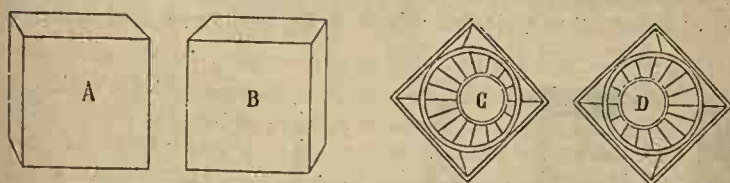


Fig. 1930.

fourni par l'action simultanée des deux yeux. Ce rôle de la double vision a été découvert par Wheatstone vers 1833¹.

Quand on regarde un même corps peu éloigné, successivement avec chaque œil, on en aperçoit l'ensemble sous deux aspects différents : avec l'un des yeux, les positions relatives des lignes ne sont pas les mêmes qu'avec l'autre, et l'on voit du côté de cet œil certaines parties du corps qu'on ne voit pas avec l'autre, les deux yeux n'étant pas situés de la même manière par rapport au corps. Par exemple, un cube sera vu comme en A (*fig. 1930*) quand on le regardera avec l'œil gauche, et comme en B, avec l'œil droit. Un tronc de cône ayant sa petite base tournée vers les yeux, sera vu comme en C avec l'œil gauche, et comme en D avec l'œil droit; s'il était *en creux*, on le verrait comme en C avec l'œil droit, et comme en D avec l'œil gauche. Quand on regardera avec les deux yeux l'objet en relief, les deux images faites sur les rétines ne seront donc pas identiques. On y distinguera trois parties : une partie commune, vue en même temps par les deux yeux, et dont les sensations se confondront, par les raisons que nous avons développées (2763); les deux autres, vues par un œil seulement, et qui s'ajouteront dans l'image, à droite et à gauche de la partie commune. De la combinaison de ces diverses sensations résultera le sentiment des

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. II, p. 330.

trois dimensions et du relief du corps. On voit que les deux yeux embrassent, pour ainsi dire, la surface des objets, de manière à en distinguer non-seulement la partie antérieure, mais encore une portion des parties latérales ou intérieures. Cela ne pouvant avoir lieu sur un tableau peint, on comprend pourquoi les objets représentés sur le premier plan ne produisent jamais une illusion complète; d'autant plus qu'ils se projetteraient sur des objets éloignés, différents pour les deux yeux, s'ils étaient réels, ce qui n'est pas réalisé sur le tableau. On supprime cette opposition entre l'effet du dessin et celui de la vision binoculaire des objets réels en s'éloignant, auquel cas les images dans les deux yeux, d'un objet réel, sont sensiblement identiques, ou bien en fermant un œil, ce que l'on fait instinctivement quand on veut bien juger de l'effet d'une peinture.

2771. Stéréoscopes. — En partant des principes qui précèdent, Wheatstone s'est proposé de faire voir en relief des dessins représentant des objets à trois dimensions. On commence par préparer deux dessins de l'objet : l'un le représentant tel qu'on le voit avec l'œil droit, l'autre tel qu'on le voit avec l'œil gauche; et l'on fait en sorte que, celui de droite étant vu par l'œil droit seule-



Fig. 1931. — 1/6.

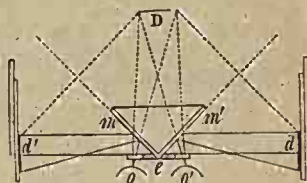


Fig. 1932.

ment, et celui de gauche par l'œil gauche, les deux dessins paraissent superposés, comme le paraîtraient, dans la sensation, les deux images de l'objet réel qu'ils représentent. Pour remplir ces conditions, Wheatstone place les dessins sur deux tablettes verticales parallèles *ab*, *a'b'* (fig. 1931), entre lesquelles sont disposés deux miroirs plans *mn*, *m'n* formant un angle de 90° . Un écran *e*, présentant des échancrures, *o*, *o'* pour les yeux, et *n'n* pour le nez, cache l'arête d'intersection des deux miroirs. La figure 1932 représente une coupe horizontale de l'instrument. Les rayons lumineux, partant des dessins *d* et *d'*, vont faire en *D* leur image virtuelle dans les miroirs. On fait en sorte que ces images se superposent, en faisant glisser convenablement sur elles-mêmes les tablettes *ab*, *a'b'* (fig. 1931). Alors l'illusion est complète, et l'on croit voir un objet réel à trois dimensions. L'appareil porte le nom de *stéréoscope de réflexion*.

Stéréoscope de réfraction. — Cet instrument, si populaire, a été inventé par Brewster, qui en confia la construction à MM. Soleil et Duboscq, en 1850. On en voit (fig. 1933) une coupe par un plan passant par la ligne des yeux, et l'ensemble (fig. 1934). Considérons d'abord deux prismes *p*, *p'* (fig. 1933), opposés par leur angle, qui est très-petit, et soient *d*, *d'* les deux figures for-

mant ce qu'on nomme un *dessin stéréoscopique*. Chacun des yeux, placés en o et o' , ne verra qu'un seul des deux dessins, parce qu'il y a un écran e (fig. 1934) allant du sommet des prismes à la ligne de séparation des deux dessins. Les rayons lumineux qui traverseront les prismes seront déviés sans dispersion sensible, de manière que les images de d et d' (fig. 1933) se superposeront en D , où l'on verra l'image en relief de l'objet dessiné.

Au lieu de prismes, Brewster met en p , p' deux portions d'une même lentille convergente, de manière que l'image est grossie comme par une loupe, et éloignée à la distance de la vision distincte. — En r (fig. 1934) est un petit volet garni d'une feuille d'étain, que l'on incline de manière à réfléchir la lumière sur le dessin. L'intérieur de la boîte est noirci, et le fond cc' est formé par une lame de verre dépoli, de manière qu'on peut, en tournant ce fond du côté du jour, éclairer par derrière les dessins translucides, ordinairement des photographies sur verre.

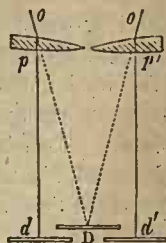


Fig. 1933.

L'inégalité des images faites dans les deux yeux et les effets du stéréoscope, qui en sont une conséquence, semblent une objection à la théorie des *points identiques*, par laquelle on explique la fusion des impressions dans la vision binoculaire (2763). Mais il ne faut pas oublier qu'on ne voit *nettement* que les points du corps ou du dessin stéréoscopique, qui sont très-rapprochés du point de rencontre des axes des yeux. En second lieu, il y a, dans les images faites sur les deux rétines, une partie commune, à laquelle s'applique directement la théorie des points identiques. Quant à la partie que l'œil droit voit seul, son image n'existe que dans cet œil; il en est de même de la partie que l'œil gauche voit seul; il n'y a donc pas de raison pour que ces parties soient vues doubles, puisque leur image n'existe que sur une des rétines. Il peut arriver, du reste, que la partie commune des deux images n'existe pas; par exemple, si dans l'un des dessins il y a une droite verticale, et dans l'autre une droite correspondante un peu oblique, les images de ces droites se fusionneront dans la sensation, et l'on verra une seule droite s'élevant ou s'abaissant par rapport au plan du dessin. Si les deux droites étaient trop écartées, elles seraient vues séparément, les images faites dans les deux yeux ne se confondant plus. Par exemple, si l'un des dessins représente un triangle et l'autre un carré, on verra ces deux figures superposées. Si les deux dessins représentent des parties différentes d'un même sujet, ces parties se verront en même temps dans le stéréoscope, et le sujet sera complété. — Ajoutons qu'il y a des personnes qui ne peuvent jouir de l'illusion du stéréoscope; ce qui tient probablement à une grande inégalité de sensibilité des deux yeux.

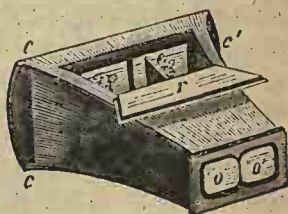


Fig. 1934. — 1/8.

2772. Modifications et applications du stéréoscope. — D'abord on n'a guère employé dans le stéréoscope que des dessins représentant des corps de formes géométriques, comme des polyèdres. Depuis, la photographie a fourni le moyen de faire des dessins stéréoscopiques avec une exactitude de perspective absolue, et l'on trouve aujourd'hui dans le commerce, des doubles dessins de statues, groupes, monuments, vues, paysages, et même de portraits, dans lesquels on distingue, au stéréoscope, les reliefs, les différents plans, etc., comme si l'on voyait la réalité. Tantôt on exécute les deux photographies l'une après l'autre, en changeant la position de l'appareil, tantôt, par exemple pour les portraits, on emploie deux appareils fonctionnant simultanément, et dont les axes doivent être d'autant plus écartés que les objets sont plus éloignés. L'écart doit être tel que l'angle des axes des chambres noires soit égal à celui que forment les axes des yeux, quand on regarde un point placé à la distance où les images paraissent superposées. Du reste, l'écart des deux appareils peut varier notablement, sans que les deux images obtenues cessent de produire l'illusion dans le stéréoscope; seulement, le relief paraît d'autant plus prononcé que l'écart a été plus grand. Pour les vues, paysages, montagnes, on écarte beaucoup les deux appareils, et alors les reliefs se distinguent beaucoup mieux sur le dessin stéréoscopique que sur la nature même.

Ainsi aidé du secours de la photographie, le stéréoscope reçoit de nombreuses applications. Les portraits stéréoscopiques sont devenus populaires en certains pays; on a publié des ouvrages de géologie, de minéralogie, avec figures stéréoscopiques. Un stéréoscope, en forme de double lorgnette de spectacle, inventé par M. Duboscq, est joint à chaque exemplaire. On peut voir les taches solaires en creux en en prenant deux photographies à quelques heures d'intervalle. Au moyen du stéréoscope, on voit en relief, les petits objets d'histoire naturelle photographiés sous deux points de vue. On emploie, dans ce cas, le stéréoscope à réflexion totale (fig. 1935) dû à Brewster et construit par M. Duboscq. Les rayons, partis des dessins d , d' , se réfléchissent en r , r' dans les deux prismes P , P' , et viennent en o , o' , où sont placés les yeux, de manière que les prolongements de ces rayons se rencontrent en D , où les images se superposent. Des lentilles l , l' servent à grossir ces images; et en faisant varier leur distance aux prismes, on ajuste l'instrument pour chaque vue, d'après la distance du dessin. — La réflexion donnant aux images une position symétrique, on doit placer du côté gauche l'image destinée à l'œil droit, et réciproquement.

Stéréoscope panoramique. — Les deux dessins, devant être placés l'un à côté de l'autre, ne peuvent avoir que de faibles dimensions en largeur. Pour les vues de monuments étendus, M. Duboscq a imaginé différents stéréoscopes panoramiques. Considérons, par exemple, le stéréoscope (fig. 1934) dans lequel

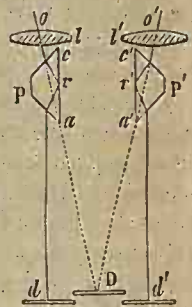


Fig. 1935.

on introduirait les deux dessins perpendiculairement à la ligne des yeux, c'est-à-dire verticalement, le bas de chaque dessin étant tourné vers la gauche. En faisant glisser ces deux dessins, on en verra successivement les différentes parties, mais elles seront couchées; il faudrait donc les tourner de 90° dans leur plan; c'est ce que l'on fait au moyen de deux prismes semblables aux prismes P, P' (fig. 1935) et tournés de manière que les faces ac , $a'c'$ soient inclinées convenablement par rapport au plan oDo' , tout en restant verticales.

La figure 1936 représente une autre disposition: les deux bandes dessinées sont appliquées l'une au-dessus de l'autre derrière un écran. On regarde à travers deux tubes t , t' leur image réfléchié dans deux miroirs plans m , m' , inclinés de manière que les rayons réfléchis passent par les deux tubes, et que les deux images se projettent l'une sur l'autre. Les tubes et le système des miroirs peuvent glisser de manière à permettre d'explorer successivement les différentes parties du dessin.

Phénakisticope stéréoscopique. — Les deux bandes représentant un même sujet dans différentes attitudes successives et se correspondant sur les deux dessins, supposons qu'on les fasse passer rapidement devant les tubes t , t' , et qu'on regarde dans les miroirs m , m' , à travers des ouvertures pratiquées entre ces bandes en nombre égal aux doubles figures; on verra le sujet se mouvoir, en même temps qu'il semblera être à trois dimensions. Au lieu de bandes, on emploie un cylindre de carton, dans l'intérieur duquel sont les miroirs m , m' , et qui porte en dedans la double série de dessins, au milieu de laquelle est pratiquée la rangée de trous. On réunit ainsi les effets du stéréoscope et ceux du phénakisticope.

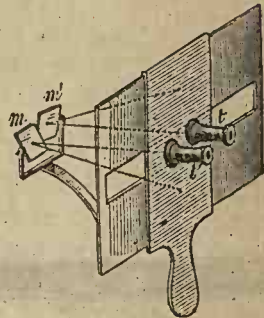


Fig. 1936.

Télestéréoscope. — Quand on regarde des objets éloignés, les images formées dans les deux yeux ne diffèrent pas sensiblement, et il faudrait, pour que la double vision aidât à l'appréciation des reliefs, que les yeux fussent très-écartés l'un de l'autre. M. Helmholtz supplée à cette condition au moyen de deux miroirs obliques, éloignés l'un de l'autre, et renvoyant les rayons partis de l'objet dans deux autres miroirs rapprochés, qui les réfléchissent dans les deux yeux. Cet ensemble forme le *télestéréoscope*; il fait voir en relief les objets éloignés qui, à l'œil nu, paraissent sans relief¹.

L'appareil (fig. 1937) imaginé par M. F. Giraud-Teulon, est construit sur le même principe². R, R' sont deux prismes qui renvoient, par réflexion totale, les rayons partis de deux dessins, sur deux autres prismes r , r' qui les ramènent,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LII, p. 118.

² *Physiologie et pathologie fonctionnelle de la vision binoculaire*, p. 622.

aussi par réflexion totale, dans les yeux *appliqués à un stéréoscope*, dont p, p' sont les deux prismes. Plusieurs personnes, munies d'un semblable appareil, peuvent, à la fois, observer un même double dessin de grandes dimensions. On n'a plus besoin de grossir, ce qui a l'inconvénient de faire ressortir les défauts, et produit cette apparence de plâtre qui est si désagréable avec les doubles dessins photographiques.

2773. Pseudoscope stéréoscopique. — Quand on place à gauche, dans le stéréoscope, le dessin destiné à l'œil droit, et à droite celui qui est destiné à l'œil gauche, les reliefs sont remplacés par des creux et *vice versa*. Par exemple, le tronc de cône (fig. 1930) devient un vase dont on voit l'intérieur. On a ainsi ce que Wheastone appelle une *figure inverse*. Il n'y a pas cependant inversion complète dans tous les cas, les parties qui paraissent les plus éloignées étant, dans la figure inverse, plus grandes que les plus rapprochées, quand elles sont, en effet, plus grandes dans l'image directe.

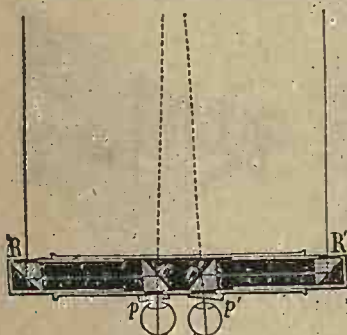


Fig. 1937.

Par exemple, un cube n'est pas remplacé par un bassin cubique, mais par un tronc de pyramide dont la grande base occupe le fond. Le stéréoscope fonctionne alors comme *pseudoscope*.

On peut, sans instrument, obtenir l'effet du pseudoscope stéréoscopique, en louchant de manière que les deux dessins se superposent; on a ainsi la *figure inverse*, parce que, dans les images superposées, le dessin de gauche est vu par l'œil droit, et celui de droite par l'œil gauche, comme on peut s'en assurer en fermant un œil.

Le *pseudoscope* peut donner des inversions d'objets réels, c'est-à-dire faire paraître en creux ce qui est en relief, et en relief ce qui est en creux. Il suffit, pour cela, d'employer le système des prismes PP' de la figure 1935, en les inclinant de manière à rapprocher les points a, a' et à éloigner c, c' . Chaque œil verra l'image, rendue symétrique par la réflexion, de l'objet placé en D ; ces deux images étant superposées, et la partie qui serait vue à droite, à l'œil nu, étant à gauche, et réciproquement, on voit une image *inverse* de l'objet. Avec cet instrument, un globe semble être une coupe hémisphérique; au lieu d'une médaille; d'une statue, on croit voir leur moule. Cependant, comme le sentiment du relief dépend d'autres conditions que du concours des deux yeux, il peut arriver que les images soient directes, puis se transforment subitement, pour changer de nouveau; produisant ainsi des effets d'autant plus étranges que, n'étant pas soumis à la volonté, les renversements se manifestent au moment où l'on s'y attend le moins.

VI. Appréciation des couleurs. — Couleurs accidentelles.

2724. Jugement des couleurs. — Quelle que soit l'hypothèse qu'on adopte pour expliquer les phénomènes lumineux, il est facile de concevoir que des rayons présentant des différences de constitution, agissent différemment sur la rétine et produisent les sensations des diverses couleurs.

Dans le système des ondulations, les différences d'impression proviennent de la rapidité plus ou moins grande des vibrations de l'éther. Les fibrilles de la rétine obéissent à ces vibrations, quelle qu'en soit la rapidité, soit parce qu'elles sont molles, flexibles ou d'une structure spéciale, soit parce qu'elles ont la faculté de s'accommoder à cette rapidité, en même temps que l'œil, à cause de son chromatisme, s'adapte à la couleur des rayons reçus. — D'après Schultz, ce sont les cônes qui président au sentiment des couleurs, et l'on cite, à cet égard, l'expérience par laquelle il a montré qu'un corps rouge paraît noir, quand, le plaçant loin de l'axe de l'œil, on fait en sorte que son image se forme sur le bord de la rétine où il n'y a pas de cônes (2752). Mais les autres corps conservant leur couleur dans le même cas, cette expérience prouverait tout au plus l'importance des cônes pour l'appréciation de la couleur rouge.

T. Young et M. Helmholtz ont supposé que la rétine contiendrait, pour chaque couleur, des fibres spéciales répondant aux vibrations qui caractérisent cette couleur; mais, comme l'impression de toutes les couleurs se produit sur tous les points de la rétine, il faudrait admettre que chacun de ces points contient toutes les espèces de fibres, ce qu'il paraît difficile d'admettre.

Du reste, ce n'est que peu à peu, et après de nombreuses comparaisons que l'enfant finit par discerner les différences d'impression qui caractérisent les diverses couleurs, de manière à s'en souvenir et à les reconnaître par la suite. Ce ne fut qu'après un certain temps que l'aveugle de Cheselden put, à cet égard, compléter l'éducation de son organe visuel.

Quand les deux yeux reçoivent des rayons de couleurs différentes, par l'interposition de verres colorés, les deux impressions se fusionnent, et l'on voit la nuance résultant du mélange des deux couleurs. Cela se voit facilement dans le stéréoscope, au moyen de deux disques de papier de couleur différente. Dove a remarqué que, si les disques sont des verres colorés éclairés par transmission, on ne voit ordinairement qu'une seule couleur. Il y aurait donc une différence entre la manière d'agir de la lumière colorée réfléchie et de celle qui est transmise¹. — Si l'on place dans le stéréoscope un double dessin représentant les arêtes d'un solide, et si les lignes des deux dessins sont de couleur différente sur fond noir, on voit le relief; mais les arêtes, au lieu de présenter la nuance résultant du mélange des deux couleurs, se montrent formées de deux lignes contiguës présentant chacune la couleur du dessin qui se trouve du côté opposé.

¹ *Bibli. univ. de Genève (Arch. des Sc.), t. XV, p. 219, et t. XVI, p. 209.*

En même temps, les faces du solide, au lieu d'être noires, sont comme glacées, et d'une teinte résultant du mélange des deux couleurs des arêtes. Par exemple, en mettant un verre bleu foncé devant un œil et un verre rouge devant l'autre, les deux dessins étant en traits blancs sur fond noir, les faces sont illuminées d'une lumière violette. Si l'un des dessins est en lignes noires sur fond blanc, les arêtes sont formées d'un trait blanc contigu à un trait noir, et les faces présentent l'aspect de la plombagine. Dove attribue ces effets singuliers au chromatisme des yeux, qui tendent à se mettre dans un état différent pour voir chacune des couleurs (2743).

2775. Achromatopsie ou Daltonisme. — Certaines personnes ne peuvent distinguer les couleurs, dont la plupart leur paraissent grises, brunes ou jaunes. Tantôt cette inaptitude s'étend à toutes les couleurs, excepté peut-être au jaune; tantôt elle n'est relative qu'à quelques-unes seulement; tantôt, enfin, il n'y a que les nuances différant peu qui sont confondues. Les annales de l'Académie des sciences font mention de toute une famille qui ne distinguait pas le rouge du vert; pour elle, les fleurs du grenadier, les fruits du cerisier ne différaient des feuilles que par la forme. Dalton était dans ce cas, d'où le nom de *daltonisme* donné souvent à l'*achromatopsie*. Herschel cite un individu qui voyait jaunes ou bleus tous les corps colorés. M. Seebeck jeune et d'Hombres Firmas² ont fait beaucoup d'observations sur ce défaut de la vue, qui peut être inné et souvent héréditaire; plus récemment, M. A. Favre, de Lyon, et M. Férès ont prouvé qu'il est assez commun pour qu'il soit urgent de s'en préoccuper dans le choix des employés des chemins de fer et de la marine, qui ont à observer des signaux formés de disques ou de feux de différentes couleurs, particulièrement blanches, rouges et vertes. Ils ont trouvé, le premier sur des employés de chemins de fer, le second sur des marins en grand nombre, environ 6 pour 100 de daltoniens, nombre auquel G. Wilson était aussi arrivé de son côté. On peut donc penser que plus d'un accident, plus d'un abordage en mer ont pu être occasionnés par des signaux mal compris, parce que les couleurs n'en étaient pas perçues normalement; et il est nécessaire, comme on l'a fait du reste déjà en divers pays, de soumettre les employés qui ont à observer des signaux, à un examen attentif des qualités de leur vue, et de renouveler cet examen de temps en temps, le défaut pouvant se développer accidentellement, surtout chez ceux qui ont fréquemment à regarder la nuit. On pourrait enfin, comme on l'a proposé, faire varier les signaux en modifiant le nombre et la disposition des feux, plutôt qu'en en changeant les couleurs. Dans l'hypothèse d'Young et de M. Helmholtz, l'achromatopsie serait due à l'absence partielle ou complète de sensibilité des fibres qui correspondent aux couleurs non perçues. Mais on pourrait tout aussi bien admettre que les fibres, qui dans l'état normal répondent aux vibrations de toutes les rapidités, ne peuvent plus obéir à certaines d'entre elles, par suite de l'altération même qui constitue le daltonisme.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XXIX, p. 175, et t. XXX, pp. 58 et 376.

2776. Couleurs accidentelles. — On nomme ainsi des apparences visuelles qui succèdent à la contemplation d'objets vivement éclairés.

1^o Si l'on regarde pendant quelque temps un corps coloré, vivement éclairé et placé sur un fond noir, ce corps paraît perdre peu à peu de son éclat, et si l'on porte ensuite rapidement les yeux sur une surface blanche, on aperçoit une tache de même forme que l'objet et de couleur complémentaire. Par exemple, si, comme l'a fait Scherffer en 1785, on peint un portrait de couleur verdâtre, avec les cheveux blancs, les prunelles blanches et les dents noires, on le voit avec les couleurs normales quand, après l'avoir longtemps contemplé, on porte ses regards sur un fond blanc. — 2^o Si, au lieu de regarder une surface blanche, on ferme les yeux, en ayant soin de couvrir les paupières, on voit les couleurs accidentelles se manifester, disparaître, puis reparaitre plusieurs fois de suite. Si l'on a regardé un objet blanc sur un fond noir, on voit l'objet noir sur fond blanc. Par exemple, une croisée recevant un jour vif donne les barreaux blancs et les carreaux noirs. — 3^o Si la surface sur laquelle on porte la vue n'est pas blanche, mais colorée, on aperçoit la nuance qui résulterait du mélange de la couleur de la surface avec la couleur complémentaire de l'objet qu'on a regardé d'abord. Les couleurs accidentelles se combinent donc avec les couleurs naturelles, comme ces dernières entre elles.

Deux couleurs accidentelles différentes se combinent aussi suivant les mêmes lois, comme le prouve l'expérience suivante de Scherffer : On place l'un à côté de l'autre, sur un fond noir, deux carrés égaux de papier, présentant des couleurs différentes : par exemple, l'un est *bleu*, l'autre *orangé*. On regarde alternativement une quarantaine de fois, et pendant environ deux secondes, un point noir marqué au milieu de chaque carré. On porte ensuite les yeux sur un fond blanc, et l'on voit trois carrés, dont les extrêmes présentent la couleur complémentaire du carré qui était du même côté, tandis que la nuance de celui du milieu est le résultat du mélange des couleurs des deux autres. Pour expliquer ce résultat, soient B et O les deux carrés (*fig. 1938*) ; quand on regarde B, son image se fait en *b* sur l'axe Be de l'œil, et celle du carré O se fait en *o*. Si ensuite l'œil tourne autour du point *c* pour regarder le carré O, suivant *b'O*, le point *b* de la rétine vient en *b'*, et le point *o* en *o'*. L'image de O se fait alors en *b'*, où se trouvait l'image de B dans la première position de l'œil, et l'image de B se fait maintenant en *b''*. Il y a donc trois points de la rétine impressionnés, et celui du milieu l'est par deux impressions successives superposées. — Si les deux carrés ont des couleurs complémentaires, celui du milieu disparaît ; mais, si l'on fait l'expérience en se couvrant les yeux, on voit les trois carrés, et celui

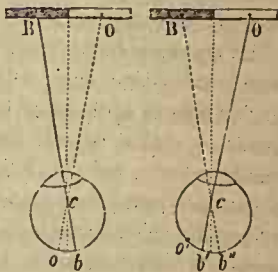


Fig. 1938.

du milieu est *noir*. Ainsi, le mélange des deux couleurs accidentelles complémentaires forme du *noir*, et non du *blanc* comme avec les couleurs naturelles.

2777. Théorie des couleurs accidentelles. — Les couleurs accidentelles paraissent avoir été, pour la première fois, observées scientifiquement par Peïrese, vers le milieu du dix-septième siècle. Étudiées ensuite par Jurin, Newton... elles ont suggéré de nombreuses hypothèses destinées à les expliquer. Dans celle du P. Scherffer, longtemps adoptée avec quelques modifications, on suppose que la rétine, après avoir éprouvé l'action prolongée des rayons d'une certaine couleur, a perdu de sa sensibilité pour cette couleur, de sorte que, si l'on regarde un fond blanc, elle perçoit la couleur que produit le blanc dépourvu de ces sortes de rayons, c'est-à-dire la couleur complémentaire. Mais les apparences accidentelles se montrent dans l'obscurité *la plus complète*, et, quand on regarde une surface de couleur *simple* différente de celle qu'on a d'abord regardée, cette couleur paraît toujours modifiée. Les apparences sont donc *subjectives*, c'est-à-dire engendrées dans l'œil même, indépendamment de toute action extérieure.

M. Plateau a donné une nouvelle théorie des mêmes phénomènes¹. Il commence par établir que : 1° l'impression directe produite dans l'œil persiste quelque temps après qu'on l'a fermé. Cette persistance se constate facilement quand on n'a pas regardé trop longtemps l'objet; elle est d'autant plus courte que la rétine a été plus fatiguée par une contemplation prolongée, et alors la persistance peut passer inaperçue, l'apparence accidentelle se manifestant presque aussitôt qu'on ferme les yeux. — 2° L'apparence accidentelle est de nature opposée à l'impression directe. Ainsi, quand on regarde un corps blanc, l'apparence qui en remplace l'image est noire, et *vice versa*; quand deux couleurs réelles produisent du blanc par leur réunion, les couleurs accidentelles complémentaires qui les remplacent produisent du *noir*, qui est l'opposé du blanc; une couleur est remplacée par sa complémentaire, et l'on peut dire qu'il y a *opposition* entre elles, puisqu'elles se neutralisent en donnant du blanc.

Cela posé, quand la rétine a été impressionnée par la lumière, elle ne revient pas brusquement à l'état de repos, puisqu'il y a persistance de l'impression; et l'on peut concevoir qu'elle y revienne de deux manières : soit graduellement, l'impression s'effaçant peu à peu; soit par des espèces d'oscillations, d'où résulterait la succession alternative d'impressions opposées de moins en moins intenses, comme dans un pendule, qui ne s'arrête qu'après un certain nombre d'oscillations. Cette seconde manière de voir explique la plupart des faits. Ainsi, la rétine, d'abord impressionnée directement, devient de moins en moins sensible à la même impression, ce qui fait que l'éclat d'un objet que l'on regarde pendant longtemps paraît s'affaiblir; puis, quand la rétine est soustraite brusquement à cette impression, elle réagit et se met dans l'état opposé, d'autant plus rapidement que l'impression a duré plus longtemps. De là les alternatives remarquées

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

par différents observateurs, dans lesquelles l'image accidentelle disparaît et reparait plusieurs fois de suite. M. Plateau a même pu voir l'image *directe* alterner jusqu'à neuf fois avec l'image accidentelle. Pour obtenir ce résultat, on regarde avec un seul œil, à travers un tube noirci et pendant une minute au moins, une partie d'un papier rouge bien éclairé, on enlève le tube, et l'on regarde une surface blanche; on voit d'abord une image verte, bientôt remplacée par une tache rouge faible et de peu de durée, à laquelle succède une image verte, et ainsi de suite. En fermant l'œil sans retirer le tube, on voit aussi cette succession de couleurs, mais d'une manière un peu moins distincte.

La théorie de M. Plateau rend bien compte des principales apparences accidentelles; mais il en est d'autres, observées par MM. Feschner, Brücke¹, J.-M. Seguin², qui s'expliquent moins facilement. Par exemple, quand on a regardé un disque coloré sur un fond noir, l'image subjective est plus obscure que l'espace qui l'environne; il faut donc tenir compte de la fatigue de la rétine. Si l'on regarde un rond blanc sur fond noir éclairé par le soleil, l'image subjective d'abord verte, passe au bleu, au violet, puis au rouge foncé. M. Seguin a remarqué des zones colorées et concentriques, qui se resserrent peu à peu en s'avancant vers le centre avant de disparaître. Il a aussi constaté que l'image complémentaire peut se former pendant la contemplation, sur la surface même de l'objet, et persister quand on ferme les yeux. — Ces images subjectives dépendent de l'éclat de l'objet, de la durée de la contemplation, et probablement aussi des yeux de celui qui expérimente. Ajoutons que ces sortes d'expériences ne sont pas sans danger, comme ne l'atteste que trop la cécité dont ont été frappés MM. Plateau et Feschner, à la suite de longues recherches sur la vision. — Du reste, l'étude des images subjectives est du ressort de la physiologie plutôt que de la physique.

2778. Auréoles accidentelles. — Ces sortes de couleurs accidentelles, étudiées avec détail par Buffon, diffèrent de celles dont nous venons de parler, en ce qu'elles se manifestent pendant qu'on regarde le corps qui les fait naître. Supposons qu'on regarde fixement un disque coloré appliqué sur un fond blanc, au bout de quelque temps, on voit apparaître autour du disque, une auréole faible ayant une couleur complémentaire. Si le disque est blanc sur un fond coloré, il présente à son tour la couleur complémentaire du fond. C'est à un phénomène analogue qu'il faut rapporter les couleurs que présentent les ombres dans certaines circonstances. Léonard de Vinci avait remarqué que les ombres au soleil couchant, dont les rayons sont plus ou moins rougeâtres, paraissent bleues. Buffon, qui a constaté le même fait, observe souvent que les ombres portées sur un mur blanc étaient azurées, le soleil couchant étant jaune. Une fois, les ombres furent d'un vert bleuâtre, mais le soleil était alors coloré en rouge-orangé.

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), t. XIX, p. 122.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XLI, p. 413.

Prieur, de la Côte-d'Or, avait voulu attribuer ces phénomènes à des effets de contraste; mais les auréoles se manifestent quand le corps coloré est posé sur un fond noir. M. Plateau a étendu aux auréoles l'ingénieuse théorie qui lui a servi à expliquer les couleurs accidentelles. Quand on regarde un objet vivement éclairé, l'impression produite sur la rétine dépasse les limites de l'image, ce qui forme l'irradiation (2756), qui s'affaiblit à mesure qu'on s'éloigne du bord de l'image géométrique, et devient nulle à une certaine distance. Au-delà, les points de la rétine se constituent dans un état opposé, de même que dans une plaqué vibrante les mouvements sont en sens contraire de part et d'autre d'une ligne de repos. Ce principe est, pour l'espace, ce qu'est pour le temps celui qui sert à expliquer les couleurs accidentelles successives. Du reste, M. Plateau a observé des alternatives qui viennent confirmer cette explication; il a vu l'auréole, bordée d'une auréole secondaire de la même couleur que le corps. Par exemple, quand on place une bande de carton blanc sur un papier rouge translucide éclairé par derrière, la bande paraît verte, et si elle est assez large, elle paraît rougeâtre au milieu.

2779. Contraste simultané des couleurs. — Il résulte de la formation des auréoles accidentelles, que deux teintes ou deux couleurs voisines s'influencent mutuellement et ne produisent pas le même effet que lorsqu'elles sont éloignées l'une de l'autre. Par exemple, si l'on juxtapose des bandes couvertes chacune d'une teinte uniforme à l'encre de Chine, mais de plus en plus foncée, en passant de l'une à l'autre, chaque bande paraît plus foncée du côté de la bande plus claire contiguë, et plus claire du côté de la bande plus foncée. — Si l'on juxtapose deux bandes de couleur différente, et qu'on place à une certaine distance des bandes de même couleur pour servir de terme de comparaison, on reconnaît que la couleur de chacune des bandes contiguës est modifiée par le voisinage de l'autre. Par exemple, si les bandes sont rouge et jaune, la première prend du violet et la seconde un peu de vert. M. Chevreul a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences, qu'il a rassemblées dans un ouvrage spécial¹, où il fait connaître le parti que peuvent tirer une foule d'industries, des lois du contraste simultané. Voici quels sont les principaux résultats qu'il a déduits de ses expériences : 1^o quand deux couleurs sont juxtaposées, la nuance de chacune d'elles est modifiée par le mélange avec la couleur complémentaire de l'autre; 2^o si les couleurs contiguës sont complémentaires, chacune d'elles paraît plus vive et plus pure, car elle est mêlée de la couleur complémentaire de l'autre, qui est sa propre nuance; 3^o si l'une des couleurs est remplacée par du blanc ou du noir, l'autre est entourée d'une auréole de sa couleur complémentaire, et paraît plus vive; 4^o ces effets se produisent, mais d'une manière moins prononcée, quand les couleurs ne sont pas contiguës.

M. Chevreul résume en un seul énoncé la loi du contraste simultané des couleurs : « Dans le cas où l'œil voit en même temps deux couleurs contiguës,

¹ De la loi du contraste simultané des couleurs, etc.; Paris, 1839.

il les voit les plus dissemblables possible, quant à leur composition optique et quant à la hauteur de leur ton. » Le contraste peut donc porter à la fois sur la nuance et sur le ton.

Explication de quelques phénomènes. — C'est par le contraste simultané que M. Chevreul explique les ombres colorées, particulièrement les ombres bleues données par les rayons orangés du soleil rapproché de l'horizon, et qu'on avait d'abord attribuées aux rayons réfléchis par l'azur du ciel, tombant sur ces ombres (2778). Mais dans une chambre qui ne reçoit la lumière que par une fenêtre, la teinte bleue des ombres se manifeste encore. En outre, M. Poey, qui a fait, à la Havane, un grand nombre d'observations sur les ombres colorées, a constaté qu'elles sont plus marquées quand le ciel est voilé par des nuages.

Corps noirs. — Une bande noire présente la couleur complémentaire de la surface colorée sur laquelle elle est posée. M. Chevreul a montré que, dans ce cas, l'effet de contraste tient à ce que les corps noirs réfléchissent toujours un peu de lumière blanche. Il distingue, à cet égard, le noir matériel du noir absolu, qu'il obtient en perçant un trou dans un écran et appuyant par derrière, la base d'un cône creux noirci en dedans. L'ouverture ne renvoie aucune lumière, et la tache noire qu'elle forme ne donne pas de couleurs par contraste simultané, tandis qu'un disque noir peut paraître rouge quand on l'applique sur un fond vert-émeraude.

En partant de là, M. Chevreul a trouvé l'explication du fait suivant¹: Henri IV racontait que, quelques jours avant les massacres de la Saint-Barthélemy, il jouait avec le duc de Guise et le duc d'Alençon, lorsqu'ils virent tout à coup des taches de sang sur les dés, ce qui les épouvanta et leur fit quitter le jeu. Ils étaient exposés au soleil, près d'une fenêtre du Louvre; or, l'expérience montre que les yeux frappés par le soleil, même à travers les paupières, voient les corps blancs sous une teinte vert-émeraude. Les points noirs des dés d'ivoire devaient donc présenter la couleur rouge, complémentaire du vert. — C'est ce qui a lieu également quand, les yeux étant exposés aux rayons solaires, on lit une page placée à l'ombre; les lettres paraissent rouges.

§ 2. — VISION AIDÉE DES INSTRUMENTS GROSSISSANTS

I. Microscopes.

2780. Des instruments grossissants. — Jusqu'à la fin du seizième siècle, l'organe visuel était resté à peu près abandonné à ses seules ressources. Depuis, l'optique lui a fourni des instruments admirables, qui en ont considérablement étendu la puissance. Les uns, en faisant distinguer les objets les plus petits, ont permis d'étudier la structure intime des corps, ont fait découvrir

¹ Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. LXXXIV, p. 895.

une multitude d'êtres vivants dont on ne soupçonnait pas même l'existence, et en donnant le moyen de pénétrer les détails élémentaires des organismes, ont fourni aux sciences naturelles leur plus précieux moyen d'investigation. Les autres, en accroissant énormément la portée de la vue, font distinguer au loin des objets invisibles à l'œil nu, et, tournés vers le ciel, ont permis aux astronomes de lever un coin du voile qui leur cachait les secrets de l'espace. Nous allons d'abord nous occuper des instruments de la première catégorie.

2781. LOUPE OU MICROSCOPE SIMPLE. — Les microscopes sont destinés à faire distinguer des objets dont le diamètre apparent, quand ils sont placés à la distance de la vision distincte, est tellement petit qu'on ne peut en discerner les détails. Il en existe de deux sortes : les *microscopes simples* ou *loupes*, et les *microscopes composés*.

La *loupe* consiste simplement en une lentille convergente à court foyer, destinée à faire voir les objets sous un diamètre angulaire beaucoup plus grand

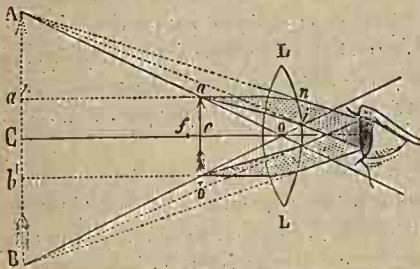


Fig. 1939.

qu'à l'œil nu. Pour obtenir ce résultat, il faut que l'objet soit placé entre la lentille et son foyer principal, et très-près de ce dernier. Soit *ab* (fig. 1939) un très-petit objet ; il faudrait, pour le voir sous un diamètre apparent suffisant, l'approcher très-près de l'œil ; mais alors la vision serait confuse (2745).

On pourrait éviter cet inconvénient en interposant un écran

percé d'un très-petit trou, de manière que chaque point lumineux envoyât sur la rétine un pinceau très-délié, comme dans la chambre noire simple ; mais alors l'image aurait un éclat trop faible. Il faudrait donc, tout en conservant aux faisceaux une grande section, et plaçant l'objet très-près de l'œil, donner aux rayons venant de chaque point et entrant par la pupille le même degré de divergence que s'ils partaient de la distance de la vision distincte. C'est ce qu'on obtient en interposant entre l'œil et l'objet une lentille convergente dont le foyer *f* soit un peu au-delà de l'objet. C'est précisément ce que font les presbytes, et nous sommes tous presbytes pour les objets très-rapprochés. Dans ces conditions, le foyer des rayons partant de chaque point de l'objet est virtuel et situé plus loin de la lentille, du même côté (2525). Il en résulte qu'il se forme quelque part en *AB* une image droite et virtuelle de l'objet *ab*, que l'on peut construire par la méthode connue (2532), après avoir joint les extrémités *a* et *b* de l'objet au centre optique *o* de la lentille. Les rayons qui la traversent, en sortent avec le même degré de divergence que s'ils partaient des divers points de l'image virtuelle *AB* ; et, si sa distance à l'œil est convenable, cette image virtuelle sera vue comme si elle était un objet réel.

Il est facile de construire le faisceau qui, partant d'un point a de l'objet ab , fait voir l'image A de ce point : on joint le point A au contour de la pupille, ce qui donne un pinceau conique, qui rencontre en ni la face d'émergence de la lentille. Joignant ensuite les points n et i au point a , et négligeant l'épaisseur de la lentille, on obtient les limites du faisceau incident ani , qui entre dans l'œil et fait voir l'image virtuelle A . Ce faisceau est ombré dans la figure, ainsi que celui qui fait voir l'image B du point b .

La distance de l'objet à la loupe, quand elle a un court foyer, doit, pour que l'image soit nette, être renfermée entre des limites très-rapprochées, ce qui avait fait supposer que l'œil n'aurait plus sa faculté d'accommodation en regardant à travers une loupe; mais cette hypothèse est inutile, l'effet s'expliquant facilement. Si, en effet, on éloigne un peu l'objet, il dépasse bientôt le foyer principal, dont il est très-près, et il ne se forme plus d'image virtuelle. Si l'objet se rapproche de la loupe, l'image virtuelle s'en rapproche aussi et très-rapidement (2526), et oC devient moindre que la distance de la vision distincte. On pourra cependant voir encore nettement en éloignant l'œil de la lentille.

2782. Calcul du grossissement. — Le grossissement de la loupe est le rapport entre les diamètres apparents de l'image AB et de l'objet placé à la même distance de l'œil. Si l'on désigne par D la distance de AB à l'œil, distance égale à celle de la vision distincte, ces angles auront pour mesure $AB : D$ et $a'b' : D$, en considérant AB et $a'b'$ comme se confondant avec des arcs ayant D pour rayon. Le grossissement sera donc $G = \frac{AB}{ab} = \frac{Co}{co} = \frac{D - \delta}{co}$, en appelant δ la distance du point o à l'œil. Quant à la distance co , elle est donnée par la formule des lentilles, qui est ici $\frac{1}{co} - \frac{1}{D - \delta} = \frac{1}{f}$; d'où $\frac{1}{co} = \frac{D - \delta + f}{f(D - \delta)}$. Substituant dans la valeur de G , elle devient

$$G = \frac{D - \delta}{co} = \frac{D - \delta}{f} + 1.$$

On voit que le grossissement est d'autant plus grand que le foyer f de la lentille est plus court. Les fortes loupes devront donc être très-petites, pour n'avoir qu'une petite ouverture et être dépourvues d'aberration de sphéricité (2536). Le grossissement augmente aussi avec la distance D de la vision distincte, et diminue quand l'œil s'éloigne de la loupe. Si l'on suppose nulle la distance δ , ce grossissement devient $G = \frac{D}{f} + 1$; et, si l'on néglige la différence, très-petite entre co et f , il vient $G = \frac{D}{f}$, formule approchée souvent citée. — Quand on a le grossissement en diamètre, on en déduit le grossissement en surface, en en prenant le carré.

2783. Différentes espèces de loupes. — On a adopté, dans la construction

des microscopes simples, différentes dispositions destinées à corriger l'aberration de sphéricité, ou à les approprier à divers usages.

On diminue l'aberration en arrêtant les rayons tombant près du bord de la loupe, au moyen d'un diaphragme; mais ce diaphragme diminue le champ de la loupe, c'est-à-dire l'espace angulaire dans lequel doivent être compris les objets pour être aperçus.

Loupes périscopiques. — Pour augmenter le champ, Wollaston partage la lentille en deux, comme on le voit en A et B (fig. 1940), et il introduit le diaphragme entre les deux moitiés. De cette façon, il ne passe que des rayons voisins du centre optique, et cependant le champ reste considérable.

Microscope Coddington. — Il se perd de la lumière par réflexion à la face plane de chaque partie de la lentille; c'est pourquoi Brewster la fait d'une seule pièce, et remplace le diaphragme par le contour même de la lentille, dans l'épaisseur de laquelle est creusée une gorge *ac* (fig. 1940), dont le fond *a*, *c*, limite les faisceaux transmis; on a ainsi la loupe dite *Coddington*.

Doublets. — Dans les doublets, on associe deux lentilles, qui produisent le

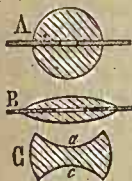


Fig. 1940.



Fig. 1941.



Fig. 1942.



Fig. 1943.

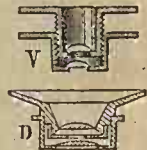


Fig. 1944.

même effet qu'une seule, mais avec moins d'aberration de sphéricité (2536). V (fig. 1944) est le *doublet de Wollaston*. Les deux lentilles sont plan-convexes, et leur surface plane est tournée du côté de l'objet; on peut les rapprocher plus ou moins l'une de l'autre, au moyen d'un pas-de-vis, de manière à faire disparaître toute aberration. Malheureusement, le foyer est tellement court qu'on ne peut graver ou disséquer sous ce microscope. Dans le *doublet de Ch. Chevalier*, D (fig. 1944), le foyer est plus long, les lentilles sont fixes, et elles sont séparées par un diaphragme.

Microscope de Raspail. — Cet instrument consiste en une loupe à court foyer *o* (fig. 1942) portée par un support qui peut s'allonger au moyen d'un pignon denté *b* et d'une crémaillère. L'objet se met sur une lame de verre posée sur une plaque de cuivre percée, *p*, nommée *porte-objet*. Comme l'image est d'autant plus faible qu'elle est plus grossie, la même quantité de lumière s'y trouvant répartie dans un espace d'autant plus grand, il faut que l'objet soit vivement éclairé. Pour cela, on concentre sur lui la lumière des nues ou d'une lampe, au moyen d'un miroir concave articulé *m*.

Microscope à main. — L'objet est fixé dans une pince *p* (fig. 1943) articulée

en *o*. Un petit miroir concave, *m*, percé au milieu, où est la lentille, et qu'on tourne du côté du jour, réfléchit la lumière sur l'objet.

Microscope Stanhope. — Imaginons un cylindre de verre terminé d'un côté par une base plane *p*, et de l'autre par une surface sphérique convexe, *c* (fig. 1941). Un petit objet collé sur la base plane sera dans les mêmes conditions que s'il se trouvait dans l'intérieur de la masse de verre; si donc on regarde par la surface convexe, on le verra grossi et droit, comme nous l'avons expliqué (2519). Il faut seulement que la longueur *cp* soit un peu moindre que la distance à laquelle se fait le foyer des rayons parallèles entrant par la surface sphérique. — Cet instrument peut grossir jusqu'à 80 fois, tout en conservant l'image claire et nette, et avec un champ plus grand que celui des autres microscopes simples. — Nous avons cité les applications qu'on en a faites en collant sur la base plane du cylindre, les photographies microscopiques inventées par M. Dagron (2675).

On a fait avec des pierres précieuses, des loupes ayant un grand pouvoir réfringent, de manière à donner de forts grossissements avec des courbures peu prononcées, et, par conséquent, avec peu d'aberration de sphéricité. — On se procure économiquement de fortes loupes en fondant au chalumeau l'extrémité d'un fil de verre; la matière s'amasse en une petite sphère, qu'il n'y a plus qu'à enchâsser dans un diaphragme. On peut encore fondre un éclat de verre dans un petit trou d'une plaque métallique. Au verre, on peut substituer une goutte d'eau, d'huile, ou mieux de baume de Canada, qui est très-réfringent.

2784. Historique. — La loupe paraît avoir été connue des anciens. Sénèque dit formellement que « des lettres, quelque petites qu'elles soient, paraissent plus grandes et plus distinctes quand on les regarde à travers une boule de verre remplie d'eau. » Cela nous explique comment ont pu être gravées les pierres fines qui nous viennent de l'antiquité. Les anciens paraissent avoir aussi connu les lentilles proprement dites. Nous avons cité un passage d'Aristophane, où il est question d'un verre ardent (II, 873), et mentionné une lentille de verre découverte dans un tombeau romain (2541). Ajoutons que Brewster a présenté à l'Association britannique, en 1852, une lentille de cristal de roche, trouvée dans des fouilles faites à Ninive. Il est assez difficile d'admettre que, connaissant les lentilles, on n'ait pas remarqué leur propriété de grossir. Cependant, Alhazen et Bacon ne parlent que du grossissement produit par un segment sphérique de verre posé sur l'écriture. Ce qui est certain, c'est que l'idée d'appliquer la loupe à l'étude de l'histoire naturelle ne s'est présentée que très-tard. Les premières observations à la loupe, publiées par F. Stellutin, sur les organes des abeilles, ne datent que de 1625. Cependant, Fontana prétend avoir fait usage, le premier, du même instrument, dès 1618. C'est avec de simples loupes, qu'il fabriquait lui-même, que Leuwenhoek a fait ses belles découvertes. Hartsoecker se servait de globules fondus au bout d'un fil de verre, dont il avait remarqué par hasard les propriétés optiques.

2785. Images réelles des lentilles convergentes. — Quand un objet ac (fig. 1945) est placé au-delà du foyer principal d'une lentille convergente, il forme, du côté opposé de cette lentille, une image réelle renversée $c'a'$. En chaque point de cette image se croisent les rayons partis du point correspondant



Fig. 1945.

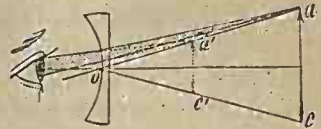


Fig. 1946.

de l'objet, de manière que si l'œil est placé en ee au-delà de l'image $c'a'$, à une distance égale à celle de la vision distincte, il verra l'image aérienne $c'a'$ comme si elle était un objet lumineux, chacun de ses points envoyant des rayons divergents dans l'œil. On a ombré dans la figure le pinceau lumineux qui, partant du point c , fait voir l'image réelle c' .

2786. Objets vus à travers les lentilles divergentes. — Les lentilles divergentes donnent toujours des images virtuelles *plus petites* que l'objet; par conséquent, elles rapetissent au lieu de grossir. Dans la figure 1946, on a ombré le faisceau lumineux qui, partant du point a de l'objet ac , entre dans l'œil et fait voir l'image a' de ce point; la lentille se comporte ici comme le verre des myopes.

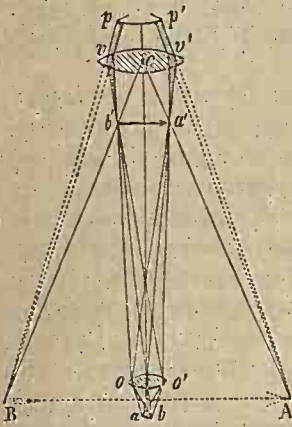


Fig. 1947.

2787. II. MICROSCOPE COMPOSÉ. — Dans le microscope composé, il y a deux lentilles ou systèmes de lentilles fonctionnant à part. La première oo' (fig. 1947), nommée *objectif*, est tournée vers l'objet à observer ab . Cet objet est placé au-delà et très-près du foyer principal de l'objectif, qui en donne une image réelle, renversée et agrandie $a'b'$, comprise dans l'angle des axes optiques ad' , bb' , menés par le centre optique de l'objectif. La seconde lentille, nommée *oculaire*, joue le rôle d'une loupe servant à voir l'image aérienne $a'b'$, image

qui doit être placée entre l'oculaire et son foyer principal.

Soit AB l'image virtuelle ainsi obtenue, il est facile de construire le faisceau lumineux qui, partant d'un point de l'objet, entre dans l'œil. Considérons, par exemple, le point a ; nous construirons le cône Ap' , qui a son sommet au point A et entre dans la pupille pp' ; nous joindrons au point a' l'intersection v' de ce cône avec l'oculaire; prolongeant ensuite le pinceau $v'a'$ jusqu'à sa rencontre

avec l'objectif oo' , puis joignant l'intersection oo' au point a , nous obtiendrons le faisceau aoa' , $oo'a'$, $a'v'p'$, qui entre en p' dans la pupille et fait voir l'image virtuelle A du point a . On a construit de même, sur la figure, le faisceau qui correspond au point b . — Si le faisceau $a'oo'$ prolongé ne rencontrait pas l'objectif, on en conclurait que le point a est en dehors du champ de l'instrument.

L'objet étant très-près du foyer de l'objectif, les moindres déplacements déterminent de grandes variations dans la position de l'image réelle $a'b'$ (2526); l'ajustement de l'instrument demande donc du soin. On met au point, en faisant varier la distance de l'objet. Pour les vues longues, il faut éloigner l'objectif de l'objet pour que l'image réelle $a'b'$, allant se faire plus près du foyer de l'oculaire, l'image virtuelle BA se forme plus loin. Les myopes devront faire l'inverse.

2788. Champ. — Pour éviter l'aberration de sphéricité des rayons tombant trop obliquement sur l'oculaire, on limite l'image réelle, au moyen d'un diaphragme placé en $b'a'$, et les points qui seront leur image en dehors de l'ouverture de ce diaphragme, ne pourront être vus à travers l'oculaire. Or, les points qui font leur image dans l'intérieur du diaphragme, sont contenus dans un cône dont le sommet est au centre optique de l'objectif, et qui a pour base l'ouverture du diaphragme. La surface de ce cône, prolongée au-delà de l'objectif, limite donc sur le porte-objet l'espace dans lequel sont renfermés les points qui peuvent être vus, espace qui constitue le *champ* de l'instrument; et l'on voit qu'il est égal au rapport entre l'ouverture $a'b'$ et la distance de $a'b'$ au centre optique de oo' . Comme un cône ayant son sommet au centre optique de l'objectif et enveloppant le contour de l'oculaire, diffère peu de celui qui a pour base l'ouverture du diaphragme, on dit ordinairement que le *champ* est limité par le cône qui s'appuie sur le contour de l'oculaire. Du reste, il est facile de voir que, sans le diaphragme, le champ ainsi défini ne serait pas sensiblement plus grand, car les rayons qui partent des divers points de l'image réelle $a'b'$ ne divergent pas dans tous les sens comme s'il s'agissait de points lumineux, mais ils forment des pinceaux coniques très-étroits autour de leurs axes secondaires par rapport à l'objectif. On voit qu'il faudra que l'oculaire soit assez large, pour avoir un champ suffisant; aussi, cette lentille est-elle toujours plus grande que l'objectif.

Pour augmenter le champ, Huyghens a composé l'oculaire de deux lentilles e et e' (fig. 1948); l'une, e' , se nomme *verre de l'œil*; l'autre, e , nommée *verre de champ*, ou *collecteur*, a pour effet de rapprocher les faisceaux qui émergent de l'objectif, ce qui rend l'image uv plus petite, il est vrai, mais en même temps plus nette et plus brillante. Le champ est alors aob , ou son opposé par le sommet; tandis qu'il ne serait que uov si l'objectif donnait directement l'image uv . — L'oculaire à deux verres est souvent désigné sous le nom d'*oculaire de Campani*. Nous allons voir (2790) quel rôle important, découvert par Boscovitch, joue le verre de champ dans l'achromatisme du microscope.

Point oculaire. — Les pinceaux lumineux qui partent des points a et b ayant pour axes, en arrivant à la lentille e' , les droites $e'B$, $e'A$, émergent de cette lentille en convergeant. Il faudra donc, si l'on veut embrasser tout le champ,

que l'œil soit placé au point où ils se croisent, point qui se nomme *point oculaire* ou *cerce de Ramsden*.

2789. Grossissement. — Pour obtenir le grossissement, il faut évidemment multiplier celui de l'objectif par celui de l'oculaire. Nous savons comment on obtient ce dernier, l'oculaire se comportant comme une simple loupe (2782). Pour obtenir le grossissement de l'objectif, on regarde, au microscope, un micromètre tracé sur verre en centièmes de millimètre, et l'on compte le nombre N de divisions visibles dans l'ouverture du diaphragme. On mesure ensuite le diamètre de cette ouverture au moyen du même micromètre, et l'on a le grossissement de l'objectif en divisant par N le nombre de divisions comprises dans ce diamètre. L'oculaire ne change rien au résultat, car sa présence affecte de la même manière l'image réelle et le diamètre du diaphragme. Nous verrons plus loin des moyens pratiques de mesurer le grossissement (2797).

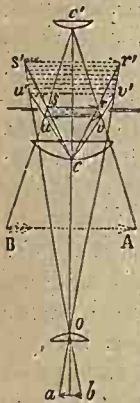


Fig. 1948.

Il est évident que le grossissement produit par l'objectif augmente quand on rapproche l'objet de la surface extérieure, dite *surface frontale*; il faut, alors, retirer l'oculaire pour voir nettement. On construit, principalement en Angleterre, des microscopes à *tirage* comme les longues-vues, avec lesquels la distance de l'oculaire à l'objectif peut être augmentée jusqu'au double. — A mesure qu'on rapproche l'objet de l'objectif, l'angle d'ouverture oao' (fig. 1947) devient aussi plus grand, et un plus grand nombre de rayons entrent dans l'instrument. Mais la *distance frontale* étant plus petite, les dissections sur le porte-objet sont moins faciles. Pour diminuer l'aberration des rayons très-écartés de l'axe, on fait ordinairement plane la surface frontale.

2790. Achromatisme du microscope. — Le microscope, dans l'état de simplicité que nous avons supposé, donne des images irisées sur leur contour, à cause du chromatisme de l'objectif, rendu plus sensible par l'amplification que produit l'oculaire sur l'image réelle. On peut corriger ce défaut en formant l'oculaire de deux lentilles convergentes. Soit o l'objectif (fig. 1948), et or' , os' les axes optiques passant par les extrémités d'un objet ab . Les divers rayons simples formeront une série d'images colorées renfermées dans l'angle $s'or'$; la rouge, $s'r'$, étant la plus éloignée, et la violette, $v'u'$, la plus rapprochée du point o . Si l'on place en c , avant le lieu de ces images, une lentille convergente, elle recevra des rayons convergents venant de chaque point de l'objet, et il se formera, au lieu de l'image rouge réelle $s'r'$, une autre image réelle sr , placée dans l'angle $s'c'r'$ des axes secondaires $s'c$, $r'c$. L'image violette ira se former en uv , plus près de la lentille c , parce que la distance cv' est plus petite que la distance cr' (2525). Si l'on joint les extrémités su , rv de ces images, par les droites usc' , erc' , les extrémités des autres images se trouveront sensiblement sur ces droites; et si l'on place en c' le centre optique d'une lentille convergente,

dont la distance focale soit un peu plus grande que $c'u$, les extrémités su , rv des images vues à travers cette lentille se superposeront, et il n'y aura plus de contours irisés. Les deux lentilles c , c' sont fixées à un tube noir en dedans, nommé *porte-oculaire*.

Objectifs achromatiques. — Quand il s'agit de très-forts grossissements, la disposition qui précède ne donne pas assez de netteté. On emploie alors des objectifs achromatiques, composés de lentilles de matières différentes, appliquées les unes sur les autres. Pendant longtemps, on a été arrêté par la difficulté de travailler et d'ajuster d'aussi petites lentilles; Amici, Goring, Ch. Chevalier, M. Nacet, ... sont parvenus à une réussite complète, et l'on construit aujourd'hui des systèmes achromatiques tellement petits, qu'il faut s'aider d'une loupe pour bien les distinguer. Comme il est difficile de donner à ces lentilles des courbures très-prononcées, on a coutume d'en employer plusieurs vissées les unes à la suite des autres, produisant le même effet qu'une seule à plus court foyer. Celle qui est la plus rapprochée de l'objet est dite *lentille frontale*. On a fait de ces lentilles en verre très-réfringent, n'exigeant pas, par conséquent, des courbures aussi prononcées; on en a fait aussi avec des pierres précieuses, des diamants, et même des pierres précieuses artificielles. M. A. Brachet a fait de nombreux essais au moyen de gemmes (corindon, spinelle, ...) obtenues par les procédés de M. Ebelmen.

Pour n'avoir pas à se préoccuper de l'achromatisme de l'objectif, on a construit des microscopes dans lesquels l'image réelle est formée par un miroir concave; nous y reviendrons plus loin (2820).

Les microscopes défectueux sous le rapport de l'achromatisme, donnent de bons résultats quand on les éclaire avec de la lumière simple, par exemple avec la *lampe monochromatique* (2596), comme l'a fait Brewster.

2791. Description du microscope composé. — Le microscope composé paraît avoir été inventé par Zacharie Jansen, vers 1590, à l'époque où le télescope prenait naissance. On l'a attribué quelquefois à Drebbel, mais il est constant que ce dernier l'avait emprunté à Jansen. Les premiers microscopes composés étaient très-imparfaits; aussi, leur préférerait-on le microscope simple. Depuis la découverte de l'achromatisme, ils ont été portés à un degré de perfection admirable, par MM. Fraunhofer, Amici, Ch. Chevalier, Oberhauser, Nacet, T. Ross, Beck, etc, etc. On a construit bien des modèles de microscopes; plusieurs portent les noms des constructeurs ou des micrographes qui les ont perfectionnés, ou des dénominations qui rappellent leur destination spéciale. Nous nous contenterons d'en décrire deux, dans lesquels se trouvent réalisées les principales dispositions qu'on peut rencontrer dans tous les autres.

Microscope de Ch. Chevalier. — Les microscopes sont ordinairement verticaux, position qui rend les observations pénibles. M. Amici place l'axe de l'oculaire horizontalement, tout en laissant celui de l'objectif vertical, de manière que le porte-objet reste horizontal. Les rayons qui ont traversé l'objectif sont réfléchis, suivant l'axe de l'oculaire, par un prisme à réflexion totale.

Le microscope de Ch. Chevalier (*fig. 1949*) est une imitation de celui d'Amici, avec des modifications qui en rendent l'usage plus facile, et lui permettent de se prêter à diverses applications. En *o* est l'*objectif*, composé de une, deux ou trois lentilles achromatiques, suivant le grossissement que l'on veut obtenir. Ces lentilles sont planes en dessous, et ont chacune de 8 à 10^{mm} de foyer. Les rayons qui ont traversé le système objectif éprouvent la réflexion totale sur la face hypoténuse d'un prisme rectangulaire *a*, représenté à part en *A*, qui les renvoie dans la direction horizontale.

Oculaire, réticule. — L'oculaire *E* est composé de deux lentilles plan-convexes tournant leur face plane du côté de l'œil. Le *porte-oculaire* s'enfonce à frottement doux dans le tuyau *T*. A l'endroit où se forme l'image réelle, entre ces deux lentilles (2788), se trouve un diaphragme qui limite le champ, et un *réticule* formé de deux fils croisés à angle droit, qui sont vus en même temps que l'image réelle de l'objet. Comme ces fils sont grossis, il faut qu'ils soient très-fins; on emploie des cheveux, des fils de soie simple, des fils de toile d'araignée ou les détruit. On préfère souvent des fils de platine excessivement fins, obtenus par la méthode de Wollaston (1, 34). L'intérieur de l'instrument est noirci, pour éviter toute réflexion de lumière sur les parois. Le tuyau *T* est articulé en *e* à une pièce *cc'*, articulée elle-

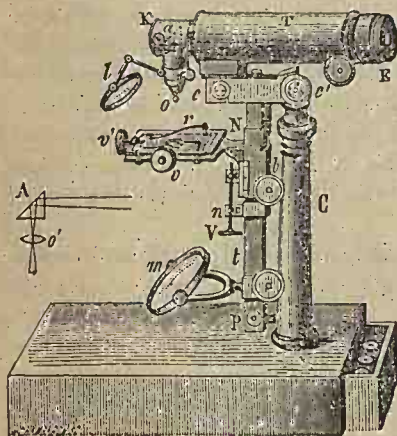


Fig. 1949. — 1/5.

même à la colonne fixe *C*. On peut, en combinant divers oculaires avec différents objectifs, faire varier le grossissement.

Porte-objet. — L'objet que l'on veut observer est placé sur une lame de verre, ou entre deux lames de verre posées sur le *porte-objet* *rvv'*, où elles sont maintenues par deux ressorts, *r*. Le porte-objet consiste en une plaque métallique percée en son milieu, et fixée à un curseur *Nn* qui peut glisser le long d'une règle *Nt* fixée à la pièce *cc'* et arrêtée en bas contre la colonne *C* au moyen d'un bouton à vis *P*. Cette règle est garnie, du côté de la colonne, de dents dans lesquelles s'engagent celles d'un pignon *b* porté par le curseur *n*, et qui sert à faire varier la distance du porte-objet à l'objectif *o*. Le curseur est composé de deux parties, réunies par une vis de rappel *V*; après qu'on a arrêté la partie *n* au moyen d'une vis de pression qui ne se voit pas dans la figure, on achève de régler la position du porte-objet en agissant sur la vis *V*.

Le porte-objet est composé de deux plaques superposées; celle de dessus

peut glisser sur celle de dessous, fixée au curseur Nn , en obéissant à deux vis de rappel, dont l'une, v' , lui imprime un mouvement dans le sens de l'axe du tube T ; et l'autre, v , un mouvement transversal. Par ce moyen, on amène facilement l'objet dans l'axe de l'objectif, et on peut lui faire parcourir le champ sans le perdre de vue. Les vis, v , v' , ont de larges têtes divisées, ce qui permet de les employer comme vis micrométriques pour mesurer le diamètre des objets; il suffit, pour cela, d'en amener deux points opposés successivement sous un des fils du réticule de l'oculaire, et de compter le nombre de tours qu'on a fait faire à la vis, dont le pas est connu.

Éclairage de l'objet. — L'objet doit être d'autant plus vivement éclairé que le grossissement est plus fort. Quand il est transparent ou translucide, on l'éclaire en dessous au moyen d'un miroir sphérique concave m , qui concentre sur lui la lumière des nuées, du soleil ou d'une lampe. Derrière ce miroir en est appliqué un autre, qui est plan, et sert pour les faibles grossissements. Un écran circulaire fixé au porte-objet, et dont le contour porte des ouvertures de différentes grandeurs, sert à restreindre plus ou moins l'espace éclairé. Quand on veut éclairer l'objet en dessus, on emploie une lentille convergente l . Quelquefois on ajuste à l'objectif un petit miroir concave argenté, disposé comme celui du microscope à main (*fig.* 1943), qui renvoie sur l'objet les rayons qu'il a reçus du miroir m . Pour les forts grossissements, on emploie divers appareils d'éclairage imaginés par Wollaston, Brewster, Dujardin, consistant en systèmes de lentilles disposées les unes à la suite des autres, de manière à concentrer sur l'objet, en dessus ou en dessous, les rayons d'une source lumineuse, à peu près comme cela a lieu dans le microscope solaire (2542).

Le microscope de Ch. Chevalier peut être employé verticalement, il suffit de visser la pièce qui porte l'objectif, dans le prolongement de l'oculaire, après avoir enlevé la pièce K , et de relever le tube T en le faisant tourner autour de l'articulation c . — On peut encore employer l'instrument horizontalement, avec le porte-objet vertical, en enlevant le bouton P , et plaçant horizontalement la règle t , en faisant tourner la pièce ce' autour du genou c' .

Quand on veut observer les précipités, ou ce qui se passe dans les réactions chimiques, les vapeurs, les exhalaisons acides ternissant l'objectif, on tourne la pièce K de 90° sur elle-même, de manière que l'objectif soit en haut, et l'on adapte au tube qui porte cet objectif, un collier auquel est fixée une petite règle semblable à Nt , soutenant le porte-objet avec son miroir éclairant. Une large plaque posée sur le porte-objet, et chauffée sur son contour au moyen de lampes à alcool, permet d'opérer à différentes températures.

2792. — Comme second exemple, nous citerons un instrument de M. Nachet, habile artiste qui a fait sa spécialité de la construction des microscopes. L'objectif achromatique est vissé à l'extrémité d'un tuyau noirci en dedans (*fig.* 1950), dont l'autre extrémité reçoit le porte-oculaire. Le tuyau ou *corps* du microscope glisse dans un gros tube fixé à une colonne, qui soutient aussi le porte-objet et le miroir destiné à l'éclairer. Cette colonne est articulée sur le pied de l'instru-

ment, de manière à pouvoir s'incliner plus ou moins, pour la commodité des observations: Le porte-objet est fixe; pour mettre au point, on commence en enfonçant plus ou moins le corps du microscope dans le tube, et l'on achève en agissant sur la vis qui se voit à l'extrémité de la colonne articulée, et qui fait mouvoir l'ensemble de l'instrument, de manière à rapprocher ou à éloigner l'objectif du porte-objet.

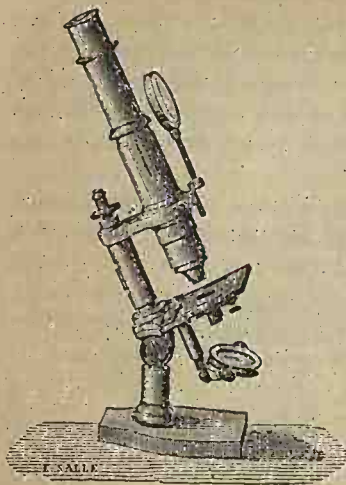


Fig. 1950. — $\frac{1}{5}$.

Dans le grand modèle de microscope de M. Nachet, on trouve, en outre, les deux vis micrométriques au moyen desquelles on fait parcourir le champ à l'objet, le diaphragme tournant, pour modifier l'éclairage, etc.

Pour les observations de chimie, M. Nachet a construit un microscope dont l'objectif est placé au-dessous de l'objet (fig. 1951). Un prisme placé en bas renvoie, par deux réflexions totales, les rayons qui ont traversé l'objectif dans la direction

l'objectif sans déranger le porte-objet.

de l'axe de l'oculaire. Ce système est monté sur une plaque rectangulaire, qui peut glisser à coulisse sur le pied de l'instrument, de manière qu'on peut changer

Microscope de poche, etc. —

M. Nachet construit aussi de petits microscopes grossissant beaucoup et pouvant se renfermer dans une boîte qui leur sert de pied, et n'a que 8^{cm} de longueur. On peut donc les porter avec soi et s'en servir en voyage, auprès du lit des malades, etc.

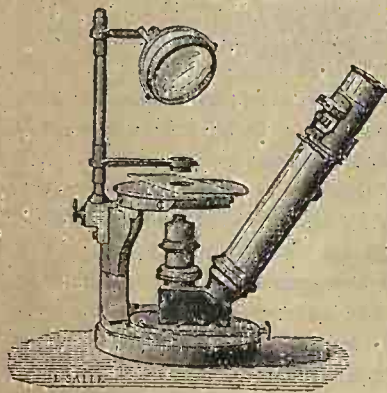


Fig. 1951. — $\frac{1}{5}$.

Le même artiste construit, pour l'usage des cours, des microscopes qu'on se passe de main en main; le porte-objet est fixé au tube, et l'on n'a qu'à le tourner du côté du jour, pour observer les objets qu'on y a fixés entre deux lames de verre.

On fait des microscopes dont l'objectif, peu grossissant, présente un long foyer, de manière à pouvoir observer des objets assez éloignés, par exemple dans les aquariums, ou pour lire les divisions d'une échelle, comme nous en avons vu plusieurs exemples.

2793. Des objectifs. — Pour les forts grossissements, les objectifs sont formés de plusieurs lentilles achromatiques, d'autant plus rapprochées qu'on veut que le système soit plus fort. Amici, au moyen de 3 lentilles non achromatiques, est parvenu à obtenir l'achromatisme de l'ensemble, en les plaçant à des distances convenables les unes des autres. Chaque instrument est accompagné de plusieurs jeux d'objectifs et d'oculaires, que l'on combine de manière à obtenir divers grossissements. On préfère généralement les forts objectifs aux forts oculaires, ceux-ci amplifiant les défauts des premiers.

Objectifs à correction. — Les objectifs corrigés des deux aberrations, ne le sont plus quand on pose sur l'objet à observer une lame mince de verre, dite *couvre-objet*, dont la réfraction modifie la marche des rayons, suivant son épaisseur. Pour corriger cette nouvelle aberration, on change un peu les distances des lentilles qui précèdent la frontale, en faisant tourner un collier qui les enveloppe. La mise au point est assez peu modifiée pour qu'on puisse toujours distinguer l'objet, et l'achromatisme n'est pas sensiblement altéré.

Objectifs à immersion. — La réflexion de la lumière sur la surface frontale, ordinairement plane, ainsi que sur le couvre-objet, fait perdre de la lumière et nuit à la netteté. On combat cet inconvénient par un moyen dont la première idée est due à Hooke, en 1665. On interpose entre le couvre-objet et la surface frontale, un milieu à peu près de même réfrangibilité. Amici employait la glycérine, ou l'essence d'anis; puis, simplement, l'eau distillée, qui convient très-bien, et qu'on emploie généralement aujourd'hui. La distance frontale est alors plus grande, et l'on détruit l'aberration introduite, au moyen du collier à correction.

Objectifs à révoluer. — Quand on a à observer sous des grossissements variés, des objets qui changent rapidement, on se sert avec avantage d'objectifs adaptés au bord d'un disque tournant autour d'un axe fixé latéralement au corps du microscope. En faisant tourner ce disque, on amène successivement les objectifs dans l'axe optique de l'instrument. — M. Jaubert, qui a beaucoup perfectionné les microscopes, dispose les objectifs à révoluer, sur le prolongement des rayons d'une surface sphérique mobile, dont le centre reste sur l'axe optique de l'oculaire.

2794. De l'emploi du microscope composé. — Le microscope est très-employé dans les recherches de l'histoire naturelle. Quand on emploie les forts grossissements, les images sont un peu confuses, ce qui tient en partie à ce que les divers points de l'objet ne sont pas, à cause de son épaisseur, à égale distance de l'objectif. On augmente la netteté en mettant une goutte d'eau sur l'objet, et superposant une mince lame de verre, ou en employant un *objectif à immersion*.

Pour connaître la force et la netteté d'un microscope sous les diverses combinaisons d'oculaires et d'objectifs, on observe certaines préparations décrites et dessinées par des observateurs exercés munis de très-bons instruments, et l'on compare ce que l'on voit avec les détails des dessins. Ces préparations sont

généralement désignées sous le nom de *test-objets*; ce sont de petites écailles prises sur divers insectes, la forbicine, divers papillons. Par exemple, un microscope qui permet de compter les stries sur les raies longitudinales des écailles du papillon du chou, ou les lignes diagonales des écailles de *podura*, peut être considéré comme très-bon.

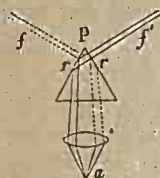


Fig. 1952.

Il y a, dans les observations microscopiques, surtout quand on emploie les forts grossissements, de nombreuses précautions à prendre pour éviter les illusions, d'autant plus à craindre qu'on a affaire, le plus souvent, à des objets inconnus. Il faut veiller minutieusement à la propreté des verres, éclairer le même objet successivement par les divers moyens, et sous des obliquités différentes. Il est bon aussi de commencer par de faibles grossissements, qui donnent une première idée de ce qu'on devra voir avec des grossissements plus forts¹.

2795. Microscopes à plusieurs corps. — Le microscope est fréquemment employé dans l'enseignement; mais on ne peut suivre les opérations du professeur, ou les indications qu'il donne, qu'en regardant après lui; et quand il s'agit d'objets qui changent d'aspect, il devient difficile de s'entendre. On évite cet inconvénient, au moyen du microscope à *plusieurs corps*, imaginé par M. Nachet.



Fig. 1953.

Dans le microscope à *deux corps*, il y a au-dessus de l'objectif, un prisme isocèle à arêtes horizontales P (fig. 1952), dans lequel les pinceaux lumineux partis d'un même point *a* de l'objet, se réfléchissent totalement en *r, r*, émergent suivant *f, f'* dans deux directions différentes, et sont reçus par deux oculaires séparés, au moyen desquels deux observateurs peuvent observer simultanément. Au lieu de deux corps, on peut en disposer 3, 4, en remplaçant le prisme par une pyramide dont la base est tournée vers l'objectif, et dont le nombre pair des faces est égal à celui des oculaires. — La figure 1953 représente le microscope à trois corps.

Chaque observateur peut mettre au point séparément, en déplaçant l'oculaire.

2796. Microscope binoculaire. — Quand on observe la structure intime des organes des plantes et des animaux, il est souvent difficile de reconnaître si ce que l'on voit est en creux ou en relief, parce qu'on regarde avec un seul œil, et

¹ On peut consulter les ouvrages suivants : *Des microscopes et de leur usage*, par Ch. Chevalier; *Traité pratique du microscope*, par M. Mandl; *Manuel de l'observateur au microscope*, par Dujardin; *Traité du microscope*, par C. Robin, etc.

que l'on n'a aucun moyen de comparaison qui puisse aider à se défendre des illusions. M. Ridell et M. Nachet ont trouvé moyen de faire disparaître cette difficulté, en faisant agir les deux yeux, de manière à obtenir la vue *stéréoscopique* de l'objet.

La figure 1954 montre comment les pinceaux des rayons émanant des côtés a, a' de l'objet, et ayant traversé l'objectif oo , se réfléchissent d'abord dans un prisme triangulaire rr' , puis dans les prismes P, P' , pour donner les faisceaux émergents m, m' , qui entrent dans les deux yeux après avoir traversé deux oculaires séparés. On voit que le pinceau arm émanant du côté a de l'objet, entre dans l'œil qui est du même côté.

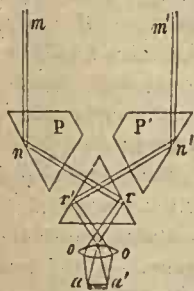


Fig. 1954.

Du reste, la disposition générale est celle qui a été appliquée plus tard au téléstéroscope; seulement, ici les pinceaux lumineux, au lieu d'être rapprochés par les deux réflexions,

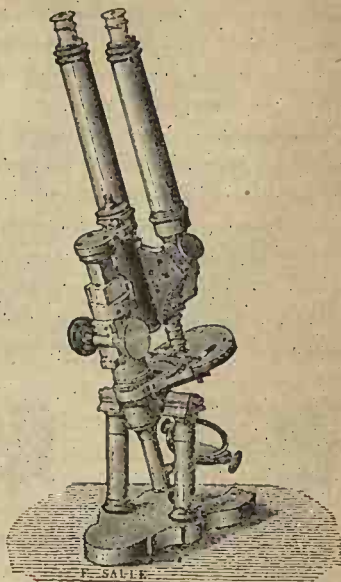


Fig. 1955. — 1/6.

sont écartés à la distance des deux yeux. — La figure 1955 représente un microscope binoculaire de M. Nachet. Une vis placée à droite, près de la partie inférieure des deux corps, sert à les écarter plus ou moins, suivant la distance des yeux. Avec un grossissement modéré, cet appareil permet de distinguer le relief des petits objets avec une netteté étonnante.

2797. Accessoires du microscope. —

Le microscope renversant les images, quand on veut disséquer sur le porte-objet, la pointe du scalpel paraît se mouvoir en sens opposé de ce qui a lieu réellement. Pour éviter ce grave inconvénient, M. Nachet applique sur l'oculaire



Fig. 1956.

un prisme triangulaire à bases obliques acb (fig. 1956), dont la disposition repose sur une observation d'Amici, et dans lequel les faisceaux émergents se réfléchissent successivement sur les faces latérales ab, ac , de manière à se croiser dans l'intérieur du prisme, comme on le voit pour les rayons $srre$ et $s'r'e'$, qui se réfléchissent en $r, r; r', r'$. On voit en A l'ensemble du prisme

redresseur, avec sa monture qui permet de l'appliquer à tous les microscopes.

Réticule. — On dispose souvent, à l'endroit même où se forme l'image réelle qui doit être observée avec l'oculaire, un *réticule* formé de fils très-fins croisés à angle droit. Comme la position de l'image réelle n'est pas la même pour les différentes vues des observateurs, l'anneau qui porte ces fils peut être déplacé parallèlement à lui-même dans le porte-oculaire, au moyen d'un pignon denté, et on lui donne la position pour laquelle les fils sont vus nettement en même temps que l'image de l'objet.

Goniomètre. — M. Brunner a disposé le porte-objet du microscope de manière à pouvoir mesurer les angles des cristaux microscopiques dont l'arête est parallèle à l'axe de l'objectif. Ce porte-objet est circulaire et peut tourner sur lui-même, au moyen d'une vis sans fin; il porte une division en degrés, avec vernier donnant les minutes. Après avoir fait coïncider l'une des faces du cristal avec l'un des fils du réticule de l'oculaire, on fait tourner le porte-objet, jusqu'à ce que la seconde face coïncide à son tour avec le même fil. — M. Nacet applique à ses microscopes un autre goniomètre dû à M. Laurence Smith : le

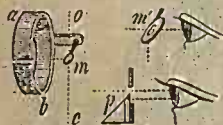


Fig. 1957.

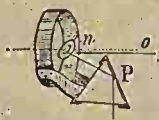


Fig. 1958.

porte-objet reste fixe, et c'est l'oculaire qui tourne sur lui-même, de quantités angulaires qui se mesurent sur un disque gradué qu'il entraîne dans son mouvement.

Chambre claire appliquée au microscope. — On peut

ajuster au porte-oculaire différents systèmes de *chambres claires*, au moyen desquelles on peut dessiner les images amplifiées par l'instrument. Pour le microscope horizontal, on emploie souvent la chambre claire de Sæmmering, consistant simplement en un miroir circulaire d'acier poli *m* (*fig. 1957*) plus petit que l'ouverture de la pupille, et incliné de 45° sur l'axe de l'oculaire, auquel on le fixe au moyen de l'anneau *ab*. L'œil étant en *o*, l'image donnée par l'instrument est vue par réflexion dans ce miroir, pendant que les rayons venant de la pointe du crayon placé dans la direction *me*, passent autour de ce miroir. Pour avoir plus de clarté dans l'image, on a remplacé le petit miroir, par un miroir plus grand *m'*, percé d'un trou plus petit que la pupille, à travers lequel on regarde dans le microscope, pendant que la pointe du crayon se voit par réflexion.

M. Nacet remplace le miroir *m'* par un prisme triangulaire *p* dont l'arête est placée à la hauteur de l'axe de l'oculaire, de manière qu'on regarde dans l'instrument, par dessus cette arête, et qu'on voit le crayon par réflexion totale. On emploie encore une simple glace inclinée à 45° , à travers laquelle on regarde dans le microscope, pendant que le crayon est vu par réflexion. — Avec ces trois dernières dispositions, l'image du papier, à volonté horizontale ou verticale, est renversée; ce qui fait qu'il est difficile de dessiner, la pointe du crayon paraissant marcher en sens contraire de son mouvement réel. Amici évite cet inconvénient au moyen de deux réflexions. Les rayons qui partent du papier

se réfléchissent dans l'intérieur d'un prisme P (fig. 1958), avant de se réfléchir sur le miroir percé n .

La figure 1959 représente une chambre claire pour les microscopes verticaux, imaginée par M. Nacet. Un prisme, dont la section $abcd$ est un parallélogramme, et dont l'angle en a est de 45° , est placé de manière que la face horizontale ac soit en dehors du corps de l'instrument, et la face oblique dc , au-dessus de l'oculaire. Un petit cylindre de verre, o , collé à la face dc au moyen de mastie en larmes, laisse passer les rayons émergeant de l'oculaire, sans les dévier, pendant que les rayons venant de la pointe du crayon arrivent dans l'œil suivant une direction parallèle à celle des premiers, après avoir subi deux réflexions totales sur les faces ab et cd .

M. G. Révoil a disposé des microscopes horizontaux, munis de chambres claires, spécialement destinés à dessiner les objets grossis. Ces instruments, qu'il nomme *mégalographes*, sont montés sur des supports à plusieurs mouvements appropriés à leur destination, et soutenant les sources de lumière destinées à éclairer les objets dans de bonnes conditions.

2798. Mesure du grossissement. — Le calcul du grossissement (2789) laisse toujours de l'incertitude; il dépend de celui de l'oculaire, dont on suppose l'épaisseur négligeable, et, quand il est composé de deux lentilles, le résultat est encore plus douteux. On peut mesurer directement le grossissement, au moyen de la chambre claire. Pour



Fig. 1959.

cela, on place sur le porte-objet un micromètre sur verre, donnant les centièmes de millimètre. L'image grossie de ces divisions se projette sur une règle divisée en millimètres, placée à la distance de la vision distincte, sur la feuille de papier de la chambre claire, et l'on voit combien de millimètres sont couverts par une division grossie du micromètre. S'il y en a n , le grossissement G est évidemment $G = 100 \times n$. — Quand on connaît le grossissement G , du microscope, et celui, g , de l'objectif, on peut obtenir celui, g' , de l'oculaire composé; au moyen de la relation $G = gg'$.

On peut obtenir, au moyen de la chambre claire, les dimensions absolues de l'objet, en voyant combien son image couvre de millimètres, et divisant ce nombre, n , par le grossissement; car l'égalité $G = 100 \times n$ donne $\frac{1}{100} = \frac{n}{G}$, et $\frac{1}{100}$ est la longueur d'une division du micromètre.

M. Bertin procède sans chambre claire; il tient ouvert l'œil gauche pendant que l'œil droit regarde dans le microscope, et il projette l'image sur les pointes d'un compas placé à la hauteur du porte-objet, et dont il mesure ensuite l'écart, sur un micromètre. Cette distance, divisée par le grossissement, donne le diamètre de l'objet. Ce même procédé peut servir à mesurer le grossissement, en remplaçant l'objet par un micromètre.

Dans toutes ces expériences, il faut que le micromètre, vu directement, soit placé à la même distance que l'image virtuelle, et c'est là la difficulté, la vision

distincte ayant lieu, pour toutes les distances, à partir d'un minimum. Quand il s'agit du grossissement, on peut convenir de placer le micromètre à 25^{cm}, minimum moyen de la distance de la vision nette. En tout cas, il est nécessaire, quand on indique la force d'amplification d'un microscope armé d'un objectif et d'un oculaire donnés, de préciser dans quelles conditions la mesure a été effectuée. C'est par les incertitudes des méthodes qu'on peut expliquer ces grossissements exagérés que l'on trouve souvent indiqués dans les ouvrages sur le microscope. M. Robin, qui a mesuré avec soin le grossissement de microscopes de force supérieure construits par M. Nachet, a trouvé le plus fort égal à 1,200 diamètres. Avec de longs instruments, on a pu atteindre 1,800 diamètres; mais ces nombres sont bien loin des 3,000 et 4,000 qu'on a quelquefois annoncés.

2790. Application du microscope à la mesure des indices de réfraction des liquides ou des corps mous. — La méthode suivante, imaginée par Brewster, permet d'opérer sur de très-petites quantités de matière. On prend un microscope pouvant se déplacer suivant son axe au moyen d'une vis micrométrique, et dont l'objectif soit un peu saillant. Une lame de verre à faces



Fig. 1960.

bien parallèles, est appliquée contre cet objectif. On mesure, au moyen de la vis, la distance, d , de l'objectif à un micromètre placé sur le porte-objet, quand les divisions sont vues nettement. On introduit une goutte de liquide entre la lame de verre et l'objectif; cette goutte forme une lentille plan-concave, et il faut, pour voir nettement le micromètre, en éloigner l'objectif. Soit d' la nouvelle distance. En appelant D la distance constante à l'objectif, de l'image réelle faite en avant de l'oculaire, et a , a' les distances focales principales de l'objectif et du système formé par cet objectif et par le ménisque liquide, on aura

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{D} = \frac{1}{a}, \quad \frac{1}{d'} + \frac{1}{D} = \frac{1}{a'}; \quad \text{d'où } \frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a'}. \quad [1]$$

Cela posé, soit f (fig. 1960) le foyer principal de l'objectif seul, pour des rayons parallèles venant de r ; et f' , celui de cet objectif réuni au liquide. Des rayons partant de f' et traversant le liquide seul, formeraient leur foyer virtuel au point f ; car, si nous supposons une distance insensible entre les deux substances, le rayon $racf'$ aura la même direction que s'il avait passé directement du verre dans le liquide (2503); et le rayon partant de r parcourant la ligne $racf'$, on voit que, s'il partait de f' , il sortirait du liquide dans la direction ca , qui, prolongée, passe par le point f . Les points f et f' sont donc des foyers conjugués, et l'on aura, en appelant φ la distance focale principale du ménisque liquide seul :

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = \frac{1}{\varphi}, \quad \text{et, par conséquent, } \frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = \frac{1}{\varphi},$$

d'après l'équation [1]. Or, la valeur de φ en fonction du rayon de courbure R de la face courbe, et de l'indice n du liquide, est (2524) :

$$\varphi = \frac{R}{n-1}; \quad \text{on a donc } \frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = \frac{n-1}{R}. \quad [2]$$

d'où l'on tirera la valeur de n . Cette valeur dépendant du rayon R de la face extérieure de l'objectif, rayon qui ne peut se mesurer avec précision à cause de sa petitesse; on évite de l'employer en comparant l'indice du liquide à l'indice connu n' d'un autre liquide, de l'eau par exemple. Pour ce second liquide, on aurait $\frac{1}{d} - \frac{1}{d''} = \frac{n' - 1}{R}$; et en éliminant R entre cette équation et [2]

on trouve $\frac{n - 1}{n' - 1} = \frac{d' - d}{d'' - d} \frac{d''}{d'}$; d'où l'on tire n en fonction de n' et des distances d, d', d'' .

Au lieu des distances d, d', d'' , on peut se servir des grossissements g, g', g'' correspondants; en effet, l'oculaire restant fixe, ces grossissements sont entre eux comme ceux des systèmes d'objectifs. Or, ces derniers sont $g = D : d$; $g' = D : d'$; $g'' = D : d''$ (2532). En remplaçant d, d', d'' , par leurs valeurs tirées de ces égalités, l'équation précédente devient $\frac{n - 1}{n' - 1} = \frac{g - g''}{g - g'}$.

La méthode de Brewster n'est pas très-précise, à cause de la petitesse des quantités d, d', d'' , de la flexibilité de l'œil qui permet de voir nettement à des distances un peu différentes, et parce que les formules employées ne sont qu'approchées; mais elle présente l'avantage de n'exiger que très-peu de matière.

Méthode du duc de Chaulnes. — Cette méthode, publiée en 1767, s'applique aux solides terminés par des plans parallèles. La plaque étant posée sur le porte-objet, on ajuste l'instrument de manière à voir nettement les poussières qui peuvent se trouver sur la face supérieure; puis on mesure, avec la vis micrométrique, la quantité dont il faut rapprocher le microscope de la plaque pour voir nettement les points de la face inférieure. Comme les rayons qui partent d'un point A de cette face (fig. 1961) sont déviés en émergeant, de manière à se rencontrer en a , l'objectif devra être rapproché, de la quantité Ba et non de BA . Or, en appelant i et r les angles d'incidence et de réfraction du rayon An , on aura $AB : aB :: \tan i : \tan r$; ou, en prenant les sinus pour les tangentes, les angles i et r étant très-petits, $AB : aB :: \sin i : \sin r = n$; relation qui donne la valeur de n , au moyen de l'épaisseur AB de la plaque et du déplacement aB du microscope.

Ce procédé peut s'appliquer aux liquides, en les renfermant dans une auge formée d'une plaque de verre dans laquelle est percé un trou fermé par deux lames de verre minces. On peut se dispenser de mesurer l'épaisseur de la plaque, en comparant l'indice du liquide à celui de l'eau, ce qui permet d'éliminer AB . Cette méthode est sujette aux mêmes incertitudes que la précédente. M. Bertin l'a modifiée en cherchant, au lieu du déplacement que doit subir le microscope, pour passer de la vision nette de la surface supérieure à celle de la surface inférieure, la quantité dont il faut rapprocher l'oculaire de l'objectif qui reste fixe ¹.



Fig. 1961.

1. Annales de chimie et de physique 3^e série, t. XXVI, p. 288.

II. Lunettes, télescopes.

2800. — Les *télescopes* sont des instruments à travers lesquels les objets éloignés sont vus sous un diamètre apparent plus grand qu'à l'œil nu. On distingue le *télescope réfracteur* ou de *réfraction*, dans lequel on n'emploie que des lentilles, et que l'on nomme plus particulièrement *lunette*, et le *télescope catadioptrique*, ou de *réflexion*, dans lequel on emploie au moins un miroir sphérique. Nous allons d'abord nous occuper des *lunettes* ou *télescopes de réfraction*.

2801. Lunette astronomique. — Cet instrument se compose essentiellement de deux lentilles convergentes : l'*objectif*, tourné vers les objets que l'on

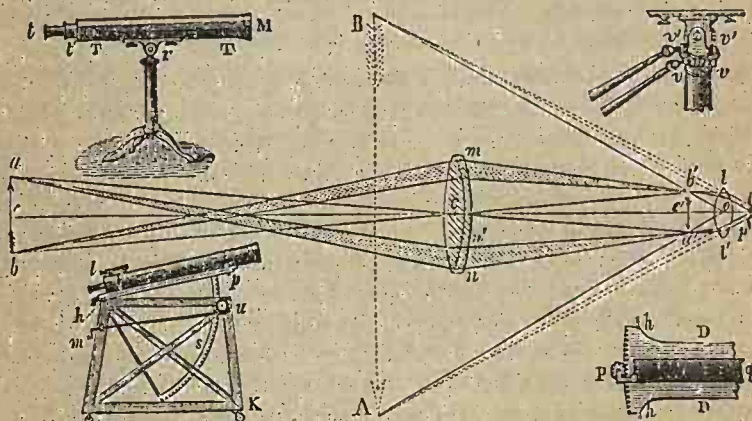


Fig. 1962.

veut voir, et l'*oculaire*, auquel on applique l'œil. L'*objectif*, *mn*, donne d'abord une image réelle renversée, *a'b'*, de l'objet *ab* (fig. 1962), image beaucoup plus petite que l'objet, parce qu'il est très-éloigné. On regarde ensuite cette image *aérienne*, *a'b'*, à la loupe, au moyen de l'*oculaire* *ll'*, placé à une distance de *a'b'* un peu moindre que sa distance focale principale. On voit alors une image virtuelle et renversée, *AB*, de l'objet.

On met au point en faisant varier la distance de l'*oculaire* à l'*objectif*, et il faut un peu plus enfoncer l'*oculaire* pour les myopes, et le retirer un peu pour les presbytes. Il faut aussi le retirer d'autant plus que l'objet observé est plus rapproché, l'image focale s'éloignant de l'*objectif* quand l'objet s'en rapproche (2525).

Pour construire le pinceau lumineux qui entre dans la pupille *p* et fait voir l'image *A* d'un point *a*, on mène des rayons du point *A* au contour de la pupille; puis, on joint au point *a'* l'intersection du cône *Ap* avec l'*oculaire*; on prolonge

en $a'm'$ le cône ainsi obtenu, et l'on joint enfin l'intersection nm' de ce cône avec l'objectif, au point lumineux a . On obtient ainsi le faisceau ann' , $nm'a'$, $a'p$, qui fait voir l'image A du point a . On a construit de la même manière, sur la figure, le faisceau qui correspond au point b , et fait voir son image B.

On voit que le rôle de l'objectif consiste à fournir une image aérienne de l'objet, image que l'on regarde ensuite à la loupe. Comme cette image doit être fortement grossie, il faut qu'elle soit très-brillante. On remplit cette condition en donnant à l'objectif une grande ouverture, afin qu'il concentre en chaque point de l'image réelle, un grand nombre de rayons partant de l'objet. Pour n'avoir pas d'aberration de sphéricité, il faut en même temps que la longueur focale de l'objectif soit très-grande; c'est pourquoi les fortes lunettes sont longues et ont un objectif de grand diamètre, et, pour donner une idée de la force de l'oculaire le plus grossissant qu'on peut leur appliquer, on indique le diamètre ou la longueur de foyer de l'objectif.

2802. Champ. Réticule. — Comme pour le microscope composé (2788), le champ est limité par la surface d'un cône ayant son sommet au centre optique c de l'objectif, et ayant pour base le contour de l'oculaire, ou mieux l'ouverture d'un diaphragme placé en $a'b'$. Comme l'oculaire est d'autant plus petit qu'il grossit davantage, on voit que le champ sera d'autant moins étendu que la lunette sera plus forte. — Les faisceaux sortant de l'oculaire en convergeant les uns vers les autres, il y a, comme pour le microscope (2788), une distance à laquelle l'œil profite de tout le champ. Le croisement des faisceaux en p forme le *point oculaire* ou *cercle de Ramsden*; on y place un diaphragme, dont le trou se nomme *æilleton*, et contre lequel on applique l'œil. Ce diaphragme est inutile dans le cas des forts grossissements, le cercle de Ramsden étant alors tellement rapproché de l'oculaire, qu'il faut placer l'œil le plus près possible.

Les fils du *réticule*, pour être vus nettement, devant se trouver sur l'image réelle de l'objet donnée par l'objectif, et cette image changeant de position avec la distance des objets observés, l'anneau qui porte les fils doit être mobile, comme dans le microscope (2797).

2803. Dispositions de la lunette astronomique. — L'objectif est fixé dans une *sertissure*, anneau métallique vissé à l'ouverture d'un tuyau noirci en dedans. L'oculaire est *serti* à l'extrémité d'un tube plus étroit, pouvant s'enfoncer plus ou moins dans le tuyau, pour mettre au point suivant la distance. On voit en *M* (*fig.* 1962) une lunette montée sur un pied, auquel elle est articulée en r , de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical et autour d'un axe horizontal. *TT* est le *corps* de la lunette, t le tube porte-oculaire; qui s'enfonce dans un second tube t' . Après avoir mis au point approximativement, on achève, en faisant mouvoir le tube t' , au moyen d'un pignon denté agissant sur une crémaillère fixée à ce tube.

Il faut une certaine habitude pour *pointer* la lunette, les mouvements dans le champ, d'un point visé, étant amplifiés de sorte que le plus petit déplacement de l'axe de la lunette fait sortir ce point du champ, qui est d'autant plus petit que

le grossissement est plus fort. Pour faciliter l'opération, les deux mouvements sont souvent imprimés au corps T au moyen de vis sans fin, l'une agissant sur l'axe vertical, l'autre sur l'axe horizontal. Ces vis sont représentées à part en *vr* et *v'v'* (fig. 1962). On les fait tourner au moyen de baguettes articulées par des charnières universelles. — Les grandes lunettes, longues et pesantes, ne peuvent être appuyées en un seul point, et de plus il faut que les mouvements s'effectuent très-lentement. Le croquis K (fig. 1962) donne une idée d'un des supports employés dans ce cas. La lunette est posée sur une tablette de bois *hp*, appuyée sur une seconde tablette plus large, dans le plan de laquelle elle peut tourner autour d'un boulon *p*. La tablette inférieure peut tourner autour d'une

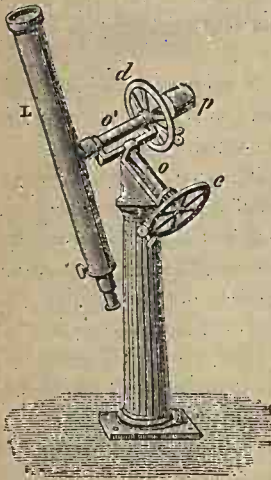


Fig. 1963.

charnière horizontale *h*, portée par le pied en charpente *mnk* de l'instrument. Pour faire mouvoir la lunette dans un plan vertical, on fait tourner, au moyen de la manivelle *m*, une vis sans fin *u*, dont la roue entraîne un pignon qui engrène dans un arc denté *s*, fixé sous la tablette inférieure. — Le mouvement dans le plan horizontal est produit au moyen d'un pignon fixé à la tablette supérieure et engagé dans des dents d'un arc fixé à la tablette inférieure, et ayant son centre au boulon *p*, comme on le voit en bas, à droite, où *DD* est la tablette inférieure, mobile autour de l'axe horizontal *hh*, *q* la tablette supérieure, et *P* le pignon denté, qui s'y trouve fixé par un levier articulé, de manière qu'on peut l'écarter du secteur denté, quand on veut déplacer la lunette par de grands mouvements.

Chercheur. — Sur le côté du corps de la lunette, on dispose une petite lunette *l* (fig. 1962), nommée *chercheur*, dont l'axe est exactement parallèle à celui de la lunette principale, et qui porte un réticule. On fait coïncider le point que l'on veut observer avec le croisement des fils, ce qui est facile, vu le champ considérable du chercheur, peu grossissant, et alors ce point se trouve quelque part dans le champ de la lunette principale.

Pied parallaxique. — Souvent les lunettes sont installées de manière à pouvoir suivre facilement les astres dans leur mouvement apparent autour de la terre. La figure 1963 représente une lunette *L*, ainsi montée. Elle est fixée perpendiculairement à un arbre d'acier *o'* porté par une fourchette fixée elle-même à un autre arbre *o* dirigé parallèlement à l'axe du monde. En faisant mouvoir la lunette, dont le poids est équilibré par la masse *p*, autour de ces deux arbres, on la dirige vers le point à observer; on arrête le mouvement autour de *o'* au moyen d'une vis de pression, et l'on suit l'astre en faisant

décrire à la lunette un cône autour de l'axe o . Souvent, le mouvement est imprimé par une horloge à poids. La lunette ainsi montée est dite *parallactique* ou *équatoriale*. — Les appareils puissants doivent être ainsi montés, avec mouvement d'horlogerie; autrement, leur champ est tellement petit qu'on aurait à peine aperçu l'astre qu'il aurait déjà disparu. — Nous avons vu (2456) comment un *sidérostal* renvoyant constamment les rayons de l'astre dans la direction d'une lunette fixe pourrait remplacer avantageusement le mouvement parallactique.

2804. Achromatisme des lunettes. — L'objectif *achromatique* est composé d'une lentille biconvexe en *crown* et d'une lentille concave-convexe ou plan-concave en *flint*. Quelquefois, on associe trois lentilles. Pendant longtemps, on a été arrêté par la difficulté d'obtenir de grands disques de verre purs et exempts de stries. Un fondeur de verre, Guinand, est parvenu à résoudre la difficulté. On avait essayé antérieurement de donner de petites dimensions à la lentille de flint, en l'éloignant de la lentille de crown; c'est ainsi que Barlow et Fresnel employaient leurs lentilles liquides (2614); l'instrument se nomme alors *lunette dialytique*.

Cauchois a construit, sous le nom de *vitro-crystallines*, des lunettes dont le crown était remplacé par du cristal de roche, ce qui lui permettait de réduire la longueur, d'un tiers environ avec les mêmes courbures, et, par conséquent, sans augmenter sensiblement l'aberration de sphéricité.

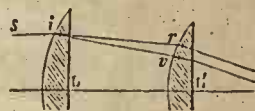


Fig. 4964.

Disposition de l'oculaire. — Quand on veut obtenir un très-fort grossissement, on sacrifie quelque chose de la netteté, et l'on emploie un oculaire simple. On pourrait construire des oculaires achromatiques formés de deux lentilles en contact, mais le grossissement serait trop faible. Campani a imaginé d'employer deux lentilles plan-convexes de même substance, écartées l'une de l'autre. Dans l'oculaire *positif*, ou de *Ramsden*, ces deux lentilles sont placées au-delà de l'image focale donnée par l'objectif, et leurs surfaces convexes sont tournées l'une vers l'autre. — Dans l'oculaire *négalif*, ou de *Huyghens*, l'image réelle se forme, comme dans le microscope (2788), entre les deux lentilles, dont les faces planes sont alors tournées vers l'œil. La lentille tournée du côté de l'objectif est le *verre de champ*, ou *collecteur*, qui augmente le champ de l'instrument. Dans ce cas, le réticule, qui est aussi une invention d'Huyghens, se place entre les deux lentilles. Le système de Ramsden présente l'avantage que le micromètre, placé en dehors du tube porte-oculaire, peut recevoir divers mécanismes au moyen desquels on fait mouvoir les fils, pour certaines observations astronomiques, et ne se déplace pas avec l'oculaire. Nous avons vu (2528) comment on calcule la position de l'image formée dans ce système.

L'achromatisme du double oculaire peut s'obtenir par un artifice particulier, en compensant l'une par l'autre les aberrations de réfrangibilité et de sphéricité, qui ne sont sensibles que pour les rayons passant à une certaine distance

de l'axe. Soit L (fig. 1964) la première lentille, et si un rayon venant de l'objectif; ce rayon forme le faisceau dispersé rv , qui traverse la seconde lentille L' , plus petite que la première. Le rayon violet iv , la rencontrant plus près de l'axe que le rayon rouge, est moins dévié que lui; et, si les courbures sont convenables, ces rayons formeront un pinceau cylindrique et incolore.

Du reste, le défaut de netteté est imputable plutôt à l'objectif qu'à l'oculaire. On conçoit, en effet, que le plus léger défaut dans l'image réelle formée par le premier peut devenir intolérable quand il est amplifié par un oculaire puissant, et ce n'est que par des tâtonnements et des soins multipliés qu'on arrive à obtenir des objectifs assez dépourvus des deux aberrations pour supporter de forts oculaires, avec images nettes.



Fig. 1965. $\frac{1}{3}$. l'image $a'b'$ se forme au foyer principal de l'objectif et au foyer principal de l'oculaire; ce qui est sensiblement vrai, l'objet ab étant à une très-grande distance. F et f étant les distances focales des deux lentilles, les triangles $b'e'o$, $b'e'e$, donnent

$$\text{tang } b'oe' = \frac{b'e'}{oe'} = \frac{b'e'}{f}; \quad \text{tang } b'ce' = \frac{b'e'}{ce'} = \frac{b'e'}{F}; \quad \text{d'où } \frac{\text{tang } b'oe'}{\text{tang } b'ce'} = \frac{F}{f} = G.$$

Le grossissement est donc sensiblement égal au rapport des distances focales de l'objectif et de l'oculaire; résultat auquel on arrive également en considérant, comme nous l'avons fait pour le microscope, les angles $b'ea'$, $b'oa'$, qui ont pour mesure $a'b'$; F et $a'b'$: f . — On voit qu'il faut, pour que la lunette grossisse beaucoup, que l'objectif ait un très-long foyer, et l'oculaire un très-court. Ce résultat pouvait se prévoir, car l'oculaire grossit d'autant plus l'image réelle $a'b'$ que son foyer est plus court, et cette image est d'autant plus grande que le foyer de l'objectif est plus long, le rapport entre les grandeurs de l'image et de l'objet étant égal à $ee' : ce'$. Les fortes lunettes doivent donc être longues, et nous avons vu que cette condition est, en outre, nécessaire pour qu'on puisse appliquer à l'objectif, de forts oculaires (2801).

Si l'on regarde dans une lunette par le gros bout, le rapport $F : f$ devra être renversé; les objets paraîtront donc plus petits qu'à l'œil nu.

Le champ C est d'autant plus petit que le grossissement est plus fort; car on a $C = le' = \frac{l'}{F + f} = \frac{d}{f} \frac{1}{G + 1}$, en appelant d le diamètre de l'oculaire, divisant les deux termes par f , et remarquant que $F : f$ représente le grossissement G . La pratique a montré que, pour avoir un bon résultat, il faut que f soit plus grand que $4d$; le champ est donc au plus $C = \frac{1}{4} \frac{1}{G + 1}$.

Dynamètre. — Ramsden a imaginé un moyen de calculer le grossissement sans connaître les distances focales des deux lentilles. Après avoir mis au point pour les objets les plus éloignés, on dirige la lunette vers le ciel. Chaque point de la surface intérieure de l'objectif envoie des rayons en dedans, suivant toutes les directions, comme si cette surface était un corps lumineux, et l'oculaire en donne en dehors une image, qui est la même que celle que donnerait l'ouverture fermée par l'objectif, si celui-ci était enlevé. Cette image se nomme *anneau oculaire*. Si r est son diamètre et R celui de l'objectif, le grossissement sera $R : r$. En effet, en désignant par F et f les distances focales de l'objectif et de l'oculaire, par d la distance du centre optique de ce dernier à l'anneau oculaire, on aura $R : r = F + f : d$. Or, la formule des lentilles donne

$$\frac{1}{F+f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}; \quad \text{d'où} \quad \frac{F+f}{d} = \frac{F}{f} = G.$$

Pour évaluer le diamètre r de l'anneau oculaire, on emploie le *dynamètre* ou *micromètre* de Ramsden (fig. 1965). Ce petit instrument consiste en trois tubes rentrant les uns dans les autres. Le tube moyen, mn , est fermé par une lame translucide m , sur laquelle est gravé un micromètre diamétral en dixièmes de millimètre. Le tube ol porte une loupe l , que l'on enfonce de manière à voir nettement ces divisions, par l'ouverture o . On appuie le tube extérieur ll' sur la sertissure de l'oculaire, et l'on dispose le système des tubes ol , mn , de manière à voir nettement le contour de l'anneau oculaire se projetant sur le micromètre, et l'on compte les divisions comprises dans cet anneau.

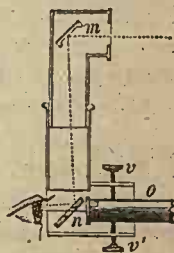


Fig. 1966.

2806. Mesure directe du grossissement. — On regarde à travers la lunette, une échelle divisée placée à une grande distance, pendant qu'on la voit directement avec l'autre œil. La lunette étant dirigée de manière que les deux images se superposent, on compte le nombre n de divisions, vues à l'œil nu, comprises dans une seule division vue dans la lunette. Ce nombre représente évidemment le grossissement en diamètre. Cette méthode est due à Galilée. — Dans le cas des fortes lunettes, dont le tuyau cache l'échelle à l'œil extérieur, Pouillet emploie une espèce de chambre claire, qui se fixe à l'oculaire o au moyen de vis v , v' (fig. 1966), et qui est composée de deux miroirs m , n , inclinés à 45° . Le miroir n est percé d'un petit trou, par lequel on voit l'échelle à travers la lunette, pendant que les rayons réfléchis sur les deux miroirs la font voir telle qu'elle apparaîtrait à l'œil nu. — Cette méthode s'applique à tous les instruments qu'il nous reste à décrire. Nous verrons plus tard un autre procédé dans lequel on se sert de la double réfraction.

2807. De la clarté. — La clarté de l'image virtuelle dépend de l'éclat de l'image réelle, par conséquent du diamètre de l'objectif et du grossissement. Considérons d'abord un point unique, par exemple une étoile, qui n'a pas de

diamètre apparent sensible, et supposons que le pinceau émergent soit assez mince pour passer tout entier par la pupille, ce qui a lieu pour les forts oculaires. Les quantités de lumière reçues dans l'œil, regardant à travers la lunette, puis regardant directement, seront entre elles comme les carrés des diamètres R et p de l'objectif et de la pupille. Le rapport $R^2 : p^2$ représentera donc l'éclat de l'étoile dans la lunette, comparé à l'éclat à l'œil nu. Si, par exemple, R est égal à 100 fois p , l'éclat sera 10000 fois plus grand qu'à l'œil nu. On voit donc pourquoi l'on distingue beaucoup plus d'étoiles avec une lunette qu'à l'œil nu.

Considérons maintenant un objet lumineux ayant un diamètre apparent sensible, l'éclat de chacun des points de l'image sera $R^2 : p^2$. Mais cette image étant grossie, la lumière émanant de l'objet sera répartie, au fond de l'œil, sur une surface proportionnelle au grossissement en surface G^2 ; la clarté sera donc $c \equiv R^2 : p^2 G^2$. Cette expression peut se mettre sous une autre forme, car on a $G \equiv R : r$; r étant le diamètre de l'anneau oculaire (2805). Substituant, il vient $c \equiv r^2 : p^2$. La clarté est donc égale au rapport de la surface de l'anneau oculaire à celle de la pupille, quand tous les rayons émergents entrent dans l'œil, c'est-à-dire quand r est plus petit que p . On voit que c est toujours moindre que l'éclat de l'objet vu à l'œil nu; il lui est tout au plus égal, quand l'anneau est égal à l'ouverture de la pupille. Pour les astres, il suffit d'une clarté égale à $\frac{1}{3}$; pour les objets terrestres, il faut aller jusqu'à $\frac{1}{2}$, à cause de leur faible éclat.

Les étoiles étant vues avec plus d'éclat dans une lunette qu'à l'œil nu, et la lumière atmosphérique étant affaiblie à mesure que r diminue, c'est-à-dire que le grossissement est plus grand, on comprend pourquoi les lunettes permettent de distinguer pendant le jour des étoiles d'autant plus faibles, que le pouvoir amplifiant est plus grand.

Les qualités d'une lunette sont relatives au grossissement, à la netteté des images et à leur clarté. Indépendamment des conditions géométriques que nous avons fait connaître, il y a certaines conditions physiques dont on ne peut bien apprécier l'influence que par des essais directs. Tels sont la perfection des courbures des lentilles, leur ajustement, la pureté du verre. On a recours, pour essayer une lunette, à l'observation de certains objets célestes qui servent de termes de comparaison. On observe ordinairement des étoiles doubles plus ou moins difficiles à dédoubler, les bandes de l'anneau de Saturne, ses divers satellites, certaines nébuleuses, certaines très-petites étoiles. La faculté de faire distinguer des objets lumineux de très-faible éclat dépend surtout de la clarté, et constitue ce que W. Herschel appelait la *force pénétrante* de l'instrument, qu'il ne faut pas confondre avec sa force amplifiante. L'expérience a même prouvé que ce n'est pas avec les plus forts oculaires d'une lunette qu'on voit le mieux, et un très-bon objectif de dimensions moyennes, avec un oculaire modéré, a souvent permis de distinguer des détails, invisibles avec les plus puissants appareils.

2808. Application de la lunette astronomique. — Avant le dix-septième siècle, l'on ne pouvait avoir aucune idée de la constitution physique des corps célestes. L'invention des lunettes est venue donner un essor inattendu à l'astronomie

physique, en fournissant des données positives sur cette constitution, en faisant découvrir une infinité d'étoiles dont on ne soupçonnait pas même l'existence, et permettant ainsi de pénétrer dans la profondeur de l'espace et d'étudier, suivant la belle expression de W. Herschel, la *structure* des cieux. Les découvertes se sont dès lors multipliées; et chaque perfectionnement apporté à l'admirable instrument qui accroît la portée et la puissance de la vision, a été l'occasion de découvertes nouvelles, qui, à leur tour, en ont fait naître d'autres.

Observation du soleil. — Pour observer la surface solaire, on visse devant l'oculaire, une lame de verre de couleur foncée, pour amortir l'éclat des pinceaux resserrés qui en émergent, et pour intercepter leur chaleur, qui est telle qu'on peut brûler du bois, fondre des fils métalliques tout près de l'oculaire. On emploie aussi, pour préserver l'œil, une bande de verre bleu, dont l'épaisseur diminue d'une extrémité à l'autre, de manière qu'on peut choisir l'épaisseur qui convient, d'après la puissance de la lunette et la pureté de l'air. Cette bande de verre bleu, appliquée sur une bande de verre incolore destinée à la consolider dans les parties minces, se nomme *hélioscope*.

Scheiner, qui dispute à Galilée la découverte des taches solaires, a, le premier, adapté à l'oculaire un verre de couleur, après avoir employé d'abord un objectif de verre coloré. Il a aussi procédé en projetant l'image du soleil sur un écran; méthode qu'on emploie habituellement quand on veut étudier et dessiner les taches solaires: Il suffit de retirer un peu le porte-oculaire, de manière que l'image aérienne de l'étoile se trouve au-delà du foyer principal de l'oculaire, qui en donne alors une image réelle, en dehors de l'instrument. C'est cette image qu'on reçoit dans la chambre noire pour photographier le disque solaire, avec ses taches, ses facules et les granulations qui couvrent sa surface (2676).

Ajoutons que, depuis l'invention de l'argenture sur verre, dont nous reparlerons, on observe le soleil au moyen d'objectifs argentés par procédé chimique. Les rayons sont très-affaiblis par la couche d'argent, et cependant leur marche n'est aucunement troublée.

Application à la mesure des angles. — L'application des lunettes à réticule aux cercles gradués, a fait faire d'immenses progrès à l'astronomie physique, en apportant à la mesure des angles un degré de précision que ne pouvaient donner les alidades à pinnules. C'est à Simon Morin que l'on en doit l'idée, vers 1660, idée attribuée par les Anglais à leur compatriote Gaseoigne. Ce perfectionnement important fut d'abord repoussé, à l'instigation d'Hévélius et malgré les efforts de Hooke; mais, vers 1667, Picard ayant appliqué une lunette au quart de cercle qui lui servit à mesurer le méridien, et Auzout ayant publié des résultats précis d'observations faites aussi à l'aide de lunettes, l'usage s'en répandit rapidement. — La droite qui joint le point de croisement des deux fils principaux du réticule au centre optique de l'objectif, est l'*axe optique* de la lunette; elle doit être parallèle à son axe de figure.

2809. Lunette terrestre. — La lunette astronomique renverse les images, ce qui est un grave inconvénient quand on veut observer des objets terrestres,

Kepler proposa de remettre l'image droite, en recevant les rayons qui en partent sur une lentille convergente qui en donne une seconde image réelle et redressée, que l'on grossit avec l'oculaire; ce qui revient à remplacer ce dernier par un microscope composé. Le P. Scheiner exécuta des lunettes d'après ce principe, mais il n'obtint que des images déformées sur leur contour. Alors le P. Rheita produisit le redressement au moyen de deux lentilles intermédiaires, et construisit ainsi la *lunette terrestre*, dite *lunette d'approche* ou *longue-vue*. On voit (fig. 1967) le porte-oculaire de cet instrument. ac est l'image réelle renversée fournie par l'objectif. Une lentille, o , est placée à une distance de cette image égale à sa distance focale principale, de manière que les rayons partis d'un point de ac sortent tous de cette lentille parallèlement à l'axe optique qui leur correspond. Par exemple, les points a et c donnent les faisceaux cylindriques mn ; $r'n'$, qui se croisent à une distance d'autant plus petite de la lentille o , que son foyer est plus court. Une seconde lentille o' , placée au-delà du point de croisement, fait converger les rayons de chaque faisceau cylindrique, sur l'axe secondaire correspondant à ce faisceau, c'est-à-dire sur la droite menée par le centre optique o' parallèlement à ce faisceau.



Fig. 1967.

Ainsi, les faisceaux fournis par les points a et c donnent des images a' , c' de ces points, situées à une distance de la lentille o' égale à sa distance focale principale, et l'image $a'e'$ étant renversée par rapport à ac , est droite par rapport à l'objet. Si les deux lentilles o , o' ont le même foyer, les images ac , $a'e'$ sont égales. L'image $a'e'$ est ensuite vue à travers le système oculaire LL' .

Le grossissement est égal à $F : f$, comme pour la lunette astronomique, quand les deux images ac , $a'e'$ sont égales. Si elles sont inégales, le rapport de leurs diamètres est évidemment celui des distances focales φ , φ' des deux lentilles; on a donc $ac : a'b' = \varphi : \varphi'$ et le grossissement est alors $F\varphi' : f\varphi$.

Le champ n'est pas changé par les verres intermédiaires quand on les place à une distance l'un de l'autre telle que le second reçoive tous les faisceaux parallèles venant du premier; il faut donc que ces verres soient d'autant plus rapprochés que le second est plus petit. Ordinairement, on les écarte d'une quantité plus grande que la somme de leurs foyers.

Lunette de nuit. — La clarté est diminuée dans la lunette terrestre, par les réflexions aux surfaces des verres. On compense en prenant un objectif plus grand. C'est ce que l'on fait surtout pour les *lunettes de nuit*, afin que l'image soit distincte malgré le très-faible éclat des objets.

2810. Lunette polyalbe. — Aujourd'hui, pour donner moins de longueur au porte-oculaire, on dispose les lentilles de retournement d'une autre manière. On fait en sorte que l'image ac (fig. 1967) soit plus rapprochée de la lentille o que son foyer principal; les faisceaux mn , $r'n'$ sont alors divergents, et dans le

même cas que s'ils portaient de l'image virtuelle et grossie formée par les rayons qui émanent de ac . Ces faisceaux divergents sont reçus par la lentille o' qui donne, de l'image virtuelle grossie, une image réelle retournée, $a'e'$, que l'on observe avec l'oculaire LL' . Les choses se passent comme si l'on observait l'image virtuelle au moyen d'une lunette dont o' serait l'objectif. Le grossissement dépendra de la distance oo' ; car l'angle sous lequel est vue l'image virtuelle dépend de sa distance à o' jouant le rôle d'objectif, et cette distance dépend de celle des deux verres o et o' .

Il résulte de là qu'on pourra faire varier le grossissement, en déplaçant le système de ces verres intermédiaires. C'est ce qu'a fait Cauchy dans les lunettes qu'il nomme *polyaldes* ou *pancratiques*. Le grossissement varie ordinairement dans le rapport de 20 à 40 ou de 30 à 50.

Télé-icouographe. — M. Revoil a appliqué la chambre claire à la lunette terrestre de manière à pouvoir dessiner les objets trop éloignés pour qu'on puisse les distinguer à l'œil nu. C'est ainsi qu'il a dessiné les détails d'ornementation de nombreux monuments, malgré leur grand éloignement.

2811. Lunette-cornet ou télémètre. — La longue-vue est composée de plusieurs tuyaux pouvant rentrer les uns dans les autres, pour la commodité du transport. Quand on veut en faire usage, il faut se servir des deux mains pour allonger et mettre au point. M. Porro a imaginé une disposition qui fait disparaître ces inconvénients. Les rayons qui partent de l'objectif O (fig. 1968) se réfléchissent deux fois *totale*ment, dans l'intérieur d'un prisme rectangulaire P ; puis dans un autre prisme semblable P' .

Si les deux prismes avaient leurs arêtes parallèles deux à deux, l'image réelle rejetée devant l'oculaire serait renversée; car, si le premier prisme la redresse, comme on le voit en suivant la marche des rayons Or , Or' , qui passent par le centre optique de l'objectif, rayons qui changent de côté l'un par rapport à l'autre après les deux réflexions dans le prisme P , un changement semblable aurait lieu dans le second prisme. Mais si l'on fait tourner le prisme P' , de 90° , l'image tournera de 90° à chaque réflexion, par conséquent de 180° en tout, et se trouvera redressée sans avoir besoin de verres intermédiaires. Le tube oculaire est alors plus court, et la lunette peut être réduite au quart de la longueur d'une longue-vue de même force. — La ligne pointillée nnn représente l'enveloppe extérieure de l'instrument. Pour mettre au point, on agit avec le pouce de la main qui tient l'instrument, sur une palette p placée en dehors; un petit levier l fait alors mouvoir le tube oculaire, et l'on n'a à faire usage que d'une seule main. — Un réticule, composé de plusieurs fils horizontaux, permet d'évaluer approximativement les distances des objets dont les dimensions sont

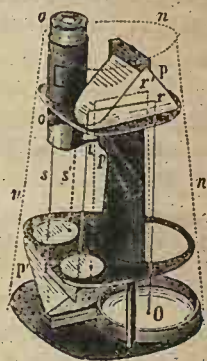


Fig. 1968.

connues. On observe combien l'image de l'objet recouvre de fils parallèles, et la distance correspondante est donnée par une petite table jointe à l'instrument, qui forme ainsi un *télémetre*.

En ajoutant un 3^e prisme, M. Porro ne donne à l'instrument qu'une longueur de quelques centimètres dans le sens de son axe. Un *prisme ménisque* (2538) sert d'objectif, et renvoie verticalement vers le bas les rayons, qui sont ensuite renvoyés de bas en haut par un prisme disposé comme P' (fig. 1968), et logé dans un cylindre vertical par lequel on tient l'instrument. Les rayons sont ensuite renvoyés horizontalement dans l'oculaire, par un troisième prisme à *réflexion totale*.

2812. Lunette de Galilée. — La lunette de Galilée donne les images droites, avec deux verres seulement. L'oculaire *a* (fig. 1969) est divergent, et placé à

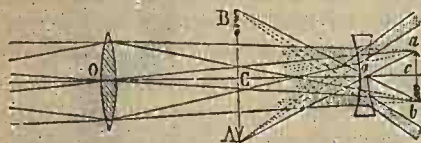


Fig. 1969.

une distance de l'objectif O moindre que son foyer principal. Les rayons qui convergent vers les points de l'image réelle *ab* qui se formerait en l'absence de l'oculaire, sont rendus divergents par cet oculaire, et vont former l'image virtuelle *AB*, dont les extrémités sont situées sur les axes secondaires passant par les points *a* et *b*. On a ombré, sur la figure, les faisceaux qui, partant des extrémités de l'objet, font voir les images *A* et *B* de ces extrémités.

Le grossissement est égal à $\frac{\tan aoc.}{\tan aOc.} = \frac{Oc}{oc} = \frac{F}{a}$, en supposant que la distance *oc* soit égale à la distance focale principale, *a*, de l'oculaire.

Champ. — On voit que les faisceaux s'écartent les uns des autres en sortant de l'oculaire; de sorte que le *champ* est peu étendu. Pour l'avoir le plus grand possible, il faut mettre l'œil tout près de l'oculaire. Le champ se mesure alors par l'angle que tend le diamètre de la pupille, et qui a son sommet au centre de l'objectif. Il ne dépend donc pas de la grandeur de l'oculaire, pourvu que celui-ci ne soit pas moindre que la pupille; et il peut être représenté par le diamètre de la pupille divisé par la distance des deux verres.

Distance des verres. — On peut demander quelle doit être cette distance, *x*, pour qu'on voie nettement. La formule des lentilles appliquée à l'oculaire divergent recevant des rayons convergents, est $-\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{a}$; dans laquelle *p* est égal à *oc* (fig. 1969) ou à $F - x$, et *p'* représente la distance *D* de la vision distincte; on a donc $\frac{1}{F-x} + \frac{1}{D} = \frac{1}{a}$; d'où $x = F - \frac{aD}{D-a}$. La distance $x = Oo$ est donc d'autant plus courte que *D* est plus petit; les myopes devront donc rapprocher les deux verres, et les presbytes, les éloigner, comme pour la lunette astronomique.

Achromatisme. — L'oculaire étant divergent et l'objectif convergent, leurs dispersions se font en sens inverse; si donc on fait l'oculaire en flint, et l'objectif en crown, on pourra obtenir l'achromatisme. Mais alors le grossissement ne serait que 1,25. Alors on achromatise *partiellement* l'objectif en l'appliquant sur une lentille de flint, ce qui permet de disposer des courbures de l'oculaire, de manière à obtenir de plus forts grossissements. C'est ce que l'on fait dans les *lorquettes de spectacle*, pour lesquelles on préfère le système de Galilée, afin d'avoir un instrument très-court, la distance de l'oculaire à l'objectif étant moindre que la distance focale de ce dernier. — L'idée de réunir deux lunettes pour regarder avec les deux yeux s'est présentée de bonne heure; car les États de Hollande demandèrent à Lipperson de la réaliser, ce qu'il fit facilement avec les faibles instruments qu'on savait construire alors.

2813. Lunette à prismes. — Blair, Amici, Brewster ont obtenu, sans lentille, une image grossie des objets éloignés. Nous savons qu'on peut, à travers un prisme, voir les objets allongés, en s'écartant dans un certain sens de la position du minimum de déviation (2573). Si donc, on regarde à travers deux prismes achromatiques égaux perpendiculaires l'un à l'autre, l'image des objets sera agrandie dans deux directions perpendiculaires l'une à l'autre, et, par conséquent, grossie dans tous les sens. On peut obtenir ainsi une amplification de 3 ou 4 fois.

2814. Historique. — C'est par la combinaison d'un verre divergent avec un verre convergent que les lunettes grossissantes ont été découvertes. On a voulu en attribuer l'invention aux anciens, en s'appuyant sur un manuscrit de la fin du douzième siècle, où Ptolémée est représenté regardant les astres à travers un tuyau; mais Aristote parle de l'avantage qu'il y a à regarder au loin à travers un long tube pour éviter la lumière diffuse. Ce n'est qu'au seizième siècle qu'on trouve les premiers indices de la connaissance des lunettes.

Frasicator écrit, en 1538, qu'on voit les objets plus grands et plus proches « à travers deux verres placés l'un sur l'autre »; mais rien n'autorise à supposer que ces verres étaient éloignés l'un de l'autre. On cite un autre passage du même auteur, dans lequel il est dit que la lune paraît très-proche vue à travers un verre *très-dense*; mais il n'est question que d'un seul verre; et l'expérience prouve que les objets éloignés, vus à travers une lentille à très-long foyer, paraissent grossis, mais très-confus.

D'après P. Borrel, qui a publié un livre sur l'origine du télescope, en 1655, l'invention de cet admirable instrument aurait été faite fortuitement en 1590, par un fabricant de besicles de Middelbourg, nommé Zacharie Jansen ou Hansen. Ses enfants ayant regardé par hasard à travers deux verres, l'un convergent et l'autre divergent, virent le coq du clocher voisin beaucoup plus grand et beaucoup plus rapproché qu'à l'œil nu, et firent part de cette singularité à leur père; la *lunette batave* ou de *Hollande*, comme on l'appela d'abord, était dès lors inventée. Quelques années après, un de ces instruments fut offert au prince Moritz de Nassau. La nouvelle de cette découverte s'étant répandue, un étranger

voulut prendre des informations auprès de Jansen, et s'adressa par erreur à un autre lunetier, nommé Jean-Lippershey ou Lipperson, qui demeurait à côté; par ses questions, il lui donna lieu de deviner la construction de l'instrument. Lippershey demanda, en 1606, aux Etats Généraux, un brevet pour cette invention, qu'il divulgua, tandis que le prince Moritz voulait qu'elle restât secrète pour s'en servir dans la guerre avec les Provinces Unies; ce qui fait que plusieurs auteurs ont regardé Lipperson comme l'inventeur. Enfin, on a voulu attribuer les premières lunettes à J. Metius ou Metz, et à Drebbel; mais il est constant qu'ils n'ont fait que les répandre, après en avoir acheté quelques-unes de Jansen. On a encore nommé Antoine de Dominis et Porta. Or, le premier n'a écrit sur ce sujet qu'en 1611, un an après que Galilée eut construit sa première lunette; quant au second, il dit simplement que la lentille convergente faisant voir les objets plus grands, et la lentille divergente, plus petits mais plus clairs, en combinant ces deux lentilles, on devra voir plus grands et plus distincts les objets éloignés. Mais Porta n'indiqua pas la manière de combiner les verres, et toute la question est là; de plus, la manière dont il raisonne prouve qu'il n'a pas fait l'expérience.

Galilée, ayant entendu parler de la lunette grossissante, en devina la construction, vers 1609, et eut l'idée heureuse de la tourner vers le ciel. C'est alors qu'il découvrit les taches du soleil, les montagnes de la lune, les phases de Vénus, les étoiles de la voie lactée, les nébuleuses.... Ces découvertes se succédaient si rapidement, qu'il crut devoir publier un écrit périodique; *Nuntius sidereus*, pour les faire connaître au monde savant. La plus forte lunette qu'il ait employée, avait 4 pieds de long, et ne grossissait que 30 à 32 fois.

Kepler, en 1611, trouva, par la théorie, la lunette à oculaire convergent; mais il ne l'expérimenta pas. Ce fut le P. Scheiner qui la construisit le premier. Pour éviter l'aberration chromatique, il fallait donner à l'objectif un très-long foyer; on l'installait d'une manière mobile au haut d'un mât, et on liait l'oculaire à cet objectif par une barre de bois; ou bien on le tenait à la main. Il n'y avait pas de tuyau, et l'observateur était obligé de se déplacer sur d'immenses échafaudages ou sur des échelles, pour suivre les astres dans leurs mouvements. C'était là ce qu'on appelait une *lunette aérienne*. La plus grande avait été construite par Auzout; elle avait près de cent mètres de longueur focale, et ne grossissait pas plus de 600 fois.

La découverte des lentilles achromatiques, par Dollond, vers 1760, a permis de réduire énormément ces longueurs excessives, et depuis que Guinaud a trouvé moyen d'obtenir de larges disques de verre, et que L. Foucault a appris à les travailler avec sûreté, on a augmenté peu à peu le diamètre des objectifs. Trois réfracteurs armés d'objectifs de 38^{cm}, avec 7 ou 8^m de longueur focale, établis, de 1838 à 1860, aux observatoires de Pulkowa, de Paris et de Cambridge (Amérique), ont été d'abord regardés comme difficiles à dépasser. Bientôt, cependant, on est arrivé à 66^{cm}, en 1872, en Amérique, puis à 69^{cm}, avec 10^m de longueur focale et un grossissement de 2,000 diamètres. Enfin, le plus grand

réfracteur qui existe actuellement est celui de l'observatoire de Washington, qui porte un objectif de 71^{cm},12, et avec lequel ont été découverts, par M. Hall, deux satellites de Mars, en août 1877.

2815. TÉLÉSCOPES DE RÉFLEXION. — L'idée d'employer, au lieu de lentille, un miroir sphérique concave, pour former l'image aérienne destinée à être grossie par l'oculaire, s'est présentée peu de temps après l'invention des lunettes; car le P. Mersenne en parla à Descartes, et le P. Zucchi écrivait, en 1652, qu'il y avait songé dès 1616. Mais la tête de l'observateur placé devant le miroir pour observer l'image aérienne, interceptait la majeure partie de la lumière incidente. Gregori, en 1663, a fait disparaître cet inconvénient au moyen d'un second miroir concave. Néanmoins, la grande perte de lumière qu'occasionne la réflexion, avait fait attacher peu d'importance à ces divers essais, lorsque Newton, après avoir reconnu l'*aberration chromatique* des lentilles, comprit tout l'avantage des miroirs, avec lesquels elle n'existe pas. En 1672, il présenta

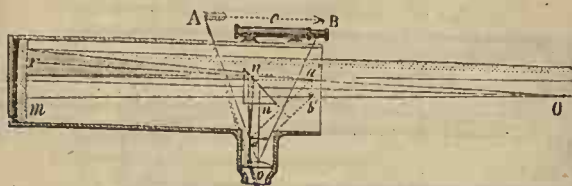


Fig. 1970.

à la Société royale de Londres un télescope à réflexion, conservé depuis comme une relique, et qui l'emportait notablement sur les lunettes de mêmes dimensions d'alors, tant pour la netteté des images que pour le grossissement.

Les miroirs des télescopes se font avec un alliage cassant, qui réfléchit 60 pour 100 environ de la lumière incidente; il est formé de cuivre et d'étain, avec un peu d'arsenic et de platine¹. Rochon a fait des miroirs en platine contenant 0,2 d'alliage, qui lui ont donné les meilleurs résultats. Aujourd'hui, on en fait en *argentan* ou *speculum* (8 cuivre, 3 nickel, 3,5 zinc); et enfin en verre argenté (2819).

Télescope de Newton. — Cet instrument se compose d'un miroir sphérique concave *mr* (fig. 1970) dont le centre est en *O*, et qui réfléchit les rayons partant d'un objet éloigné, de manière à en donner une image réelle *renversée a'b'*, située un peu au-delà du foyer principal. Mais avant le lieu de cette image, les rayons convergents qui tendent à la former, sont reçus par un petit miroir plan *nn*, incliné de 45° sur l'axe principal du miroir sphérique, de manière que l'image

¹ Les proportions de ces métaux ne sont pas toujours les mêmes. Passement indique 20 de cuivre, 9 d'étain et 8 d'arsenic blanc; Hadley, 2 de cuivre, 4 de laiton et 4 d'étain; Edwards, 32 de cuivre, 45 d'étain, 1 de laiton, 1 d'argent, 1 d'arsenic. Cette dernière composition est la plus réfléchissante, mais elle est trop cassante pour les grands miroirs.

réelle est rejetée latéralement et symétriquement en a , où on l'observe au moyen de l'oculaire o . Le miroir m est ordinairement remplacé par un prisme rectangulaire à réflexion totale, dont on a beaucoup exagéré les dimensions sur la figure, ainsi que celles de l'oculaire; ce qui a été fait également sur les deux figures suivantes.

On a ombré, sur la figure, le pinceau, qui, réfléchi en r par le miroir m , puis par le prisme m , entre en o dans la pupille, et fait voir l'image A de l'extrémité de l'objet correspondant au point a' de l'image réelle.

Si l'on représente par F et f les distances focales du miroir m et de l'oculaire, le grossissement sera $F : f$, comme pour la lunette astronomique. — L'observateur ne regardant pas dans la direction de l'objet, un chercheur c (2803) est indispensable pour pointer l'instrument.

2816. Télescope de Gregori. — Ce télescope présente le double avantage de se diriger vers l'objet à observer et de donner les images droites. Le miroir

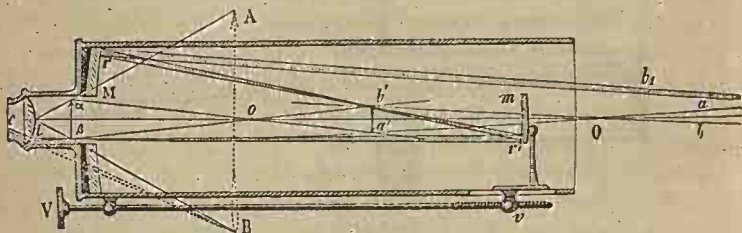


Fig. 1971.

concave M (fig. 1971) est percé, à son centre de figure, d'une ouverture à laquelle on ajuste le tube oculaire. Au-delà de l'image focale réelle $a'b'$ est disposé un petit miroir sphérique concave m , à une distance telle que l'image $a'b'$ soit entre son foyer principal et son centre o , de manière que la distance des deux miroirs soit un peu plus grande que la somme de leurs distances focales. Les rayons, qui se croisent aux différents points de l'image $a'b'$, sont réfléchis par le miroir m , et vont faire en $\alpha\beta$, au-delà du centre o , une image renversée de $a'b'$. Cette image $\alpha\beta$, réelle et grossie (2170), est observée avec l'oculaire l . La position de l'image $\alpha\beta$ dépendant de la distance de $a'b'$ au miroir m , on met au point en déplaçant ce dernier au moyen d'une vis de rappel Vv . — On a ombré, sur la figure, le pinceau de rayons $b_1r'b'zle$, qui, partant de l'extrémité inférieure de l'objet, fait voir son image en B .

Calcul du grossissement. — Le grossissement dépend des courbures des deux miroirs, de leur distance, et du foyer f de l'oculaire. Si cet oculaire était employé à grossir directement l'image $a'b'$, le grossissement serait $F : f$, comme pour le télescope de Newton. Mais il faut ici le multiplier par le grossissement occasionné par le petit miroir m . Or, le rapport entre les images $a'b'$ et $\alpha\beta$ est

égal à $\frac{a}{p-a}$ (2470), a étant le foyer du miroir m , et p la distance $a'm$.

En appelant d la distance des miroirs, et supposant que l'image $a'b'$ soit au foyer principal du miroir M , on a $p = a'm = d - F$. Substituant, il vient

$\frac{a}{p-a} = \frac{a}{d-F-a}$. Le grossissement total est donc $\frac{F}{f} \times \frac{a}{d-F-a}$. On voit

qu'il dépend de la distance des miroirs. — Quand on éloigne le miroir m , son centre o se rapprochant de l'image $a'b'$, l'image $\alpha\beta$ se rapproche aussi de o et s'éloigne de l'oculaire; c'est ce qu'il faut faire pour les vues longues. Au contraire, on rapproche le miroir m pour les vues courtes.

2817. Télescope de Cassegrain. — Cet instrument diffère du télescope de Gregori en ce que le petit miroir, n (fig. 1972), est convexe et placé entre le grand miroir mm et le lieu où se ferait l'image focale $a'c'$. Les rayons que reçoit le miroir n étant convergents, si la distance na' est moindre que sa distance focale (2465), il donnera une image réelle ac , que l'on observera à la

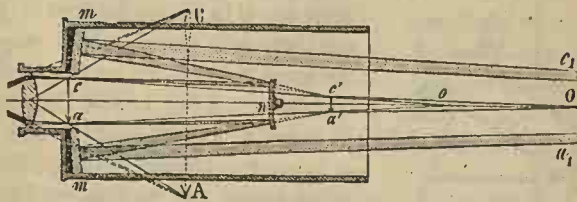


Fig. 1972.

loupe. Le centre du miroir n étant en o , les extrémités de cette image seront situées sur les axes oa' , oc' ; elle sera donc renversée comme $c'a'$. Le télescope de Cassegrain est peu employé, quoiqu'il soit plus court que le télescope grégorien, et que les aberrations de sphéricité des deux miroirs se compensent en partie. On voit, sur la figure, les pinceaux a_1 , c_1 , qui, partis des extrémités de l'objet, font voir leur image A et C .

2818. Grands télescopes. — La découverte des lentilles achromatiques avait fait généralement renoncer aux télescopes de réflexion. On leur reproche de donner peu d'éclat à l'image, à cause de la perte de lumière dans la réflexion; aussi faut-il donner au grand miroir une largeur double de celle d'un objectif lenticulaire capable de supporter le même grossissement. En outre, les miroirs se ternissent rapidement et sont d'un poids incommode, parce qu'ils doivent être très-épais, à cause de leur fragilité. Plus tard, la difficulté d'obtenir de grands disques de verre a fait revenir aux miroirs.

Télescope d'Herschel. — W. Herschel, d'abord simple amateur, se livra avec ardeur à la construction de télescopes de plus en plus puissants. Il polissait lui-même ses miroirs par des procédés particuliers, de manière à leur donner la courbure la plus favorable. D'abord, il renvoya l'image latéralement; mais,

plus tard, en 1786, il supprima le prisme et se contenta d'incliner légèrement le miroir, *m*, sur l'axe de l'instrument (*fig. 1973*), comme l'avait déjà fait Jacques Lemaire, en 1728, de manière que le miroir, formant comme une portion d'un miroir plus grand dont l'axe principal serait l'arête inférieure du tuyau, l'image se formait près du bord de l'ouverture, où se trouvait l'oculaire *o*; c'est ce qu'il appelait *front-view telescope*. W. Herschel a reconnu que la suppression de la réflexion sur le miroir plan augmentait la force pénétrante de certains télescopes, dans le rapport de 4 à 5 environ, de manière à permettre de distinguer des astres très-faibles, invisibles quand il y avait une seconde réflexion. C'est par centaines qu'il faut compter les miroirs travaillés par W. Herschel. Il en construisit 200 de 2^m, 13 de foyer; 150 de 3^m; 80 de 6^m. Après avoir fait de nombreuses découvertes dans le ciel, il entreprit un miroir de 10^m de foyer; puis, encouragé par le roi Georges III, il en commença, en 1785, un de 12^m de foyer et de 1^m, 47 de largeur, qui fut amené à sa dernière perfection en 1789.

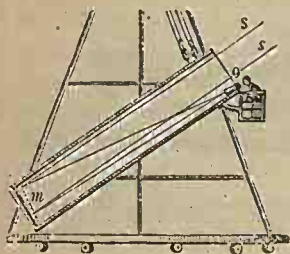


Fig. 1973.

parvenir à le voir distinctement avec de semblables grossissements. Le miroir, *m* (*fig. 1973*), était placé au fond d'un tuyau en tôle, soutenu par un système de mâts inclinés, portés eux-mêmes par une plate-forme de 13^m de diamètre, pouvant tourner sur 24 rouleaux. Un système de cordages et de poulies permettait de faire varier l'inclinaison du tuyau, et l'observateur se plaçait dans une petite galerie suspendue à son ouverture. On trouve dans l'*Histoire des mathématiques* de Montucla, t. III, un dessin, souvent reproduit, de cette immense machine, dont il ne reste plus que des ruines, et qui était installée à Slough, entre Londres et Windsor, « le lieu du monde où il a été fait le plus de découvertes dans le ciel. »

Télescope de lord Rosse. — Lord Rosse a construit à ses frais, en 1842, à Birr ou Parsonstown, en Irlande, un télescope dont les proportions dépassent celles du grand télescope d'Herschel. Le miroir a 1^m, 83 de largeur, 16^m, 76 de foyer, et pèse 3800 kil. Lord Rosse, qui l'a travaillé lui-même par des procédés de son invention, a dû, pour faire disparaître l'aberration, s'éloigner un peu de la forme sphérique, mais d'une quantité tellement petite qu'elle n'est que de 0^{mm}, 0025 près du bord. Le tuyau en bois cerclé de fer, pèse 6600 kil.,

ce qui fait, avec le miroir, 10400 kil. Il est installé entre deux murs parallèles au méridien, entre lesquels il peut s'abaisser ou s'élever et recevoir un mouvement latéral restreint, au moyen de chaînes passant sur des poulies et s'enroulant sur des treuils. L'extrémité inférieure du tuyau repose sur une pièce à charnière en fonte à double mouvement, fixée sur un massif de pierre solidement fondé¹.

On voit combien était compliqué le mécanisme au moyen duquel les deux télescopes que nous venons de citer étaient mis en mouvement. Depuis, on a rendu très-simple l'installation des grands instruments, en montant l'énorme tuyau sur un pied parallactique, et l'équilibrant sur les deux arbres de rotation au moyen de contre-poids, de manière qu'on peut le faire tourner à la main, et qu'un moteur à poids suffit pour lui faire suivre l'astre dans son mouvement autour de l'axe du monde.

Le grand télescope que M. Lassell a fait construire à ses frais, et installé dans l'île de Malte, est ainsi monté. Il est dans le système de Newton; le miroir métallique a 1^m,20 de diamètre. Le tuyau, à jour pour le rendre moins lourd, est long de 10 mètres. Une espèce de tour en bois, qui s'élève sur une plate-forme annulaire appuyée sur des rouleaux, et entourant l'instrument, est amenée du côté de l'oculaire, à la hauteur duquel l'observateur est hissé sur une petite galerie mobile qui peut monter et descendre le long de la tour.

Un autre grand appareil, dans le système de Cassegrain (2817), avec lequel l'observateur n'a pas à se déplacer, a été construit par M. Grubb, à Dublin, et installé à Melbourne (Australie) pour étudier le ciel austral. Le miroir, percé, a 1^m,20 de diamètre et pèse 1590 kil.; le tuyau, à jour, formé de bandes croisées, a 9^m de longueur. Le pied parallactique est porté par des massifs de maçonnerie, et tellement bien équilibré qu'on peut, avec la main, le faire passer, en 20 secondes, de la position verticale à la position horizontale.

2819. Télescopes à miroir de verre argenté. — Les miroirs métalliques se ternissent assez rapidement, et, quand on veut les repolir, il faut, pour n'en pas modifier sensiblement la courbure, refaire le travail par lequel on les a formés. Aussi, les télescopes étaient-ils peu répandus, lorsque L. Foucault, en 1857, les a remis en faveur en substituant aux miroirs métalliques, des miroirs en verre, matière légère et facile à travailler, et les recouvrant d'une couche d'argent, qui n'en altère pas la courbure et peut être renouvelée sans difficulté.

L. Foucault a imaginé une méthode par retouches successives, pour donner à ces miroirs la forme parabolique, méthode qu'il a étendue ensuite à la taille des objectifs lenticulaires. Il a pu, par ce moyen, réduire de beaucoup la longueur focale, tout en faisant disparaître l'aberration de sphéricité. Après avoir donné au miroir la forme sphérique, il lui donne une forme elliptique de plus en plus allongée, par des retouches locales. Un point lumineux étant placé un peu en-deçà

¹ Bibliothèque universelle de Genève (1845), p. 57.

du centre, on polit la surface du miroir jusqu'à ce que l'image focale, qui se forme un peu au-delà de ce centre, soit bien nette; puis, rapprochant le point lumineux du miroir, on recommence l'opération de manière à lui donner une forme elliptique plus allongée; et ainsi de suite, jusqu'à obtenir la forme *parabolique*. Ces miroirs, argentés en dedans par le procédé Drayton plus ou moins modifié, donnent une netteté et une clarté surprenantes¹. D'après M. Steinheil, qui, de son côté, avait eu, dès 1856, l'idée des miroirs en verre argenté, la proportion de lumière réfléchiée est environ trois fois plus grande, sous l'incidence de 45°, qu'avec les meilleurs miroirs en alliage ordinaire. M. C. Wolf, au moyen de son photomètre (2429), a trouvé qu'une glace argentée réfléchit 0,93 de la lumière incidente, quel que soit l'angle d'incidence. Foucault a constaté qu'un de ses miroirs, ayant 41^{cm} de diamètre et 52^{cm} de foyer, supporte un grossissement de 150 à 200 fois, avec une lumière suffisante pour les objets terrestres. Un réfracteur équivalent devrait avoir 9^{cm} de diamètre, être deux fois plus long, et coûterait plus du double. Avec un miroir de 33^{cm} de diamètre seulement et de 2^m,25 de foyer, on a pu dédoubler l'étoile bleue qui accompagne γ d'Andromède, résultat qui ne pouvait s'obtenir qu'avec les plus grands réfracteurs.

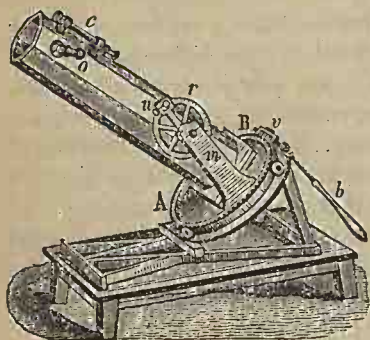


Fig. 1974.

Les télescopes Foucault sont dans le système de Newton, et montés sur pied parallactique. La figure 1974 en représente un modèle portatif. AB est un large disque gradué (*cercle équatorial*) pouvant tourner sur des galets, autour d'un axe passant par son centre et parallèle à l'axe du monde. Deux montants, *m*,... portent un axe parallèle au disque et autour duquel le tuyau peut basculer. Le cercle gradué, *r* (*cercle de déclinaison*), sert à lui donner la position qui correspond à la déclinaison de l'astre. En *o*, est l'oculaire, formé d'un microscope composé achromatique, dont l'objectif est très-rapproché du prisme réflecteur. Celui-ci peut ainsi être très-petit et placé très-près du foyer du miroir concave fixé au fond du tuyau. Ce microscope présente, en outre, l'avantage de ne pas apporter d'aberration chromatique dans une image qui en est complètement dépourvue. En *c* est un chercheur, et en *b* une manette, au moyen de laquelle on fait tourner une vis sans fin *v*, qui fait mouvoir le cercle équatorial de manière que l'instrument suive l'astre dans son mouvement.

En 1864, Foucault a fait construire, dans les ateliers de M. Secrétan, un de

¹ Voir, pour le procédé au sucre interverti de M. A. Martin, et la manière d'opérer, *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XV, p. 94.

ces télescopes dont le miroir de verre a 80^{cm} de diamètre, un foyer de 4^m, 80, et pèse 650 kil. Ce magnifique appareil, installé à l'observatoire de Marseille, est monté sur un pied parallactique en charpente, dont on voit la disposition

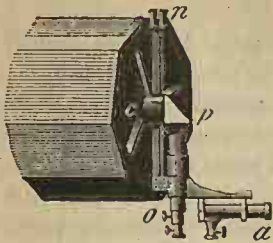


Fig. 1975.

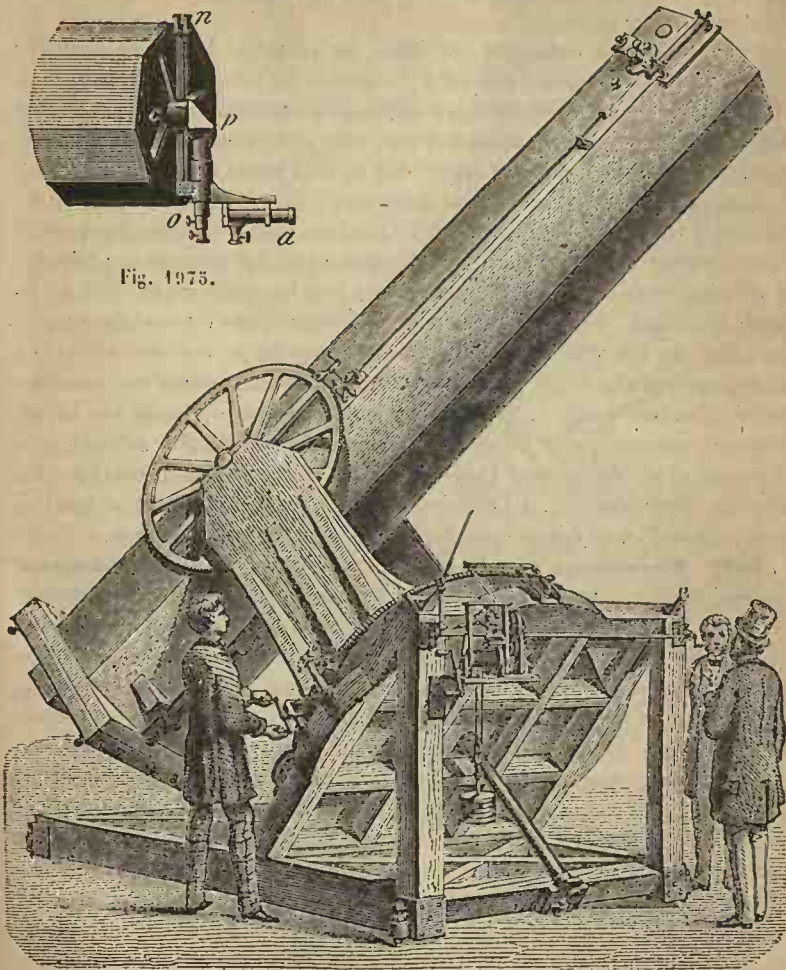


Fig. 1976.

(fig. 1976). On y reconnaît facilement toutes les pièces indiquées dans la figure 1974. Le tuyau est en bois, et l'on distingue, derrière le cercle équatorial, une horloge à poids qui le fait tourner de manière à suivre l'astre dans son mouvement. Cet instrument, qui n'a coûté que 30,000 fr., a permis de voir

dans le ciel tout ce qu'Herschel et Rosse ont vu avec leurs immenses télescopes. Un appareil semblable à celui de Marseille a été, depuis, installé à l'observatoire de Toulouse. — Malgré l'épaisseur du miroir, il a fallu l'appuyer sur un sac en caoutchouc gonflé d'air, qui le soutient et l'empêche d'éprouver, sous son propre poids, des flexions qui, malgré leur excessive faiblesse, peuvent cependant déformer l'image focale.

L. Foucault avait commencé, en 1868, un miroir de 1^m,20 de diamètre, lorsque la mort est venue l'enlever à la science. Ce miroir a été achevé par M. A. Martin, initié par Foucault à la pratique de ses méthodes, et l'appareil a été installé, en 1875, à l'observatoire de Paris, avec pied parallactique, dont l'arbre parallèle à l'axe du monde, est appuyé sur de forts piliers en fonte.

Pour observer avec ces grands télescopes, qui sont dans le système de Newton, l'astronomie doit monter sur un escalier, roulant sur des rails disposés circulairement autour de l'appareil. Si l'oculaire était fixé au corps du télescope, il se présenterait souvent dans des directions pour lesquelles il serait difficile, ou même impossible, d'en approcher l'œil. On a donc rendu cet oculaire mobile, en dehors de l'ouverture de l'instrument, comme on le voit (*fig. 1975*). Le microscope oculaire *o*, est porté par un cercle pouvant tourner sur lui-même autour d'un tube court, *c*, fixé par trois bras au contour du tuyau. Les rayons lumineux renvoyés par le miroir, traversent ce tube et viennent se réfléchir dans le prisme *p*, qui tourne avec l'oculaire, qu'on amène dans la position la plus favorable pour observer. A l'oculaire, est fixé un chercheur coudé *a*, que l'on peut consulter en ne faisant éprouver à l'œil qu'un léger déplacement.

2820. Microscopes catadioptriques. — On peut, dans le *microscope composé*, former, au moyen d'un miroir, l'image réelle qui doit être grossie par l'oculaire. La figure 1970 peut servir à faire comprendre une des dispositions adoptées pour réaliser cette idée. Supposons que, la lentille *o* étant enlevée, on place en *a* l'objet à observer; il s'en formera une image réelle renversée, au-delà du centre *O*, et l'on pourra, en éloignant l'objet *a* du prisme *m*, faire que cette image, grossie, ne soit pas trop éloignée du point *O*. Il restera à placer un oculaire à une distance convenable pour voir nettement cette image réelle, en la grossissant. Les microscopes d'Amici et de Ch. Chevalier sont souvent munis d'une pièce de rechange qu'on met à la place de la pièce *k* (*fig. 1949*), et qui porte à son extrémité un miroir concave, et, au-dessus du porte-objet, un petit prisme qui renvoie vers ce miroir les rayons partant de l'objet.

Le télescope de Cassegrain peut aussi se changer facilement en microscope catadioptrique; il suffit d'enlever l'oculaire (*fig. 1972*) et de mettre l'objet à la place de l'image *ca*, mais beaucoup plus loin du miroir *n*, afin que l'image réelle qu'il formera au-delà du centre *O* du miroir *mm*, ne soit pas trop éloignée; cette image est observée avec un large oculaire. — Les microscopes catadioptriques présentent l'avantage que les objets étant éloignés de l'extrémité de l'instrument, il est beaucoup plus facile d'éclairer en dessus ceux qui sont opaques. — L. Foucault a appliqué ses miroirs argentés aux microscopes catadioptriques.

CHAPITRE VIII

SYSTÈME DES ONDULATIONS — COMPARAISON A CELUI
DE L'ÉMISSION

« Les rayons du soleil que nous sentons ici n'ont jamais été dans le soleil ; ce ne sont que les particules de l'éther qui se trouvent dans nos environs, mais qui sont mises dans une agitation de vibration qui leur est communiquée par une semblable agitation du soleil même, sans qu'elles changent sensiblement de place. »

(EULER, *Lettres à une princesse d'All.*, 3^e part., L., 2.)

§ 1. — DU SYSTÈME DES ONDULATIONS

I. Principes de la théorie des ondulations.

2821. — Jusqu'à présent, nous avons rattaché tous les phénomènes lumineux à quelques faits élémentaires et à leurs lois données par l'expérience. Nous allons maintenant examiner comment ces faits eux-mêmes peuvent s'expliquer, en partant des hypothèses que l'on a faites sur la nature de l'agent lumineux. Nous avons vu qu'il n'y a plus que deux systèmes en présence : celui des *ondulations* et celui de l'*émission*. Nous examinerons comment la réflexion, la réfraction et la dispersion peuvent s'expliquer dans ces deux systèmes ; nous les comparerons l'un à l'autre, et après avoir montré que le second ne peut s'accorder avec les faits, nous adopterons le premier, pour nous servir de guide dans l'étude des phénomènes qui nous resteront à étudier.

2822. Hypothèse de l'éther. — Dans le système des ondulations, dont nous avons déjà fait connaître les bases (2389), on admet que l'impression de lumière est produite par les *vibrations de l'éther* venant ébranler la membrane nerveuse étendue au fond de l'œil. Nous avons parlé, au livre de la chaleur (II, 812), de l'hypothèse de l'éther, milieu universel, très-élastique et très-peu dense, dont l'existence est prouvée par la propagation même de la lumière à travers l'espace. Sa densité est tellement faible, que sa résistance n'a pas modifié sensiblement le mouvement des planètes depuis l'époque où l'on a commencé à les observer. Mais les comètes, dont la matière est tellement rare que Babinet a pu les appeler « des riens visibles », et qui se meuvent avec une très-grande vitesse quand elles s'approchent de leur périhélie, semblent ressentir les effets de la résistance de l'éther, ce qui prouverait son inertie et, par conséquent, sa matérialité. — L'éther remplit les pores des corps pondérables, qui le condensent

autour de leurs molécules, où il possède une densité plus grande que dans le vide. Cette densité, différente d'un corps à l'autre, peut aussi varier dans un même corps, quand il n'est pas homogène.

Les molécules des *corps lumineux* sont animées de mouvements vibratoires particuliers, d'une amplitude insensible, se communiquant à l'éther, qui les propage avec une vitesse de 75000 lieues par seconde environ (2406); de même que l'air transmet les vibrations des corps élastiques avec une vitesse de 337^m. De la rapidité plus ou moins grande de ces vibrations résultent les différentes couleurs; et de leur amplitude, l'intensité de la lumière.

Le mode de propagation des ondulations lumineuses doit se concevoir comme celui des ondes sonores, et tout ce que nous avons dit de ces dernières, de la longueur d'ondulation, de la surface de l'onde, du croisement des rayons et du principe de la coexistence des petites oscillations (I, 581), s'applique aux vibrations de l'éther. — Il y a cependant une différence fondamentale à laquelle les faits nous conduiront plus tard; c'est que les mouvements vibratoires de l'éther, au lieu de s'accomplir perpendiculairement à la surface de l'onde, ou suivant la direction de la propagation, ont lieu transversalement à cette direction, comme les ondes formées à la surface de l'eau. Nous n'aurons, du reste, à considérer la direction particulière des mouvements vibratoires que dans les chapitres où nous traiterons de la *polarisation* de la lumière, les questions que nous étudierons d'abord en étant entièrement indépendantes.

La formule de Newton $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$, qui exprime que la vitesse de propagation du mouvement vibratoire est égale à la racine carrée du rapport de l'élasticité à la densité du milieu ébranlé (I, 585), nous montre que, v étant égal à 75000 lieues par seconde, l'élasticité de l'éther doit être très-grande, et sa densité excessivement petite.

On voit que, dans la théorie des ondulations, la lumière n'est pas une matière, pas plus que le son, mais un mouvement vibratoire excité dans l'éther. Les phénomènes et leurs lois découlent directement de cette théorie; ils en sont des conséquences nécessaires. On lui a appliqué le calcul, et les résultats auxquels on est arrivé ont toujours été d'accord avec ceux de l'expérience, même dans leurs valeurs numériques, ce qui est le cachet d'une bonne théorie. Enfin, les phénomènes s'expliquent si naturellement qu'on aurait pu les prévoir par le raisonnement, comme cela a eu lieu, du reste, dans plusieurs circonstances, où la théorie a devancé l'expérience.

Pendant longtemps, la théorie des ondulations a été peu goûtée, à cause de la difficulté que l'on trouvait à concevoir les mouvements vibratoires, et de l'impuissance dans laquelle s'est longtemps trouvée l'analyse pour se plier à ces sortes de mouvements, et en représenter les propriétés par des formules. On trouvait aussi des objections dans la comparaison avec la théorie du son, parce qu'on n'avait pu reproduire, avec les vibrations de l'air, les phénomènes correspondant à certaines propriétés de la lumière. Par exemple, Newton a fait remar-

quer que, d'après le système des ondulations, il ne devrait pas y avoir d'ombres, puisque le son contourne les obstacles et se propage derrière eux; mais nous avons vu qu'il n'en est pas toujours ainsi et qu'il y a des *ombres sonores* (I, 610). Nous verrons aussi que, si le *silence* n'est pas complet dans l'ombre sonore, *l'obscurité* n'est pas non plus complète dans l'ombre produite par la lumière. — On a remarqué encore que, le son se propageant dans un tube couronné, dans une gouttière (I, 618), il devrait en être de même de la lumière. Or, c'est précisément ce qui a lieu quand l'intérieur du tube est poli de manière à réfléchir la lumière (2443). — L'impossibilité, dans laquelle on s'était trouvé pendant longtemps, de produire la *réfraction* et l'*interférence* des rayons sonores, avait aussi fait supposer qu'il ne pouvait y avoir analogie entre la lumière et le son. On a aussi présenté quelques autres objections, que nous aurons à examiner, en indiquant comment on y a répondu.

L'analogie entre le mode de propagation de la lumière et celui du son, si frappante quand on considère la réflexion et ses lois, se soutient donc dans les autres phénomènes. Malheureusement, tandis qu'il est facile de mettre en évidence les vibrations des corps sonores et celles qu'ils excitent dans l'air, on ne peut donner de preuve directe des vibrations des molécules des corps lumineux et de celles de l'éther; ce qui tient à la petitesse extrême de l'amplitude de ces vibrations et à la nature toute spéciale du milieu qui les transmet. Mais l'existence de ces vibrations conduit à des conséquences tellement directes que la vérification expérimentale de celles-ci peut être regardée comme une preuve, *à posteriori*, de leur réalité. La plus remarquable, la plus directe de ces conséquences nous est fournie par le *phénomène des interférences*.

Aujourd'hui, la théorie des ondulations, surtout depuis les beaux travaux analytiques de Cauchy, forme un monument scientifique admirable, dont Fresnel a été le Newton, et qui ne le cède en rien à la théorie de la gravitation, tant par la magnificence de l'ensemble que par la perfection des détails.

2823. I. PRINCIPE D'HUYGHENS. — Pour expliquer un grand nombre de phénomènes lumineux dans la théorie des ondes, il faut invoquer deux principes que nous allons d'abord faire connaître : le *principe des interférences* et le *principe d'Huyghens*. Commençons par ce dernier.

Quand un point lumineux *s* (fig. 1977) ébranle l'éther qui l'environne, chaque pulsation donne naissance à une onde sphérique, *mn*, sur toute la surface de laquelle l'éther se trouve au même instant dans la même phase de vibration. Cette surface s'étend progressivement, avec une extrême rapidité, en conservant toujours son caractère, et toutes les normales à cette surface forment autant de rayons lumineux. Il résulte de l'élasticité de l'éther et de la facilité avec laquelle un ébranlement s'y propage, que les vibrations des différents points de la surface de l'onde ne sont pas indépendantes, les unes des autres, et que les rayons ne peuvent être considérés comme marchant isolément. — Cela posé, Huyghens établit en principe qu'on peut regarder tous les points de la surface d'onde, considérée dans une certaine position, *mn*, comme autant de centres d'ébranlement

produisant des ondes sphériques secondaires, qui, s'étendant toutes avec la même rapidité, auront pour *surface enveloppe*, c'est-à-dire pour surface de l'onde générale, une surface sphérique $m'n'$, par laquelle on pourra remplacer la surface mn arrivée à la distance sa du point lumineux s . Il résulte de là que, si l'on considère un point P placé à une certaine distance de la surface mn , on pourra considérer l'ébranlement qui lui est communiqué par cette surface, quand elle l'atteint, comme produit par le concours de toutes les ondes élémentaires émanant des différents points de mn .

Voici comment Fresnel énonce le principe d'Huyghens¹ : *Les vibrations d'une onde lumineuse, dans chacun de ses points, peuvent être regardées comme la résultante des mouvements élémentaires qu'y euvraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde, considérée dans l'une quelconque de ses positions antérieures.*

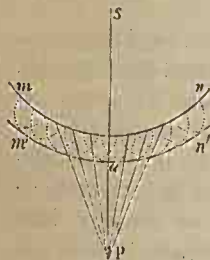


Fig. 1977.

Il résulte de ce principe que, si nous supposons la surface d'une onde, arrivée à une ouverture pratiquée dans un écran, le faisceau transmis ne devra pas être limité à la surface du cône s'appuyant sur le contour de l'ouverture et ayant son sommet au point lumineux, comme l'indique le principe de la propagation en ligne droite, mais que des ondulations devront se propager en dehors de ce cône. C'est, en effet, ce qui a lieu, comme nous le verrons en étudiant la *diffraction*. Quand on oppose à la propagation d'ondes circulaires produites

sur l'eau un mur vertical présentant une ouverture, on a une image de ce qui se passe relativement aux ondulations de l'éther, et l'on voit des ondes se propager au-delà de l'ouverture, comme si chacun des points de la surface de l'eau qui s'y trouvent contenus était un centre d'ondulations. Comme l'ouverture par laquelle passe la lumière a toujours une certaine étendue, et contient, par conséquent, un grand nombre de centres d'ondes secondaires, il arrive que, par la combinaison des ondulations provenant des différents points, la lumière diminue rapidement d'intensité à mesure qu'on s'éloigne des limites géométriques du faisceau passant par l'ouverture, et même cette diminution n'est pas continue, mais se fait par des alternatives de lumière et d'obscurité, comme nous le verrons en étudiant la diffraction.

2824. Onde rencontrant la surface de séparation de deux milieux.

— Quand la surface de séparation de deux milieux est rencontrée par la surface d'une onde lumineuse, le mouvement vibratoire qui réside à cette dernière surface se communique aux molécules de la surface de séparation, et ces molécules, qui agissent à leur tour sur l'éther, deviennent des centres d'ébranlement, d'où naissent deux systèmes d'ondes : les unes qui se propagent dans le premier

¹ Supplément à la Traduction du système de chimie de Thomson, p. 50.

milieu, les autres dans le second, avec des vitesses qui dépendent de la densité qu'y possède l'éther. Ce principe se démontre par l'analyse mathématique; le phénomène du son nous en montre une application sensible: si l'on produit des ondes sonores dans le voisinage d'une corde tendue, d'une membrane, elles entrent en vibration, et, agissant à leur tour sur l'air qui les environne, y produisent des ondes nouvelles, dont l'existence est manifestée par le *timbre* particulier que prend le son.

2825. II. PRINCIPE DES INTERFÉRENCES. — On dit qu'il y a *interférence* entre deux rayons de lumière qui suivent la même route quand ils s'entre-détruisent de manière à produire de l'obscurité. Ce phénomène, tout à fait inexplicable dans le système de l'émission, est une conséquence tellement directe de celui des ondulations qu'il avait été posé en principe avant que l'expérience ne l'eût constaté. Nous avons vu comment l'on a pu le vérifier dans le cas du son (I, 609).

Considérons deux rayons de même intensité ayant des longueurs d'ondulation égales, et suivant sensiblement la même route. Représentons par les ordonnées de courbes *aaa...*, *bbb...* (fig. 1978), les vitesses de vibration qui animent l'éther, à un instant donné, aux différents points de ce rayon, et supposons que la longueur d'ondulation, λ , corresponde à une *vibration complète*, aller et retour, de la molécule d'éther.

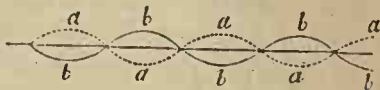


Fig. 1978.

Si les vibrations des deux rayons coïncident, leurs intensités s'ajouteront; mais si, par une cause quelconque, l'un des rayons était retardé par rapport à l'autre d'une demi-longueur d'ondulation $\frac{1}{2}\lambda$, une même molécule d'éther, se trouvant sollicitée en même temps et avec la même force dans deux directions opposées, resterait en repos, et la *réunion des deux rayons produirait de l'obscurité*. Il en serait de même si deux rayons étaient en retard l'un par rapport à l'autre d'un nombre *impair* de fois $\frac{1}{2}\lambda$; au contraire, les intensités s'ajouteraient, si le retard était d'un nombre *pair*. — Si ce retard était d'un nombre fractionnaire de fois $\frac{1}{2}\lambda$, l'intensité lumineuse serait augmentée si la fraction était plus grande que $\frac{1}{4}\lambda$, et diminuée dans le cas contraire. Le *retard* se nomme *différence de marche* ou *de route* des deux rayons l'un par rapport à l'autre.

Si l'intensité des rayons n'est pas la même, il n'y a pas extinction complète, mais seulement un minimum d'intensité égal à la différence des intensités des deux rayons. Enfin, tout cela aurait encore lieu, si les rayons formaient entre eux un angle extrêmement petit.

Le principe des interférences, qui sert à expliquer une multitude de phénomènes, est dû à Thomas Young, qui en a nettement exposé la théorie dans le système des ondulations, et a imaginé le mot *interférence*. Ajoutons que ce mot est aussi employé dans un sens plus général, pour indiquer la combinaison des ondulations de deux rayons suivant sensiblement la même route, quel que soit l'effet résultant

de leur réunion. On a voulu quelquefois attribuer la première idée des interférences à Hooke, qui expliquait la lumière par les vibrations; mais il supposait, comme Descartes, qu'elle se transmettait instantanément, ce qui ne peut se concilier avec des interférences.

2826. Expérience des interférences. — Considérons deux points lumineux s, s' (fig. 1979), très-rapprochés l'un de l'autre, et produisant dans l'éther des ondulations de même longueur, et toujours dans la même phase de vibration au moment où elles naissent à chacun de ces points. Imaginons deux séries de surfaces sphériques ayant s et s' pour centres, et dont les rayons diffèrent deux à deux, de $\frac{1}{2}\lambda$. Ces surfaces couperont le plan de la figure suivant deux systèmes d'arcs, dont les uns o, e, o', e', \dots ayant leur centre en s' , croiseront les autres.

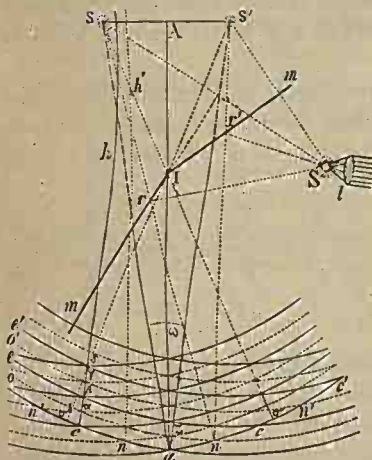


Fig. 1979.

Deux arcs consécutifs, o, e , l'un en points, l'autre en trait continu, sont séparés par un espace égal à $\frac{1}{2}\lambda$, et deux arcs consécutifs tracés en lignes identiques, par un intervalle égal à λ . On a beaucoup exagéré ces intervalles, pour rendre la figure distincte.

Cela posé, considérons le point a placé sur la perpendiculaire Aa menée au milieu de ss' , et assez éloigné de ss' pour que l'angle sas' soit extrêmement petit. Les deux rayons $sa, s'a$ ayant la même longueur, se trouvent en a dans la même phase de vibration, comme aux points de départ, et leurs intensités s'ajoutent. Au point c , où se rencontrent deux arcs en ligne continue, la différence de phase des rayons $sc, s'c$

est égale à λ , les distances $s'c$ et sc différant de cette quantité λ . Les intensités de ces rayons s'ajouteront donc encore; il en sera de même en c' , et partout où deux arcs tracés en trait continu se rencontrent. Mais en n , la différence de route des deux rayons ns, ns' étant $\frac{1}{2}\lambda$, les rayons se trouvent dans des phases contraires; il y aura donc opposition dans le sens des ébranlements imprimés à l'éther, et par suite, obscurité. Il en sera de même en n' , où la différence de route est $\frac{3}{2}\lambda$, et en général dans tous les points où se coupent deux arcs tracés avec un trait différent. La distance ss' étant très-petite, par rapport à Aa , la surface an' se confond sensiblement avec un plan. Si donc, on place en an' un carton blanc, on aura dans le plan de la figure une série d'espaces lumineux $c, c' \dots$ séparés par des espaces obscurs $n, n' \dots$

Si au lieu de points lumineux, on suppose en s, s' deux traits lumineux perpendiculaires au plan de la figure, on aura en an' une série de bandes parallèles

à ces traits, alternativement lumineuses et obscures, et désignées sous le nom de *franges*. — Ces franges passent des unes aux autres d'une manière continue, la différence de marche, dans les points intermédiaires, variant aussi d'une manière continue d'une fraction de $\frac{1}{2} \lambda$ (2825).

Si l'on intercepte les rayons qui viennent d'une des sources lumineuses, les franges disparaissent, l'intensité aux points éclairés diminuant de moitié, et la lumière reparaisant dans les parties obscures. Si l'on enlève l'écran, l'obscurité reparaitra aux points qu'occupaient ces dernières; d'où l'on voit que *de la lumière ajoutée à de la lumière peut produire de l'obscurité*.

Trajectoire hyperbolique des franges. — Si l'on rapproche le carton, des points s, s' , les franges du même ordre, $c, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots$ par exemple, se rapprocheront peu à peu de la ligne Aa , et comme la différence des distances des points $c, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots$ aux points s et s' est constante et égale à λ , on voit que ces points seront sur une branche d'hyperbole ch , dont les foyers sont en s et s' . — Il nous reste à montrer comment on réalise les conditions expérimentales nécessaires pour obtenir les franges d'interférence.

2827. Expérience de Grimaldi et Young. — La première condition à remplir est d'avoir deux points lumineux, ou deux traits lumineux parallèles, émettant de la lumière simple et donnant des pulsations de même rapidité et d'accord entre elles, c'est-à-dire toujours dans la même phase de vibration; c'est ce que l'on réalise dans l'expérience des deux trous de Grimaldi et Young, et dans celle des miroirs de Fresnel.

1° Supposons que s, s' (*fig.* 1979) soient deux fentes parallèles très-étroites recevant de la lumière simple d'un trait lumineux placé au-dessus, à égale distance des fentes et parallèlement à leur direction. Les parties de chaque surface d'onde cylindrique, se présentant aux deux fentes, pourront, d'après le principe d'Huyghens (2823), être considérées comme des centres d'ébranlement dont les pulsations seront nécessairement d'accord, et l'on observera la série de franges obscures et lumineuses satisfaisant à toutes les conditions que nous venons de détailler; mais elles seront peu brillantes.

Si l'on couvre d'un écran l'une des fentes, s , les rayons qui passent par l'autre, s' , répandront en $n'n'$ une lumière uniforme, et si l'on enlève l'écran, l'obscurité reparaitra dans les points où se forment les franges obscures, par le concours des rayons provenant des deux fentes. Ce résultat, inexplicable dans le système de l'émission, avait été observé par Grimaldi, dès 1665; mais ce n'est que plus tard que Young en a donné l'explication par les ondulations.

Quant au moyen d'obtenir un trait lumineux très-brillant, et à la manière d'observer et de mesurer les franges pour constater leur trajectoire hyperbolique, on procède comme dans l'expérience suivante.

2828. 2° Expérience de Fresnel. — Pour obtenir deux traits dont les pulsations soient toujours d'accord, Fresnel les remplace par les images d'un seul trait lumineux, formées dans deux miroirs plans. Une lentille cylindrique à très-court foyer, dont la section droite se voit en l (*fig.* 1979), reçoit un faisceau

de lumière solaire tamisée à travers une lame de verre rouge. Cette lentille donne une ligne focale très-étroite S , qui doit être parallèle à l'intersection des deux miroirs plans Im, Im , en métal ou en verre noir, à pêne inclinés l'un sur l'autre, pour que les images s, s' soient très-rapprochées. Les rayons réfléchis sont dans le même cas que s'ils partaient des images s, s' , et ils donnent, sur un écran placé en an' , des franges alternativement brillantes et obscures. C'est Arago qui a eu l'idée d'employer une lentille cylindrique, avec laquelle les franges sont bien plus vives qu'avec une lentille sphérique.

Ces franges, d'abord nettes, deviennent peu à peu confuses, à mesure qu'on s'éloigne de celle du milieu, c'est-à-dire à mesure que la différence de marche des deux rayons qui se combinent est plus considérable; nous verrons plus loin pourquoi (2833).

2829. Franges irisées. — L'expérience montre que les franges sont d'autant plus serrées que la lumière simple qu'on emploie est plus réfrangible.

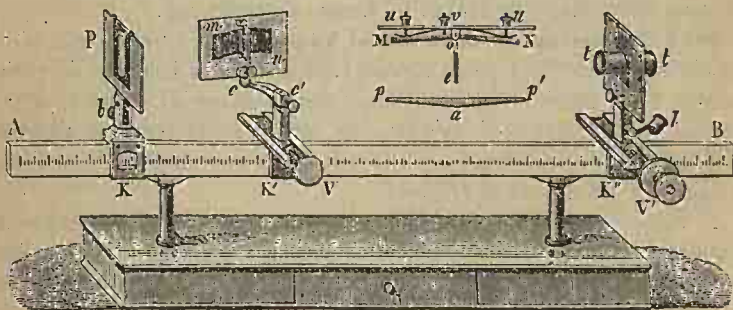


Fig. 4980. — 1/12.

On en conclut que la longueur d'ondulation est aussi d'autant plus petite. En effet, soit 2Λ la distance ss' (fig. 4979), y et x les coordonnées, par rapport à Λa et ss' d'un point n' d'une frange de rang m , et l, l' la distance de cette frange aux points s et s' , de manière qu'on ait $l - l' = m\lambda$. On a $l^2 = \sqrt{y^2 + (\Lambda + x)^2}$, $l'^2 = \sqrt{y^2 + x - \Lambda)^2}$; d'où, en calculant les racines et négligeant les puissances de x , qui est très-petit par rapport à y ,

$$l = y + \frac{(\Lambda + x)^2}{2y}, \quad l' = y + \frac{(\Lambda - x)^2}{2y}, \quad \text{et } l - l' = m\lambda = \frac{2\Lambda}{y} x,$$

d'où $x = \frac{mj}{2\Lambda}\lambda$. La longueur d'ondulation λ est donc proportionnelle à la distance x d'une frange d'un certain rang au point a . — Pour la frange suivante, on aurait $x' = \frac{(m+1)y}{2\Lambda}\lambda$, et par suite $x' - x = \frac{y}{2\Lambda}\lambda$, ce qui montre que la distance de deux franges consécutives de même couleur est sensiblement constante.

Il résulte de ce qui précède que, si l'on emploie la lumière blanche, chaque

couleur formant ses franges particulières en des endroits différents, les couleurs seront séparées, et l'on aura des franges irisées, dont le violet sera du côté de la frange centrale qui seule reste blanche. C'est, en effet, ce que montre l'expérience; et il en est de même avec les deux trous d'Young (2827).

2830. Banc de diffraction. — Les expériences qui précèdent se font commodément au moyen du banc de diffraction (*fig.* 1980) construit par Soleil. AB est une règle divisée, sur laquelle peuvent glisser divers curseurs K, K' K". Le curseur K soutient une plaque P qui porte la lentille cylindrique, et qu'une vis *b* permet de faire basculer sur son support, de manière à placer cette lentille bien verticalement. Le curseur K' soutient une plaque à deux fentes verticales, pour l'expérience d'Young, ou les deux miroirs *mn*, pour celle de Fresnel. Ces miroirs sont portés par une plaque verticale qui peut tourner sur l'extrémité d'un levier *cc'*, mobile lui-même en *c'*. Une vis de rappel V sert à éloigner plus ou moins le système *cc'm*, de la règle AB. On voit à part, en MN, une coupe horizontale des miroirs; ils sont mobiles autour d'une charnière *o*; des ressorts tendent à les écarter de la plaque, et des écrous *u, u*, agissant sur des vis fixées à la partie postérieure des miroirs, servent à faire varier l'angle qu'ils font entre eux. Deux autres écrous, dont un se voit en *v*, servent à faire avancer le bord intérieur *o* de l'un des miroirs, de manière à le faire coïncider exactement avec le bord de l'autre; ce qui est très-important, autrement les rayons réfléchis près du bord du plus enfoncé des miroirs, seraient interceptés par la saillie du bord de l'autre. Un écran *e* arrête les rayons qui ne frappent pas les miroirs.

2831. Trajectoire hyperbolique des franges. — Pour vérifier la forme hyperbolique des franges d'un même ordre, à différentes distances de *ss'* (*fig.* 1979), Fresnel a mesuré, comme nous allons l'indiquer, les distances *x*, des franges d'un même ordre à l'axe *Aa*, pour différentes distances, *y*, aux images *s, s'*; distances égales à $Ia + IA$ ou $z + D$, en représentant *IA* par *D*. Il a ensuite posé l'équation de l'hyperbole $A^2y^2 - B^2x^2 = -A^2B^2$, ou $A^2(z + D)^2 - B^2x^2 = -A^2B^2$; et, au moyen de trois couples de valeurs *x', z'*; *x'', z''*; *x''', z'''* données par l'observation, il a obtenu trois équations de condition qui lui ont servi à calculer les constantes A, B et D. Portant ensuite, dans l'équation générale dont les constantes sont ainsi connues, les différentes valeurs de *x* et *z* données par l'observation, il a reconnu qu'elles satisfaisaient à l'équation; la trajectoire formée par les franges d'un même ordre, dans le plan *sas'*, appartient donc à un hyperbole dont le centre est en A. — La distance 2C des foyers, en fonction de A et B, se déduit de la relation $B^2 = C^2 - A^2$; on trouve cette distance égale à *ss'*; les foyers sont donc en *s, s'*.

Micromètre de Fresnel. — Pour mesurer les distances des franges, Fresnel, au lieu de les recevoir sur un écran, les observait au moyen d'une loupe portée par un tube *tt* (*fig.* 1980) et munie, à son foyer, d'un fil vertical. A chaque point de la trajectoire d'une frange, se croisent deux rayons provenant des deux points lumineux, et la loupe fait voir le point placé à une distance convenable pour donner une image virtuelle éloignée à la distance de la vision distincte.

Le support de la loupe peut être déplacé transversalement à la règle AB, au moyen d'une vis micrométrique V'. La lumière étant donnée par un héliostat, on amène successivement le fil focal sur le milieu des deux franges dont on veut évaluer la distance, qui est déduite des tours qu'on a fait faire à la vis V'.

2832. Mesure de la longueur d'ondulation. — D'après la construction (fig. 1979) λ est égal à la distance za . Considérons la figure curviligne aze comme un triangle rectangle dont l'hypothénuse ae représente la distance des milieux de la première frange brillante et de la frange centrale a . Les angles zca et $sas' = \omega$, à côtés perpendiculaires, sont égaux, et l'on a $az = \lambda = ac \sin \omega$. Il suffit donc, pour obtenir λ , de mesurer l'angle sas' au moyen d'un cercle répétiteur, et ac , au moyen du micromètre de Fresnel.

On voit que λ est proportionnel à la distance ac ; et comme il résulte de l'expérience que les franges violettes sont plus serrées que les rouges, on voit que les ondes sont plus courtes pour les rayons violets. La formule $\lambda = v : n$, dans laquelle v est la vitesse de la lumière, et n le nombre de vibrations par seconde, montre aussi que la lumière violette est celle dont les vibrations sont les plus rapides. Enfin, l'expression $\lambda = ac \sin \omega$, qui permet de calculer la largeur des franges en fonction de λ , prouve qu'elles sont d'autant plus larges que l'angle sas' est plus petit. Si cet angle est trop grand, les franges disparaissent; elles sont encore visibles lorsque ω est de plusieurs degrés.

On peut aussi déduire la valeur de λ , de l'équation de l'hyperbole qui passe par la frange e ; car λ est la différence des rayons vecteurs de cette hyperbole, différence égale à son demi-grand axe Λ .

Nous verrons, par la suite, plusieurs autres moyens de mesurer les longueurs d'ondulation. Il en est qui permettent de trouver les valeurs de λ correspondant aux raies du spectre; et nous avons vu qu'on indique généralement, aujourd'hui, les raies spectrales par la valeur λ , qui leur correspond (2639). Nous donnons dès à présent quelques-uns des résultats; les nombres de vibrations de la première série ont été calculés en prenant $v = 77000$ lieues, et celles de la seconde, au moyen de la nouvelle évaluation $v = 74500$ lieues par seconde.

RAIES et COULEURS	VALEURS DE λ en dixmillièmes de millimètre.	NOMBRES n de vibrations par seconde, en trillions.		RAIES et COULEURS	VALEURS DE λ en dixmillièmes de millimètre.	NOMBRES n de vibrations par seconde en trillions.	
Raie B.	6,88	»	»	Vert moyen...	5,12	601	621
Raie C.	6,56	»	»	Raie F.	4,84	»	»
Rouge moyen.	6,20	497	514	Bleu moyen ..	4,75	648	670
Raie D.	5,89	»	»	Indigo moyen.	4,49	686	709
Orange moyen.	5,83	528	557	Raie G.	4,29	»	»
Jaune moyen..	5,51	529	548	Violet moyen.	4,23	728	752
Raie E.	5,26	»	»	Raie H.	3,93	»	»

D'après Fraunhofer, les valeurs de λ pour le rouge et le violet extrêmes sont $0^{\text{mm}},000750$ et $0^{\text{mm}},000360$, et, d'après Babinet, $0^{\text{mm}},000710$ et $0^{\text{mm}},000340$. Pour la flamme de la lampe monochromatique, on a trouvé $0^{\text{mm}},000588$. La valeur moyenne de λ est, comme on voit, un peu supérieure à un demi-millième de millimètre; il faut plus de 6 feuilles d'or battu superposées pour former une épaisseur égale.

On voit que le nombre de vibrations se déduit de la longueur de l'onde; tandis que, en acoustique, ce nombre peut se trouver directement et servir à calculer la longueur d'ondulation, qu'on peut aussi, du reste, obtenir immédiatement. Si l'on prend le rapport entre les nombres de vibrations des couleurs extrêmes, on trouve 1 : 1,58 environ. Les limites de sensibilité de l'œil, quant au nombre de vibrations, sont donc beaucoup plus resserrées que celles de l'oreille; car le rapport ci-dessus est un peu plus faible que celui qui représente la sixte mineure; et l'on peut entendre de 16 à 36,850 vibrations doubles.

2833. Causes qui limitent le nombre des franges. — Pour obtenir, dans l'expérience de Fresnel, des franges bien séparées, il faut que le trait lumineux soit très-étroit; autrement on pourrait le décomposer en plusieurs traits fins, donnant chacun leur système de franges. Il ne faut pas cependant que le trait soit trop fin; car, alors, les franges seraient à peine visibles. Il y a là un milieu à garder, comme pour les dimensions du trou de la chambre noire simple (2401).

Les franges irisées sont bien moins nombreuses que celles que donne la lumière simple, les distances des franges simples qui se juxtaposent dans les franges irisées ne variant pas rigoureusement de la même manière quand la distance à la frange centrale augmente (2829), et finissant par se fondre en une lumière uniforme. Les franges simples, de moins en moins nettes à mesure qu'on s'éloigne de celle du milieu, finissent aussi par disparaître. Fresnel attribuait ce résultat au défaut de pureté de la lumière; les différences très-faibles de longueur d'ondulation des rayons composants n'affectent pas d'abord les résultats, mais quand la différence de route est très-grande, les endroits où se font les interférences ne sont plus les mêmes pour les divers rayons, les bandes sombres de certains d'entre eux reçoivent la lumière de certains autres, et les franges s'effacent. On remarque, en effet, que les franges sont d'autant plus nombreuses qu'on se sert de lumière plus homogène. — Il est facile de voir, en outre, qu'on ne peut observer de franges en dehors de l'angle formé par deux droites passant par les points s , s' et par le point I (fig. 1979), ces droites représentant les derniers rayons réfléchis par les miroirs du côté Aa .

2834. Divers moyens de produire des interférences. — Au lieu d'employer la méthode d'Young ou celle de Fresnel, pour se procurer deux points ou deux traits lumineux dont les pulsations soient d'accord, on peut se servir des moyens suivants :

1° **Biprisme.** — Arago et Fresnel ont employé un prisme pap' (fig. 1980), dont l'angle est très-obtus, et dont la face pp' se place perpendiculairement à la règle AB , sur un support semblable à P. Ce prisme peut être considéré comme

formé de deux autres pa, ap' , qui, déviant les rayons vers leur base commune, les rapprochent de manière à les mettre dans le même cas que s'ils partaient de deux points placés sur le prolongement de ces rayons. Ceux qui aboutissent à une même frange ne traversent pas des épaisseurs égales; mais les différences étant extrêmement petites, les franges occupent sensiblement les mêmes positions relatives qu'avec les miroirs. — Avec le prisme, comme avec les miroirs de

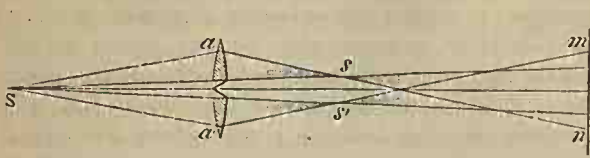


Fig. 1981.



Fig. 1982.

Fresnel, les rayons qui interfèrent partent de foyers virtuels. Avec les systèmes qui suivent, ils partent de foyers réels et saisissables, ce qui présente de grands avantages pour certaines expériences.

2° **Demi-lentilles.** — M. Billet se procure deux points brillants vibrant d'accord, au moyen d'une lentille coupée en deux suivant un diamètre parallèle au trait lumineux S, placé à une distance convenable (fig. 1981). Chacune des moitiés, a, a' , donne une image réelle de S placée sur les axes $Ss Ss'$, menés de S par le centre optique pris sur chaque moitié. Les images s, s' forment les points de départ de rayons divergents, qui, par leur rencontre sur l'écran mn , produisent des franges très-brillantes. — Les demi-lentilles sont montées au milieu d'une plaque métallique (fig. 1982). La vis v sert à rapprocher plus ou

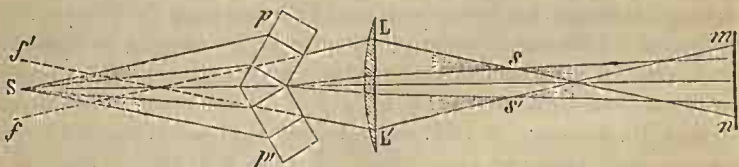


Fig. 1983.

moins l'une des moitiés de l'autre, et la vis u , à faire basculer celle-ci autour du point o , de manière à amener son bord diamétral à être parallèle à celui de la première. M. Billet emploie aussi des demi-lentilles cylindriques séparées en deux parties égales suivant leur axe¹.

3° **Plaques inclinées.** — M. Fizeau remplace le biprisme par une plaque de verre présentant un angle très-obtus, pp' (fig. 1983). Les faisceaux de rayon

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXIV, p. 385.

partant de S sont déplacés latéralement, et divergent comme s'ils partaient des points f, f' . Une lentille L les rassemble en deux foyers réels s, s' , d'où partent les rayons qui doivent produire les interférences.

M. Mascart remplace le banc de diffraction par un spectroscope, dont le prisme est enlevé et remplacé par les miroirs de Fresnel, ou le biprisme, etc. On déplace la fente du collimateur, de manière que les rayons émergeant de sa lentille soient divergents, et l'on allonge beaucoup le tube porte-oculaire de la lunette de l'instrument¹.

2835. Interférences avec de grandes différences de marche. —

MM. Fizeau et L. Foucault ont obtenu des interférences avec des différences de marche de plusieurs milliers de longueur d'ondulation, par le moyen suivant². Les franges irisées formées dans la lumière blanche, au moyen des miroirs de Fresnel, sont reçues sur un écran muni d'une fente étroite parallèle à ces franges. Prenant cette fente pour trait lumineux, on fait passer le faisceau qui en sort, à travers un système de lentilles et de prismes, de manière à obtenir un spectre très-pur (2620). Si d'abord la fente reçoit la frange centrale blanche, le spectre est complet, et l'on y distingue les raies de Fraunhofer. Si l'on écarte latéralement la fente, de la frange centrale, et si on la porte à l'endroit où se formerait la bande obscure des rayons violets, cette couleur manque dans le spectre, et est remplacée par une bande noire. En continuant à déplacer peu à peu la fente, une bande noire apparaîtra successivement dans toutes les couleurs, et semblera sortir par l'extrémité rouge du spectre; puis la bande reparaitra dans le violet; mais elle correspondra alors à une différence de marche de $\frac{3}{2}\lambda$, et bientôt on verra des bandes noires simultanément dans plusieurs couleurs, une même différence de longueur des rayons réfléchis par les miroirs et aboutissant à la fente, pouvant contenir les demi-longueurs d'ondulation de ces couleurs un nombre impair de fois, nombre différent pour chacune d'elles.

Au lieu de déplacer la fente, on fait avancer parallèlement à lui-même le miroir le plus rapproché de l'écran, ce qui fait varier la différence de longueur des rayons réfléchis qui arrivent à la fente, et par conséquent l'ordre de la frange qui la traverse. On voit alors les bandes noires marcher vers l'extrémité rouge du spectre, par laquelle elles semblent sortir, pendant que d'autres, plus nombreuses et plus serrées, se montrent à l'extrémité violette. Au moyen d'une lunette, on peut bientôt en distinguer des milliers.

Calcul de la différence de marche. — Pour connaître la différence de marche qui produit une bande d'interférence, il faut connaître son numéro d'ordre. Il suffit pour cela de compter combien il y a de bandes entre deux raies du spectre correspondant à des longueurs d'ondulation connues. Soient λ et λ' ces longueurs, et N le nombre de bandes comprises entre les deux raies; si d est la différence de longueur absolue des rayons qui, réfléchis par les miroirs,

¹ *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. I, p. 47.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVI, p. 438.

aboutissent à la fente, et si n et n' sont les nombres de fois que λ et λ' sont compris dans d , on aura $d = n\lambda = n'\lambda'$. De plus, si λ est compris dans d une fois de plus que λ' , il n'y aura que deux bandes noires entre les deux raies, et qu'un seul intervalle entre ces bandes; aucune couleur intermédiaire ne pouvant évidemment interférer entre elles. Si $n' = n + 2$, il y aura trois bandes noires, car une couleur intermédiaire, dont la longueur d'ondulation λ'' est comprise entre λ et λ' , donnera $d : \lambda'' = n + 1$; il y aura donc deux intervalles entre les bandes noires. En général, si N est le nombre de ces intervalles, on aura $n' = n + N$. Remplaçant n' par cette valeur dans $n\lambda = n'\lambda'$, il vient $n = \frac{N\lambda'}{\lambda - \lambda'}$, et par conséquent $n' = n + N = \frac{N\lambda}{\lambda - \lambda'}$. Dans une expérience, on a trouvé $N = 141$, entre les raies E et F; ce qui donne, en remplaçant λ et λ' par leurs valeurs, $\frac{\lambda'}{\lambda - \lambda'} = 12,32$, et, par suite, $n = 1738$. Pour l'extrême violet, la différence de marche est de plus de 2000λ .

2836. Application à la scintillation. — Nous avons vu comment on explique la scintillation des étoiles (2703). Arago avait proposé une autre explication par les interférences, mais qui n'est plus guère adoptée. Voici en quoi elle consiste :

L'image d'une étoile formée sur la rétine est le point de concours de tous les rayons parallèles qui entrent par la pupille, rayons dont les ondulations sont d'accord quand ils ont traversé des milieux identiques. Mais, si ces rayons, quoique très-rapprochés, rencontrent, dans leur long trajet à travers l'atmosphère, des portions d'air inégalement denses, inégalement humides, ils pourront interférer totalement ou en partie, et, l'interférence n'ayant pas lieu avec les mêmes différences de marche pour les divers rayons simples, certains d'entre eux domineront, et l'étoile paraîtra colorée. Comme l'état de l'atmosphère change d'un instant à l'autre, surtout s'il fait du vent, l'éclat et la couleur de l'image change continuellement. On conçoit qu'avec une lunette, dont l'objectif reçoit un bien plus grand nombre de rayons, le phénomène sera plus prononcé.

2837. Interférence des radiations calorifiques et chimiques. — MM. Fizeau et L. Foucault ont montré l'interférence des rayons de chaleur au moyen des miroirs de Fresnel¹. Les rayons provenant du soleil étaient renvoyés par un héliostat, dont le miroir était remplacé par un prisme à réflexion totale. La température des franges s'observait au moyen d'un petit thermomètre à alcool, dont la boule avait 1^{mm},1 de diamètre, et dont les degrés occupaient cependant 8^{mm}. Ce thermomètre était renfermé dans une grande caisse munie d'ouvertures garnies de glaces, par l'une desquelles pénétraient les rayons produisant les franges. On observait le thermomètre au moyen d'un microscope placé en dehors et portant un micromètre focal dont chaque division correspon-

¹ *Oeuvres de L. Foucault*, p. 435, et *Annales de chim. et de phys.*, 5^e série, t. XV, p. 363.

daît à $\frac{1}{300}$ de degré. La boule du thermomètre occupait le quart de la largeur d'une frange irisée. Comme cette boule était fixe, on faisait en sorte que la place de la frange du milieu fût successivement occupée par les franges suivantes, et cela en déplaçant très-peu l'un des miroirs parallèlement à lui-même. Les *maximum* de température ont toujours coïncidé avec les franges brillantes, et les *minimum* avec les franges obscures. Dans une expérience, les températures alternatives, en divisions du micromètre, ont été 20, 9, 35, 9, 20, le nombre 35 correspondant à la frange du milieu.

Young, Arago, M. Abria, ayant reçu les franges d'interférence sur une couche de chlorure d'argent, les ont vu s'y fixer photographiquement. Tous ces faits confirment une fois de plus le *principe de l'identité* (II, 889).

II. Réflexion et réfraction. — Réfracteurs interférentiels.

2838. EXPLICATION DE LA RÉFLEXION. — La *réflexion* et ses lois ont été expliquées par Huyghens au moyen du principe qui porte son nom. Considérons des rayons incidents parallèles, ce qui a toujours lieu si l'on considère un faisceau ayant une section infiniment petite. Soit *sabs'* le faisceau incident (*fig. 1984*) et *cb* la surface de l'onde, qui, dans ce cas, est plane et perpendiculaire aux rayons. Quand cette surface arrive en *cb*, le point *b* devient un centre d'ondulations (2824), et, quand elle est arrivée en *a*, ces ondulations sont parvenues à une distance *bd* égale à *ca*. Les ébranlements engendrés par les points placés entre *a* et *b*, à partir du moment où la surface de l'onde les atteint, se sont aussi propagés à des distances proportionnelles à leur distance au point *a*, de manière qu'un plan tangent, *ad*, à la sphère de rayon, *bd*, est aussi tangent aux surfaces des ondes émanant des divers points de *ab*, et forme, par conséquent, la surface de l'onde réfléchi. Si l'on mène les perpendiculaires *ar*, *br'*, à cette surface, on a le faisceau réfléchi *rabr'*. — Il est facile de voir que les triangles rectangles *abc*, *bad*, sont égaux, et que, par conséquent, les rayons incidents et réfléchis sont également inclinés sur la surface réfléchissante; par conséquent, *l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion*. Quant à l'autre loi de la réflexion, elle résulte de la symétrie de la figure par rapport au plan d'incidence. — On pourrait arriver aux mêmes résultats en considérant un faisceau divergent, et en suivant la marche employée pour la réflexion du son (I, 605).

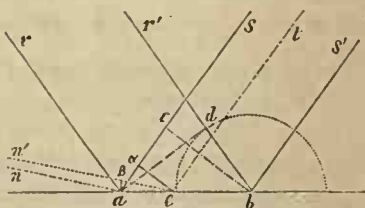


Fig. 1984.

2839. Pourquoi le faisceau réfléchi est limité. — Il se présente ici une difficulté dont Huyghens, auquel est due l'explication qui précède, n'avait pas donné la solution : comment se fait-il que le faisceau réfléchi soit limité par

les droites ar et br' , chaque point de ab produisant des ondes hémisphériques, et, par conséquent, lançant des rayons dans toutes les directions? Fresnel a complété l'explication en montrant que les rayons dirigés obliquement au faisceau $rabr'$ se détruisent mutuellement par interférence. Considérons, par exemple, le rayon an : il faut montrer qu'il sera détruit par un certain rayon très-voisin en' envoyé dans la même direction. Cherchons quelle condition la distance ae doit remplir pour qu'il en soit ainsi. Menons ex et $a\beta$ perpendiculaires à sa et à an ; un ébranlement lumineux du rayon sa aura parcouru, en arrivant à la surface $a\beta$, l'espace xa de plus que l'ébranlement correspondant du rayon te , mais ce dernier aura parcouru l'espace $e\beta$ de plus que le premier, quand ils arriveront à la surface $a\beta$ de l'onde réfléchie. La différence de route des deux ébranlements sera donc alors $e\beta - ax$. Si cette différence est égale à $\frac{1}{2}\lambda$, les deux rayons s'entre-détruiront. Or, cette différence dépend de ae , que nous allons calculer. Soit i l'angle d'incidence, égal à αea , et $\rho = \beta ea$ l'angle que fait la direction an avec la normale. Les triangles rectangles axe , $a\beta e$, donnent $\overline{ax} = \overline{ae} \sin i$, et $\overline{e\beta} = \overline{ae} \sin \rho$; d'où $\overline{e\beta} - \overline{ax} = \overline{ae} (\sin \rho - \sin i)$, et $ae = \frac{e\beta - ax}{\sin \rho - \sin i}$. Pour qu'il y ait interférence, il suffit que $e\beta - ax$ soit égal à $\frac{1}{2}\lambda$, c'est-à-dire que l'on ait $ae = \frac{\frac{1}{2}\lambda}{\sin \rho - \sin i}$. On voit que plus ρ différera de i , plus les rayons se détruisant seront rapprochés l'un de l'autre. Dans tous les cas, ae est toujours très-petit, $\frac{1}{2}\lambda$ étant extrêmement petit (2832). Si l'on a $\rho = i$, il vient $ae = \infty$, les rayons réfléchis, qui forment avec la normale un angle égal à l'angle d'incidence, ne peuvent donc s'entre-détruire.

Nous avons considéré des directions an , en' prises dans le plan d'incidence ; les mêmes raisonnements s'appliqueraient aux directions sortant de ce plan.

On conçoit que si le bord de droite du miroir était très-rapproché du point a , le rayon réfléchi en' n'existant pas, le rayon an ne serait pas détruit. Si donc le miroir était très-étroit, la destruction des rayons obliques au faisceau $rabr'$ ne pourrait avoir lieu complètement, et le faisceau réfléchi serait divergent. Cette conséquence de la théorie a été vérifiée de la manière suivante par Fresnel. On enduit de noir de fumée la surface d'un miroir métallique, en ne laissant à découvert qu'un espace triangulaire très-étroit, cet espace renvoie un faisceau de rayons solaires, plus étalé du côté de l'extrémité la plus étroite de la surface réfléchissante, de manière à former, sur un écran, une image triangulaire à sommet tronqué, et renversée par rapport au triangle réfléchissant.

Un effet semblable concourt à la réflexion diffuse quise fait sur les surfaces non polies, chaque élément d'une aspérité pouvant être considéré comme un miroir excessivement petit, de chaque point duquel partent des rayons réfléchis dans toutes les directions.

2840. EXPLICATION DE LA RÉFRACTION. — Soit $sabs'$ (fig. 1985), un faisceau incident, que nous supposons cylindrique, et bc la surface d'une onde au moment où elle rencontre en b la séparation ab des deux milieux ; le point b devient

aussitôt un centre d'ébranlements se propageant dans le premier milieu, et donnant naissance à la lumière réfléchie, et en même temps, dans le second milieu, en constituant la lumière transmise. Soit bd la distance à laquelle est parvenu l'ébranlement dans le second milieu, quand la surface cb arrive en a . Cette distance sera plus petite que ca , si la *vitesse* de la lumière est plus petite dans le second milieu que dans le premier. Les divers points de la surface ab seront ébranlés successivement, quand la surface bc de l'onde les atteindra, et les distances auxquelles seront parvenus les ébranlements quand cette surface sera arrivée en a , seront proportionnelles aux distances de ces points au point a . On pourra donc mener par le point a , à toutes les surfaces des ondes élémentaires parties des divers points de ab , un plan tangent commun ad , qui représentera la surface de l'onde réfractée, à laquelle le faisceau réfracté $arr'b$ sera perpendiculaire.

Les angles d'incidence, i , et de réfraction, r , étant égaux à cba et bad , les triangles rectangles abc et abd donnent $ac = ab \cdot \sin i$; et $bd = ab \cdot \sin r$; d'où

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{ac}{bd} = \frac{v}{v'} = \frac{\lambda}{\lambda'} = n, \quad [1]$$

car, les espaces \overline{ac} et \overline{bd} étant parcourus dans le même temps, sont entre eux comme les vitesses v et v' de la lumière dans les deux milieux. La relation [1] exprime la *loi de Descartes*, et l'on voit que l'*indice de réfraction* n'est autre chose que le rapport entre les vitesses de la lumière dans les deux milieux, ou entre les longueurs d'ondulation λ et λ' dans ces milieux. — Il est facile de voir (fig. 1985) comment l'explication qui précède a conduit Huyghens à la construction qui donne le rayon réfracté (2488), puisque $\frac{ca}{bd} = \frac{v}{v'} = n$, d'où, $bd = 1 : n$, en supposant $ca = 1$.

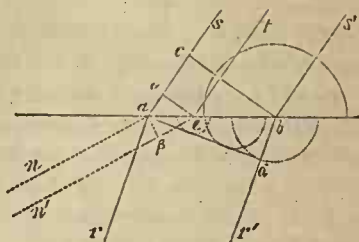


Fig. 1985.

2841. Équivalents optiques. — Les espaces ac et bd (fig. 1985) contiennent le même nombre de longueurs d'ondulation, et si l'un est plus court que l'autre, c'est que la valeur de λ y est plus petite. La formule $\frac{ac}{bd} = \frac{v}{v'} = n$, dans laquelle n représente l'indice de réfraction, donne $ac = n \times bd$. On voit donc que, pour passer de l'espace bd , pris dans un milieu dont l'indice est n , à l'espace ac , dans le vide, contenant le même nombre de longueurs d'ondulation, il faut multiplier bd par n ; et l'on peut dire que l'espace bd dans le milieu, est équivalent à l'espace $n \cdot bd$, dans le vide. Si bd était égal à l'unité, l'espace équivalent dans le vide serait n , ce qui a fait donner à l'indice de réfraction le nom d'*équivalent optique* de la substance. On nomme donc ainsi le facteur par lequel il faut multiplier un espace pris dans un milieu, pour obtenir l'espace qui, dans le vide, contiendrait le même nombre de longueurs d'ondulation.

2842. Pourquoi le faisceau réfracté est limité. — Un rayon cr qui s'écarte de la direction de ceux qui suivent la loi de Descartes, est toujours détruit par un rayon voisin parallèle, en' , situé à une distance ae que nous allons calculer. La différence de route des rayons ca , te , exprimée en longueurs d'ondulation sera, quand les ébranlements correspondants arriveront à la surface d'onde $a\beta$, égale à $n \cdot e\beta - az$, n étant l'indice de réfraction (2841). Désignons par i l'angle d'incidence cea , et par ρ l'angle $ea\beta$ du rayon an avec la normale; les triangles rectangles $e\beta a$, eza donnent $e\beta = ae \cdot \sin \rho$; $az = \overline{ae} \sin i$; donc $n \cdot e\beta - az = \overline{ae} (n \sin \rho - \sin i)$, d'où $\overline{ae} = \frac{n \cdot e\beta - az}{n \cdot \sin \rho - \sin i}$. Il y aura interférence, quand la différence $n \cdot e\beta - az$ sera égale à $\frac{1}{2} \lambda$, ou quand on aura $\overline{az} = \frac{\frac{1}{2} \lambda}{n \cdot \sin \rho - \sin i}$. On voit que ae est d'autant plus petit, que le rapport $\sin i : \sin \rho$ diffère davantage de n , et qu'il devient infini quand, le rayon suivant la loi de Descartes, on a $n \sin \rho = \sin i$.

2843. La vitesse est moindre dans le milieu le plus réfringent. — Il résulte de l'explication précédente que la vitesse de la lumière doit être *moindre* dans le second milieu que dans le premier, quand les rayons *se rapprochent* de la normale, c'est-à-dire quand le second milieu est le plus réfringent; et que la vitesse doit augmenter au moment de l'entrée dans le second milieu, quand il est le moins réfringent.

Angle limite. — Dans ce dernier cas, l'angle d'incidence peut être tel que l'ébranlement produit au point b par la surface de l'onde bc (fig. 1985) se soit propagé dans le second milieu, jusqu'à une distance plus grande que ba , quand la surface d'onde bc arrive en a . Alors il n'est plus possible de mener un plan tangent du point a à la surface de l'onde émanant du point b , et il n'y a plus de faisceau réfracté. Si l'ébranlement produit en b arrive en a en même temps que la surface de l'onde incidente, ou quand on a $bd = ab$, le rayon réfracté est couché sur la surface de séparation. Or, on a $bd = \overline{ab} \sin r = \overline{ab} \cdot n \sin i$, r étant ici plus grand que i (2483). On aura donc bd ou $ab = \overline{ab} \cdot n \sin i$, d'où $\sin i = 1 : n$, valeur connue du sinus de l'angle limite (2485).

2844. Expérience du déplacement des franges. — L'expérience suivante, due à Fresnel et Arago, montre bien que, d'après la théorie des ondulations, la vitesse de la lumière doit être la plus petite dans le milieu le plus réfringent. Si, dans l'expérience des interférences (2826), on place une lame transparente très-mince dans le trajet des rayons qui partent du point s' (fig. 1979), tout le système des franges est transporté du côté de cette lame, et d'autant plus qu'elle est plus épaisse et plus réfringente. C'est que la frange centrale doit toujours correspondre à des distances sa , $s'a$, contenant le même nombre de longueurs d'ondulation. Or, ces longueurs étant moindres dans la lame que dans l'air, la distance absolue de la frange centrale au point s' devra être plus petite que la distance au point s , pour que ces distances contiennent autant de ces longueurs.

Si la lame n'est pas extrêmement mince, les franges disparaissent, comme si l'on interposait un écran opaque, parce qu'elles sont transportées jusque dans l'espace où il ne parvient pas de rayons réfléchis par l'un des miroirs (2833).

2845. Indice de réfraction relatif. — L'expérience prouve qu'un rayon qui traverse plusieurs lames à faces parallèles émerge sans avoir éprouvé de déviation, d'où nous avons conclu que l'indice de réfraction relatif entre deux milieux est égal au rapport de leurs indices absolus (2503). La théorie va nous expliquer ces résultats. Considérons un rayon (fig. 1986) traversant de part en part deux lames juxtaposées terminées par des faces parallèles; et soient v, v', v'' les vitesses de la lumière dans le vide et dans les deux lames, nous aurons, n et n' étant les indices absolus des deux milieux,

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}, \quad \frac{\sin r}{\sin r'} = \frac{v'}{v''}, \quad \frac{\sin r'}{\sin e} = \frac{v''}{v} = \frac{1}{n}.$$

Multipliant ces trois égalités terme à terme, il vient $\frac{\sin i}{\sin e} = 1$, et, par conséquent $i = e$; le rayon émergent est donc parallèle au rayon incident. Si l'on multiplie la dernière égalité par la première, il vient $\frac{\sin r'}{\sin r} = \frac{v''}{v} \times \frac{v}{v'} = \frac{n}{n'}$.

2846. Puissance réfractive. — Pour savoir ce que représente la puissance réfractive $n^2 - 1$, dans le système des ondulations, appelons e et d, e' et d' , l'élasticité et la densité de l'éther dans deux milieux contigus; on aura, d'après la formule de Newton (2822), $v^2 = e : d, v'^2 = e' : d'$;

d'où $\frac{v^2}{v'^2} = n^2 = \frac{ed'}{e'd}$, et, par conséquent, $n^2 - 1 = \frac{ed' - e'd}{e'd}$. Divisant les deux termes du second membre

par ee' , il vient $n^2 - 1 = \left(\frac{d'}{e'} - \frac{d}{e}\right) : \frac{d}{e}$; ce qui

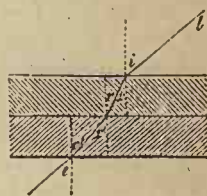


Fig. 1986.

montre que la puissance réfractive représente l'accroissement du rapport de la densité à l'élasticité de l'éther, quand on passe du vide dans un milieu, divisé par ce rapport dans le vide.

2847. APPLICATION DES INTERFÉRENCES A LA MESURE DES INDICES, ETC. — Le déplacement des franges, dans l'expérience de Fresnel, a fourni à Arago un moyen très-délicat de mesurer les indices de réfraction¹. Une lame mince de la substance est placée sur le trajet des rayons réfléchis par l'un des miroirs. On observe de combien de rangs est déplacée la frange centrale, et, pour cela, on interpose cette lame dans une partie seulement de la largeur du faisceau fourni par un trait lumineux, de manière à pouvoir comparer la partie déplacée des franges à celle qui ne l'est pas. Désignons par R le nombre de rangs qui représente ce déplacement, par e l'épaisseur de la lame, et par m et m' les nombres

¹ OEuvres de F. Arago, Mémoires scientifiques, t. I, p. 312.

de longueur d'ondulation λ et λ' comprises dans l'épaisseur e , d'air et de cette lame, nous aurons, en appelant n l'indice par rapport à l'air,

$$[1] \quad e = m\lambda = m'\lambda'; \quad \text{d'où} \quad \frac{m'}{m} = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{v}{v'} = n.$$

Or, la frange du milieu s'étant déplacée de R rangs, on a $m' = m + R$, chaque ondulation de plus dans la lame déplaçant cette frange d'un rang; on a donc

$$[2] \quad n = \frac{m'}{m} = \frac{m + R}{m} = \frac{e + R\lambda}{e},$$

en remplaçant m par sa valeur tirée de [1]. Quand on connaît e et λ , on obtient ainsi, suivant l'expression de Laplace, l'indice de réfraction, au moyen de rayons qui n'ont pas été réfractés; et les résultats sont d'accord avec ceux que donnent les méthodes directes.

La formule [2] peut aussi servir à calculer soit λ , soit l'épaisseur e de la lame, quand son indice est connu, ainsi que e ou λ .

Arago et Fresnel ont appliqué cette méthode, vers 1818, à la comparaison des indices de l'air sec et de l'air humide. Deux tubes de cuivre de 1 mètre de longueur, fermés par des glaces à faces bien parallèles, étaient placés sur le chemin des deux faisceaux qui devaient interférer: l'un était rempli d'air sec, et l'autre d'air saturé. Le déplacement était d'une frange et un quart du côté du tube sec, ce qui indique que la vapeur est moins réfringente que l'air. La différence est très-petite, car un excès de pression de 1^{mm} sur 50, dans un des tubes, tous deux étant remplis d'air sec, produit le même déplacement. Le déplacement observé ne peut être attribué à un dépôt de vapeur sur les glaces, car il ne se produit pas avec des tubes de quelques centimètres seulement de longueur.

Arago, aidé de Laugier, a cherché l'influence de la vapeur précipitée, sur la réfraction de l'air. Par un temps de brouillard, les rayons lumineux d'une lampe traversaient, les uns l'air brumeux, les autres un tube rempli d'air sec, fermé par des glaces qui se prolongeaient de manière à être traversées par les deux faisceaux. Les franges se déplacèrent de trois ou quatre franges, et toujours du côté opposé au tube. Le brouillard augmente donc un peu la réfraction de l'air, résultat singulier, inverse de ce qu'il eût été pour des rayons traversant l'air simplement humide. L'augmentation est d'ailleurs trop faible pour qu'on puisse l'attribuer aux rayons qui auraient traversé les gouttelettes d'eau. L'effet de la vapeur précipitée est, du reste, extrêmement petit; aussi, les astres ne paraissent-ils pas déplacés par l'interposition de brouillards ou de nuages.

28-18. Réfracteurs interférentiels. — Arago a fait construire en 1854, par MM. Soleil et Dubosc, un appareil nommé *réfracteur* ou *réfractomètre interférentiel*, destiné à ces sortes d'expériences. La lumière d'une lampe passe par une fente verticale placée au foyer principal d'une lentille convergente, qui

donne un faisceau de rayons parallèles. Chacun des deux tubes, placés horizontalement l'un à côté de l'autre, est traversé par une partie de ce faisceau. Une pompe pneumatique sert à aspirer l'air de l'un d'eux, que d'autre air saturé d'humidité vient ensuite remplir. Les rayons, à leur sortie des tubes, passent par deux fentes verticales rapprochées, comme dans l'expérience d'Young (2827), de manière à produire des franges que l'on observe au moyen d'une lunette à réticule. On fait en sorte que le milieu de la frange centrale coïncide avec le fil vertical quand les deux tubes contiennent de l'air au même état. Au lieu d'observer le déplacement des franges, on interpose dans les faisceaux sortant des fentes, des lames de verre dites *compensateurs*, que l'on incline plus ou moins, de manière à faire varier l'épaisseur de verre traversée par les rayons, et à ramener la frange du milieu sur le fil du réticule. Des expériences préalables font connaître à combien de rangs correspond un certain déplacement angulaire de chaque lame, mesuré sur un cercle gradué ayant son centre sur l'axe de rotation des lames.

Application à l'indice des gaz. — M. Jamin a appliqué la méthode précédente à la mesure de l'indice de réfraction des gaz¹. Il a commencé par modifier l'appareil d'Arago, dans lequel les tubes juxtaposés ne peuvent être portés à des températures différentes. M. Billet avait trouvé moyen de les séparer, et M. Jamin a imaginé la disposition suivante, qui permet, en outre, d'écarter les franges à volonté : Un faisceau divergent, émanant d'une fente verticale vivement éclairée, est partagé, par un écran étroit parallèle à la fente, en deux faisceaux d'autant plus écartés que l'écran est moins étroit. Chacun de ces faisceaux traverse les lames d'un compensateur, placées sur le prolongement l'une de l'autre, puis les deux tubes, et vient rencontrer un miroir sphérique concave un peu incliné par rapport à l'axe de l'appareil. Ce miroir réfléchit les deux faisceaux et les réunit en une image de la fente, en leur conservant la différence de marche qu'ils ont pu éprouver en traversant les tubes. Les deux faisceaux se séparent de nouveau au-delà du trait focal, et sont reçus par les miroirs de Fresnel placés à côté des tubes, le trait focal remplaçant la source lumineuse de l'expérience ordinaire. En faisant varier l'angle des miroirs, on modifie à volonté la largeur des franges. — Quand les deux tubes contiennent des gaz identiques, on met le fil de la loupe micrométrique sur la frange centrale, et, quand les gaz sont différents, on ramène cette frange sur le fil, au moyen d'une des lames du compensateur, dont la graduation fait connaître le déplacement correspondant des franges. Une formule permet ensuite de déduire de ce déplacement, le retard relatif des deux faisceaux, et, par suite, l'indice relatif des gaz contenus dans les tubes.

M. Jamin, ayant mesuré, avec cet appareil, les indices de l'air et de divers gaz, a trouvé sensiblement les mêmes nombres que Biot, Arago et Dulong (2563). L'appareil ne semble donc pas beaucoup plus précis que le prisme de Borda; mais celui que nous allons décrire est d'une précision extrême.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLIX, p. 282.

28-19. Réfracteur interférentiel de M. Jamin¹. — A'A, B'B (fig. 1987), sont deux tubes de zinc de 4^m de longueur, fermés par des glaces, et contenant le gaz que l'on veut comparer. Un faisceau de rayons partant d'une lampe, et rendu cylindrique par une lentille, est reçu par une glace à faces bien parallèles de 3 à 4^{cm}, d'épaisseur m , qui partage le faisceau en deux autres dont un, réfléchi par la première surface, traverse le tube A'A, et l'autre, réfléchi par la seconde, traverse le tube B'B. Ces deux faisceaux sont reçus, à leur sortie, sur une seconde glace n identique à la première. Là, chacun des rayons se partage encore en deux, une partie se réfléchissant à la première surface, et l'autre à la seconde. Parmi les quatre rayons réfléchis, il y en a deux qui se superposent, comme on le voit à part en NM. Si les plaques sont parallèles, et les tubes AA', BB' remplis du même gaz, les rayons superposés ont parcouru les mêmes épaisseurs de gaz, d'air et de verre, et leurs intensités s'ajoutent. Mais si l'on incline peu

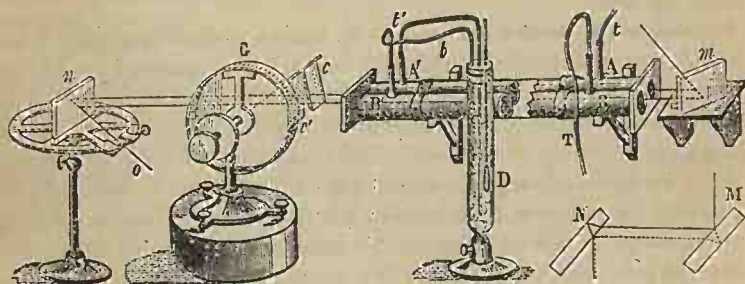


Fig. 1987.

à peu la glace N, le rayon réfléchi à sa seconde surface parcourt, dans son épaisseur, plus ou moins de chemin que le rayon qui s'est réfléchi dans l'intérieur de la glace M; ces rayons prennent des différences de marche, et il se forme des franges d'autant plus larges que les glaces sont plus près d'être parallèles.

Ces franges sont observées à travers une lunette à réticule. Le fil vertical coupant l'une d'elles en deux, si l'on interpose des milieux différents sur le trajet des deux rayons, la coïncidence est détruite, et on la reproduit au moyen d'un compensateur Gcc'. Ce compensateur consiste en deux lames de verre formant entre elles un petit angle, traversées chacune par un des rayons et fixées à l'axe d'un goniomètre de Wollaston, G. Si les deux lames sont également inclinées sur les deux rayons, elles ne modifient pas les franges; mais si l'on fait tourner l'axe qui les porte, les espaces parcourus dans ces lames par chaque rayon, sont inégaux, et les franges se déplacent. Plus l'angle des lames est petit, plus il faut les faire tourner pour obtenir le même déplacement de franges. Pour déduire de la rotation des lames le déplacement qu'elles ont compensé,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LII, pp. 163 et 171.

M. Jamin a construit une courbe dont les abscisses représentent les angles de rotation, et les ordonnées, les nombres de rangs dont les franges sont déplacées. Cette courbe très-régulière, diffère peu d'une ligne droite. Dans chaque expérience, le compensateur étant d'abord sans action, on le faisait tourner de manière à ramener sous le fil de la lunette, la frange qui s'y trouvait quand les tubes contenaient le même fluide, et l'on déduisait de l'angle de rotation, au moyen de la courbe, le nombre de rangs dont cette frange avait été déplacée.

2850. Indice de la vapeur d'eau. — M. Jamin a appliqué cet appareil à la mesure de l'indice de la vapeur d'eau. Pour remplir le tube A'A d'air sec, et le tube B'B d'air humide, de l'air était aspiré par l'extrémité B du tube B'B, au moyen d'un vase aspirateur ajusté en BT. Cet air entraînait en TA, après avoir parcouru un appareil à dessiccation, traversait le tube AA', sortait en A', et pénétrait au fond d'une éprouvette D remplie de pierre ponce mouillée, soit avec de l'eau pure, soit avec des mélanges titrés d'eau et d'acide sulfurique destinés à donner à l'air un état hygrométrique déterminé (II, 1447). Cet air humide arrivait par le tuyau BB', dans le tube B'B, et passait dans le vase aspirateur adapté en T. Après avoir attendu que les franges fussent bien fixes, on arrêtait le courant de gaz, et on les ramenait à leur position primitive, au moyen du compensateur. On répétait ensuite l'expérience, en faisant passer le gaz en sens inverse, de manière que les franges fussent déplacées du côté opposé, puis on faisait une nouvelle expérience en faisant passer le gaz comme la première fois, et ainsi de suite. Les rotations qu'il fallait imprimer au goniomètre n'étaient pas égales dans les différents cas, mais elles allaient en croissant assez régulièrement, ce qui tenait aux modifications qu'éprouvaient les gaz ou les diverses parties de l'appareil, sous l'influence des plus faibles variations de température, dues en partie à la présence de l'expérimentateur. — En représentant par $a, b, a', b' \dots$ les rotations successives du compensateur alternativement dans un sens et dans l'autre, on prenait, pour ces rotations, la moyenne entre b et $\frac{1}{2}(a + a')$, en appliquant la méthode des alternatives de Coulomb (III, 1628); puis la courbe donnait le déplacement correspondant des franges. Ce déplacement se faisait toujours du côté de l'air sec; ce qui indique que l'humidité diminue le pouvoir réfringent.

Il reste à déduire des expériences, l'indice de réfraction de la vapeur seule. Si N est l'indice de l'air humide sous la pression H et à la température t^o , x celui de la vapeur sous la tension f dans le mélange, et enfin n l'indice de l'air sec sous la pression $H - f$, on aura (2566)

$$N^2 - 1 = (x^2 - 1) + (n^2 - 1). \quad [1]$$

$N^2 - 1$ se déduira de l'expérience, en partant de la formule $\frac{u}{V} = \frac{e + R\lambda}{e}$ (2847); dans laquelle u est la vitesse de la lumière dans l'air sec sous la pression H , V cette vitesse dans l'air humide, et e la longueur des tubes, Cette formule donne

$$\frac{c}{V} - \frac{e}{u} = \frac{R\lambda}{u}, \quad \text{ou} \quad \frac{cv}{V} - \frac{ev}{u} = \frac{R\lambda v}{u}, \quad \text{ou} \quad eN - en' = R\lambda n';$$

v désignant la vitesse dans le vide, et n' l'indice de l'air sec à la pression H .
D'où l'on tire $N^2 - 1 = n'^2 \left(1 + \frac{2R\lambda}{e} \right) - 1$, en négligeant le terme $R^2\lambda^2$.
Égalant cette valeur de $N^2 - 1$ à celle de l'équation [1], il vient

$$x^2 - 1 + n^2 - 1 = n'^2 - 1 + \frac{2R\lambda}{e} n'^2,$$

formule qui servira à calculer l'indice x de la vapeur sous la pression f et à la température t , quand on connaîtra les indices n et n' de l'air sec aux pressions $H - f$ et H .

Ces derniers indices peuvent se déduire de l'indice de l'air, $v = 1,000589$, trouvé par Dulong (2566) pour la température 0° et la pression de 760^{mm} ; car (2565) on a $\frac{n^2 - 1}{d} = \frac{n'^2 - 1}{d'} = \frac{v^2 - 1}{\delta}$, d , d' , δ étant les densités de l'air à t° sous les pressions $H - f$, H et 760^{mm} . Les deux premières, exprimées en fonction de δ , sont $d = \frac{\delta(H - f)}{1 + at}$, et $d' = \frac{\delta H}{1 + at}$.

Quand on a l'indice de la vapeur à la température t° et à la pression f , on en déduit sa valeur x' à une autre pression et à une autre température, en appliquant la formule $\frac{x^2 - 1}{D} = \frac{x'^2 - 1}{D'}$, qu'on peut regarder comme vraie entre des limites suffisamment rapprochées. Les densités D et D' sont données par la formule $D = \frac{0,81 f}{(1 + at) 760}$, dans laquelle 0,81 est la densité de la vapeur par rapport à l'air, et à la pression de 760^{mm} et à 0° . Si l'on suppose $f = 760^{\text{mm}}$ et $t = 0^\circ$, on aura une valeur de x' représentant l'indice de la vapeur dans des conditions où elle ne peut exister; mais cette valeur fictive une fois calculée, fournira une constante qui, égalée à $(x^2 - 1) : D$, servira à déterminer x dans les conditions correspondant à la valeur de D . Nous avons donné plus haut (2567) les résultats trouvés par M. Jamin.

2851. Indice de l'eau comprimée. — M. Jamin a appliqué la même méthode à l'étude de la réfraction de l'eau comprimée. Ce liquide était contenu dans deux tubes de 1 mètre de longueur, fermés à chaque extrémité par une même glace et plongés dans l'eau d'une auge terminée elle-même par deux glaces parallèles. Dans un des tubes, l'eau ne supportait que la pression atmosphérique; dans l'autre, elle était soumise, en outre, à la pression d'une colonne de mercure; le tube étant en communication avec la petite branche d'un manomètre à air libre et à deux branches, disposé comme celui de la figure 746 (II, 1039), et dont la branche fermée portait un robinet à entonnoir destiné à la remplir. Soit R le déplacement des franges donnant l'indice de réfraction

absolu de l'eau à la pression de 76^{cm}, ou son équivalent optique (2841), et n' celui de l'eau sous la pression 76^{cm} + P, on aura

$$en' - en = R\lambda, \text{ d'où } n'^2 - 1 = n^2 - 1 + \frac{2R\lambda}{e}n, \quad [2]$$

en négligeant le terme qui contient λ^2 .

Cette méthode est tellement délicate, qu'un excès de pression de 1^{mm} suffit pour déplacer les franges, et que la chaleur dégagée par la compression devient sensible, par la déformation des franges due aux mouvements de l'eau, et durant environ 10 minutes. Or, nous avons vu qu'on n'a pu, avec les thermoscopes les plus sensibles, saisir le moindre échauffement dans l'eau soumise aux compressions les plus énergiques (II, 1275).

On pourrait craindre, dans ces expériences, l'effet de l'allongement du tube à eau comprimée; mais ce tube étant plongé dans l'eau, l'allongement n'aurait pour effet que de remplacer une mince tranche d'eau par une tranche égale d'eau comprimée, ce qui ne pourrait avoir d'influence sensible.

Compressibilité de l'eau. — M. Jamin a reconnu que le pouvoir réfringent de l'eau à diverses pressions est constant, c'est-à-dire qu'on a $(n'^2 - 1) : d' = (n^2 - 1) : d$; d' et d étant les densités de l'eau sous deux pressions différentes. En appelant k le coefficient de compressibilité de l'eau pour une pression de 1^{mm} de mercure, on a $d' = d(1 + kP)$. Substituant dans la formule qui précède, on en tire $n'^2 - 1 = (n^2 - 1) + kP(n^2 - 1)$. Égalant cette valeur de $n'^2 - 1$ à celle que donne la formule [2], il vient

$$kP(n^2 - 1) = \frac{2R\lambda}{e}n; \text{ d'où } k = \frac{R}{P} \frac{2\lambda n}{e(n^2 - 1)},$$

Pour une pression de 760^{mm}, on aura $K = k \times 760$. L'expérience a donné, pour l'eau ordinaire, $R : P = 0,0348$; et $K = 0,0000500$; et pour l'eau privée d'air, $R : P = 0,0356$, et $K = 0,0000511$. Or, M. Grassi a trouvé, pour le coefficient de compressibilité de l'eau à 0° (I, 348), le nombre 0,0000503, qui diffère à peine de ceux qui précèdent. On en peut donc conclure que le pouvoir réfringent de l'eau, pour des accroissements de pression qui sont allés jusqu'à 792^{mm}, est constant. S'il en était ainsi pour les autres liquides, on aurait un moyen précis de mesurer leur compressibilité absolue.

2852. Dispersion des gaz. — M. Crouillebois a appliqué la méthode interférentielle à la mesure des indices de divers gaz et vapeurs, et à celle de leur dispersion. Les rayons solaires, dirigés par un héliostat à travers une fente étroite, donnaient un spectre pur en traversant un prisme suivi d'une lentille. Ce spectre était reçu par un écran muni d'une fente parallèle aux arêtes du prisme, et pouvant se déplacer parallèlement à la fente sous l'action d'une vis, de manière qu'on pouvait faire coïncider successivement avec cette fente les raies C, E, G du spectre (2619). Le faisceau se partageait ensuite entre les deux tubes contenant le gaz à étudier, et, passant à travers des demi-lentilles, formait

des franges, que l'on observait au moyen d'une loupe à réticule, directement ou sur un écran en verre dépoli.

Les deux tubes étant remplis d'un même gaz pur à la même pression, on réglait l'appareil, puis on diminuait la pression dans l'un d'eux; les franges se déplaçaient, et on les ramenait à leur position première au moyen d'un compensateur de M. Billet, composé de deux prismes de verre à angle très-aigu, appliqués l'un sur l'autre de manière à former une lame à faces parallèles, dont on modifie l'épaisseur en faisant glisser un d'eux sur l'autre, au moyen d'une vis micrométrique. Dans une seconde méthode, on suivait le déplacement des franges pendant la raréfaction, en les comptant à mesure qu'elles passaient sous le micromètre. Du déplacement on déduisait l'indice de réfraction pour la différence des pressions dans les deux tubes. — Voici quelques indices trouvés avec l'air et divers gaz simples pour les raies C, E, G :

	C	E	G
<i>Azote</i>	1,0002559	1,000302	1,0003229
<i>Oxygène</i>	1,000562	1,0002989	1,0003136
<i>Hydrogène</i>	1,000129	1,000140	1,000153
<i>Chlore</i>	1,000699	1,000792	1,000840
<i>Air</i>	1,0002576	1,0003041	1,0003156

Des résultats analogues ont été trouvés sur 7 gaz composés et sur quelques vapeurs¹.

2853. Effet du mouvement d'un milieu sur l'éther qu'il contient.

— Quand un corps se déplace, l'éther qu'il contient est-il emporté avec lui? ou bien ce corps ne fait-il que traverser l'éther de l'espace, comme le filet du pêcheur traverse l'eau? ou bien, enfin, une partie de l'éther suit-elle seule le corps? Arago avait essayé de résoudre la question en cherchant, au moyen d'un prisme, si la déviation minimum des rayons d'une étoile placée dans l'écliptique sur la tangente à l'élément occupé par la terre, restait la même quand la terre marchait vers l'étoile ou quand, 6 mois plus tard, elle s'en éloignait avec une vitesse de 8 lieues par seconde. Dans le premier cas, si l'éther était adhérent aux molécules du prisme, les choses se passeraient, en appelant V la vitesse de la lumière, comme si les ondulations étaient raccourcies dans le rapport de $V - 8$ à V , et, dans le second, comme si elles étaient augmentées dans celui de $V + 8$ à V . Mais il ne put constater aucune différence. Fresnel avait conclu de là que le corps n'emporte que la portion d'éther qu'il condense autour de ses molécules, et qui forme l'excès de la densité de l'éther qu'il contient sur celle de l'éther environnant. Des expériences de M. Fizeau, faites par la méthode interférentielle, l'ont conduit à cette même conclusion².

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XX, p. 436.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LVII, p. 385.

Ces expériences ont été faites sur l'eau au moyen de l'appareil (fig. 1988) : oO , $O'm$ sont deux lunettes opposées, comme dans l'expérience de Suresne (2405), mais placées à 3^m seulement l'une de l'autre. En l est une lentille cylindrique verticale, qui rassemble les rayons solaires en une ligne focale s servant de source lumineuse. Ces rayons, réfléchis par une glace, n , inclinée à 45°, semblent venir du point s' symétrique du point s . Rendus ensuite parallèles par l'objectif O , ils sont divisés en deux faisceaux par deux fentes pratiquées dans un écran e , et traversent les deux tubes AA' , BB' , fermés à leurs extrémités par une même glace, et dans lesquels de l'eau circule en sens contraire. Les faisceaux sont ensuite réunis par l'objectif O' sur un miroir plan m placé à son foyer, et sont réfléchis de manière à changer de place, celui qui passait par le tube AA' passant par BB' , et *vice versa*, comme l'indiquent les flèches, qui sont pointillées pour l'un des faisceaux. Ces faisceaux traversent de nouveau l'objectif O , et vont faire en s' une image focale que l'on observe avec un oculaire

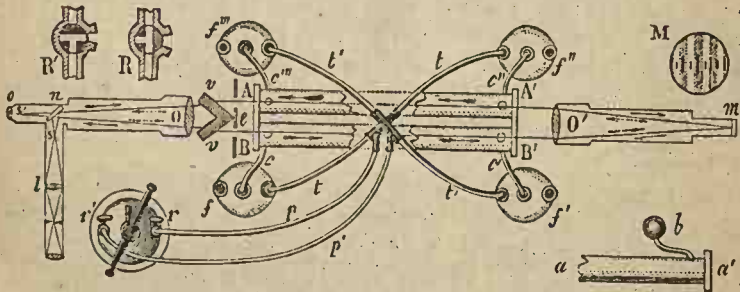


Fig. 1988.

à réticule a . Si les tubes AA' , BB' contiennent un fluide en repos, les deux faisceaux forment en s' des franges d'interférence. Pour que ces franges ne soient pas trop serrées, l'angle s' doit être très-petit. On remplit cette condition en disposant obliquement en vv' deux glaces épaisses qui écartent latéralement les rayons incidents sans les dévier.

Voici maintenant comment on fait passer le courant d'eau en sens contraire dans les deux tubes AA' , BB' . Quatre flacons à trois tubulures, dont une est bouchée et ne sert que pour y verser de l'eau, sont disposés en f , f' , f'' , f''' . La tubulure centrale met l'eau qu'ils contiennent en communication avec les extrémités des tubes AA' , BB' , au moyen des tuyaux c , c' , c'' , c''' , qui plongent jusqu'au fond des flacons. Le tube t fait communiquer les parties supérieures contenant de l'air, des flacons f et f'' ; et le tube t' , les parties supérieures des flacons f' , f''' . Ces tubes peuvent être mis en relation avec un récipient r plein d'air comprimé, par les tubes de plomb p , p' , munis de robinets à trois voies, r , r' , dont on voit la coupe en R , R' , qui servent à les faire communiquer soit avec l'air comprimé, soit avec l'atmosphère. — Supposons que le tube p

communique avec le récipient $r'r$, et p' avec l'atmosphère; l'eau des flacons f et f'' , refoulée par l'air comprimé, passera par c, c'' , dans les tubes $B'B, AA'$, et se précipitera dans les flacons f', f''' , où règne la pression atmosphérique. En tournant de 90° les robinets r, r' , on fait ensuite passer l'eau en sens contraire. On a pu ainsi, avec un excès de pression de 2 atmosphères seulement, obtenir une vitesse de 7^m par seconde.

Cela posé, tant que l'eau est en repos dans les deux tubes, les franges restent fixes, même quand on interpose dans un des faisceaux une lame transparente, ou qu'on change le fluide contenu dans un des tubes; car les deux faisceaux traversent toujours les mêmes milieux. Mais, dès que l'eau se meut en sens contraire dans ces deux tubes, l'un des faisceaux marche dans le sens du courant, en allant comme en revenant, tandis que l'autre marche en sens contraire; et l'on voit les franges se déplacer d'une quantité sensiblement proportionnelle à la vitesse de l'eau. Quand on change le sens du courant, le déplacement se fait du côté opposé. On peut conclure de là que l'éther est, au moins en partie, entraîné par l'eau; car, s'il en est ainsi, les ondes suivront le mouvement et se trouveront, en s' , en avance sur celles de l'autre pinceau, qui, au contraire, sont retardées par le transport de l'éther en sens opposé. La déviation devra donc se faire du côté où entre le premier faisceau, l'espace qu'il parcourt devant être plus long que celui que parcourt le second, pour qu'il y ait le même nombre d'ondulations.

Pour mesurer le déplacement des franges, M. Fizeau disposait, en s' , un micromètre tracé sur verre, représenté à part en M, aux divisions duquel il rapportait les franges. Avec la vitesse de 7^m par seconde, ce déplacement était de $\frac{1}{3}$ de frange environ dans les deux sens. Le calcul indique que le déplacement eût été double si tout l'éther de l'eau avait été entraîné avec le liquide; tout l'éther ne participe donc pas au mouvement de l'eau. Si l'on admet en principe, avec Fresnel, que la vitesse de propagation, au lieu d'être augmentée de toute celle de l'eau, n'est augmentée que de la vitesse du centre de gravité de la masse d'éther qui y est contenue et qui ne se déplace qu'en partie, on trouve un résultat sensiblement égal à celui de l'expérience; ce qui confirme le *principe de Fresnel*.

Des expériences faites au moyen d'un courant d'air lancé par un soufflet avec une vitesse de 25^m par seconde, n'ont donné aucun déplacement des franges. D'après le *principe de Fresnel*, ce déplacement ne devrait être que de 0,0002 de la largeur d'une frange, quantité tout à fait insensible.

III. Décomposition de la lumière, action sur les corps, etc.

2854. Dispersion. — Les diverses couleurs correspondant à des vibrations de rapidité différente, et la déviation des rayons dans la réfraction, dépendant de la différence des vitesses de la lumière dans les deux milieux, il faut admettre,

pour expliquer la *dispersion*, que cette différence n'est pas la même pour les divers rayons colorés, c'est-à-dire que les ondes de longueurs différentes se propagent dans un même milieu réfringent, avec des vitesses différentes. Cette conséquence a d'abord embarrassé les physiciens, et elle a constitué longtemps une grave objection contre le système des ondulations. Elle est, en effet, en contradiction avec la formule de Newton $v^2 = e : d$.

Pour lever la difficulté, on a d'abord considéré que cette formule suppose l'amplitude des vibrations, insensible par rapport à la longueur d'ondulation, et qu'il peut bien n'en être pas ainsi des vibrations lumineuses, dont les longueurs d'onde sont extrêmement petites. Fresnel avait déduit de là que les ondes les plus courtes devaient se propager le plus lentement. Mais la véritable explication découle de la constitution même des milieux réfringents. Si, en effet, la vitesse de la lumière dans l'éther du vide semble être la même pour toutes les couleurs (2407), il n'en est pas de même dans un corps transparent, qui retient de l'éther autour de ses molécules. Les ondes doivent alors tourner autour de ces molécules, et l'on conçoit que les retards qu'elles éprouvent dans leur propagation, soient plus grands pour les plus courtes que pour les plus longues. Au reste, la question a été tranchée par les recherches analytiques de Cauchy : l'inégalité de vitesse de propagation des ondes de différentes longueurs, à travers l'éther engagé dans un système de molécules pondérables, a été rattaché, dans ces savants calculs, aux lois de la mécanique rationnelle; de sorte que cette inégalité est aujourd'hui démontrée indépendamment du fait de la dispersion, fait qui se trouve ainsi être une conséquence du calcul mathématique.

2855. Décomposition de la lumière par absorption. — On conçoit que la présence des molécules pondérables gêne les vibrations de l'éther et en diminue l'amplitude, en leur empruntant une partie de leur force vive, ce qui explique l'affaiblissement des radiations par les milieux qu'elles traversent, affaiblissement qui dépend de l'épaisseur et de la nature de ces milieux. L'analyse démontre que, dans un même milieu, certaines ondulations peuvent être anéanties plus facilement que d'autres, suivant leur longueur et l'arrangement des molécules du milieu réfringent : de là, la décomposition de la lumière par transmission, et les divers effets du polychroïsme (2584). Nous avons vu que les vapeurs métalliques contenues dans les flammes, leur communiquent la faculté d'absorber principalement les rayons qu'elles émettent en grande quantité, et comment M. Stokes explique ce résultat, en comparant le milieu gazeux à un espace encombré de cordes tendues (2644).

2856. Couleur des corps. — Rappelons d'abord que la lumière ne se décompose par réflexion que sur les surfaces dépolies, c'est-à-dire couvertes d'aspérités très-fines et très-rapprochées. Voici comment Fresnel explique, en partant de là, la couleur des rayons réfléchis : Si nous considérons deux rayons incidents voisins, l'un sn (fig. 1989), aboutissant au sommet d'une aspérité, l'autre, $s'n'$, en un point d'une des cavités qui les séparent, et tels que les normales en n et n' soient *parallèles*, les rayons réfléchis nr , $n'r'$ seront aussi

parallèles, et le rayon $s'n'$ sera, après la réflexion, en retard sur le rayon sn , d'une quantité qui dépendra de la profondeur e de la cavité; si celle-ci est telle que le retard soit égal à $\frac{1}{2} \lambda$ des rayons violets, ceux-ci seront détruits par interférence, et la lumière réfléchie sera colorée. Si le retard est différent, on conçoit que certaines couleurs seront détruites en partie et en proportion différente, de sorte que la lumière réfléchie présentera une nuance qui changera avec la valeur de e . Pour vérifier ce résultat, il faudrait pouvoir faire varier e à volonté, ce qui serait très-difficile. Mais on peut agir autrement, et modifier la différence de route, en faisant varier l'angle d'incidence. Pour cela, on prend un miroir seulement douci à l'émeri fin, et l'on regarde par réflexion un corps blanc. Quand l'obliquité des rayons est assez grande pour que l'on aperçoive l'image de ce corps, il paraît d'une couleur orangée, quelle que soit la nature de la surface réfléchissante; et quand on augmente l'inclinaison, la teinte s'éclaircit et finit par paraître blanche.

2857. Effets chimiques des divers rayons colorés. — L'agitation provoquée dans l'éther qui enveloppe les molécules, ou dans ces molécules elles-mêmes, par les vibrations des rayons incidents, doit provoquer l'association ou la séparation des atomes d'espèce différente, et déterminer des combinaisons ou des décompositions chimiques. Quoique le phénomène soit difficile à saisir, on peut entrevoir que les molécules agitées peuvent être amenées à des positions régulières en obéissant aux forces qui les sollicitent, comme celles de l'eau au-dessous de zéro quand on la fait vibrer, ou



Fig. 1989.

comme les parcelles de fer qui forment le spectre magnétique, quand on imprime de petites secousses à la feuille de carton sur laquelle on les a répandues.

Les divers rayons colorés présentent une activité chimique différente, qui change avec la nature des substances (2656). On conçoit, en effet, que certaines molécules doivent répondre plus facilement que d'autres aux vibrations suivant leur rapidité, comme les cordes d'une harpe, dont quelques-unes seulement répondent aux sons produits à proximité. De plus, certaines couches sensibles peuvent conserver la couleur des rayons lumineux qui les ont frappées; il semble que les molécules de la surface ont été amenées à un état d'arrangement qui leur permet de vibrer à l'unisson des vibrations qui ont produit la décomposition; de même que les molécules de tiges de verre, de disques de soufre, d'abord rebelles aux vibrations, finissent, sous l'influence de celle-ci, par s'arranger de manière que les sons sortent ensuite avec la plus grande facilité. Rappelons aussi les remarquables résultats obtenus par M. Niepce de Saint-Victor : les chlorures qui donnent à la flamme de l'alcool certaines couleurs, c'est-à-dire occasionnent dans l'éther, pendant la combustion, des vibrations d'une certaine rapidité, donnent aussi aux couches sensibles la faculté de réfléchir plus facilement les rayons de cette couleur, quand elles en ont été frappées pendant quelque temps (2680). Ces substances semblent se comporter comme des cordes tendues

qui répondent très-facilement aux sons qu'elles sont susceptibles elles-mêmes d'engendrer.

2858. Phosphorescence. — L'action des rayons lumineux, pour produire la phosphorescence, se conçoit facilement : les vibrations de l'éther se communiquant à celui qui entoure les molécules superficielles des corps phosphorescents, lequel continue à vibrer pendant quelque temps, comme une corde tendue qui résonne encore après que les vibrations qui l'ont excitée cessent de se produire. Certains corps ne restent phosphorescents que pendant un temps très-court ; d'autres ne paraissent pas le devenir, même avec l'aide du *phosphroscope* ; de même qu'il y a des corps très-denses qui ne conservent que pendant un temps imperceptible les vibrations communiquées, et d'autres qui ne sont pas susceptibles de vibrer. — Nous avons vu que la lumière phosphorescente est ordinairement moins réfrangible que celle qui l'a excitée. Pour expliquer ce phénomène, très-marqué surtout quand il s'agit de la *fluorescence* (2691), M. Eissenlohr suppose que les rayons obscurs de différentes longueurs d'ondulation, interfèrent de manière à donner des vibrations résultantes plus lentes, comme dans l'expérience de Tartini pour le son (I, 661) et correspondant, par conséquent, à des rayons moins réfringents.

2859. Des moyens d'engendrer la lumière. — C'est principalement au moyen des *actions chimiques* que nous produisons la lumière. Il est facile de comprendre que, dans le conflit moléculaire qui constitue ces actions, l'éther qui entoure les molécules soit vivement agité et devienne le siège d'ondulations de diverses rapidités. Si l'action chimique est faible, les vibrations les plus lentes possèdent seules une amplitude assez grande pour être sensibles, et l'on n'observe que de la *chaleur*, accompagnée de rayons de plus en plus réfrangibles, à mesure que l'action chimique est plus active. Quand cette action devient assez énergique pour donner aux vibrations les plus rapides une amplitude suffisante, la lumière accompagne la chaleur. L'expérience montre que la couleur des rayons lumineux dépend des substances en présence, et il en est de même de la température à laquelle la lumière commence à se manifester ; car on conçoit que, suivant la nature des molécules, les vibrations d'une certaine rapidité seront excitées de préférence à d'autres, et il est présumable que, si l'on pouvait augmenter graduellement l'énergie de l'action chimique, on trouverait que la température à laquelle la lumière commence à apparaître est d'autant plus élevée que la couleur de cette lumière se rapproche davantage d'être blanche ou violette. Ce qui confirme cette conjecture, c'est que l'incandescence due aux actions chimiques, quand elle est faible, donne de la lumière rouge. Si elle est plus intense, la lumière est blanche, les rayons les plus réfrangibles se mêlant aux autres, comme l'ont montré les expériences de M. Draper que nous avons citées en parlant des radiations calorifiques (II, 891).

§ 2. — COMPARAISON DES SYSTÈMES DES ONDULATIONS ET DE L'ÉMISSION

I. Réflexion et réfraction dans le système de l'émission.

2860. Système de l'émission. — Dans ce système, auquel Newton a donné son nom, la lumière consiste en particules de nature spéciale lancées par les corps lumineux, avec une vitesse de 75000 lieues par seconde. Il y a une infinité d'espèces de particules, correspondant aux différentes couleurs. Quoique leur masse soit insensible, elles peuvent affecter la rétine, et il suffit que celle-ci en reçoive 10 par seconde pour que l'impression soit continue, celle qui est produite par chacune des particules durant environ $\frac{1}{10}$ de seconde. Il pourrait donc n'y en avoir que 10 dans un espace de 75000 lieues; ce qui expliquerait comment les rayons peuvent s'entre-croiser sans se gêner mutuellement. C'est à Biot que l'on doit les travaux les plus étendus sur le système de l'émission; il en a suivi les conséquences pas à pas par le raisonnement et le calcul, et est parvenu à le plier à l'explication de la plupart des phénomènes; mais ce n'a été qu'en introduisant fréquemment de nouvelles hypothèses.

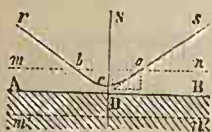


Fig. 1990.

2861. Explication de la réflexion. — Newton suppose que la surface des corps exerce sur une partie des particules lumineuses, une répulsion, qui diminue rapidement quand la distance augmente, et devient nulle dès qu'elle est appréciable. Soit AB (fig. 1990) la surface réfléchissante, *sa* un rayon incident, et *mn* un plan parallèle à AB, à partir duquel la répulsion commence à se faire sentir sur les particules lumineuses, et décomposons la vitesse de la particule arrivée en *a* en deux composantes, l'une horizontale, l'autre verticale. La première n'est pas modifiée par la répulsion de la surface AB, tandis que la seconde diminue à mesure que la particule s'enfonce au-dessous de *mn*, et finit par devenir nulle. La répulsion, agissant toujours, donne ensuite, avec la composante horizontale, une résultante oblique de bas en haut, qui éloigne la particule et finit par lui donner la direction *br*. La répulsion étant la même pour des distances égales de AB, on voit que les deux moitiés de la trajectoire *acb* seront symétriques par rapport à la normale DN, et qu'elles seront dans le même plan *scN*; d'où résultent les deux lois de la réflexion. — La distance *De* sera d'autant plus petite que la composante verticale de la vitesse sera plus grande, c'est-à-dire que l'angle d'incidence sera plus petit. Il pourra même arriver que le point *c* soit au-dessous de la surface AB, mais toujours à une distance de cette surface moindre que la distance à laquelle s'exerce la répulsion sur les particules lumineuses.

2862. Réfraction. — Pour expliquer le partage de la lumière en lumière réfléchie et lumière transmise, à la surface de séparation de deux milieux, on suppose que les particules lumineuses possèdent deux pôles, dont un est attiré

par le second milieu, tandis que l'autre en est repoussé. La particule est réfléchie ou réfractée, suivant qu'elle se présente par le premier ou par le second pôle. Considérons les particules qui pénètrent dans le second milieu, et soit *sa* (fig. 1991) un rayon incident; dès qu'une particule arrive à la surface *mn*, l'attraction s'ajoutant à la composante normale à *AB*, cette particule se rapproche de plus en plus de la normale. Cet effet se continue au-dessous de la surface *AB*, jusqu'à la profondeur *Am'* égale au rayon de la sphère d'activité des molécules pondérables. A partir de *b*, la particule recommence à marcher en ligne droite, car les attractions qu'elle subit dans tous les sens s'entre-détruisent.

Soient *v* et *v'* les vitesses de la lumière dans les deux milieux, et *i* et *r* les angles d'incidence et de réfraction, la composante horizontale de la vitesse sera *v sin i*, dans le premier milieu, et *v' sin r*, dans le second; et, comme cette composante ne change pas, on a $v \sin i = v' \sin r$, ou $\sin i : \sin r = v' : v$. On voit que si, *r* étant moindre que *i*, le second milieu est plus réfringent que le premier, il faut que l'on ait $v' > v$, c'est-à-dire que la vitesse de la lumière soit la plus grande dans le milieu le plus réfringent. C'est le contraire de ce qu'indique le système des ondulations (2843).

Si le rayon, venant de *r* avec la vitesse *v'*, passait du corps dans le vide, l'attraction de ce corps diminuant la composante normale, le rayon émergent se rapprocherait de la surface *AB*, et, de plus, la diminution étant égale à l'augmentation produite quand le rayon passe du vide dans le corps, la vitesse, en arrivant à la surface *mn*, serait égale à *v*.

Si l'angle *r* était suffisamment grand, la composante normale pourrait être assez petite pour être détruite avant que la particule *m* ne fût arrivée en *mn*. Alors elle reviendrait en dedans du corps, et l'on aurait le phénomène de la réflexion totale. Pour trouver la valeur minimum de *r* qui correspond à ce phénomène, nous allons d'abord chercher une relation entre l'indice de réfraction et l'action exercée par le corps sur une particule lumineuse.

Puissance réfractive. — L'action du corps sur une particule lumineuse est représentée par la *puissance réfractive*. Pour trouver cette action, soient *v sin i* et *v cos i* les composantes horizontale et verticale des vitesses de la particule à son arrivée à la surface *mn* (fig. 1991). Pendant le passage du plan *mn* au plan *m'n'*, la composante verticale est augmentée, par l'attraction exercée par les molécules du corps. Quelle que soit la loi qui lie cette attraction à la distance, on peut toujours partager *mA* en tranches infiniment minces, dans chacune desquelles la force attractive soit constante; de manière qu'en appelant *e* l'épaisseur de chaque tranche; *f, f', f''...*, *f_n*, les attractions dans les différentes tranches; et *u, u', u''...*, *u_n*, les composantes des vitesses réalisées en arrivant à la 2^e, à la 3^e... tranche, et enfin à la surface *AB*, on aura (I, 45)

$$u^2 = v^2 \cos^2 i + 2fe; u'^2 = u^2 + 2f'e; u''^2 = u'^2 + 2f''e; \dots u_n^2 = u_{n-1}^2 + 2f_n e.$$

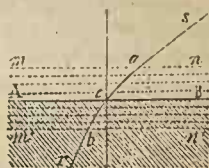


Fig. 1991.

En ajoutant membre à membre, il vient pour le carré u^2_n de la composante normale de la vitesse, en arrivant à la surface AB,

$$u^2_n = v^2 \cos^2 i + 2e (f + f' + \dots + f_n).$$

L'action du corps produisant les mêmes effets, de AB en $m'n'$, on aura la composante $v'^2 \cos^2 r$ de la vitesse en $m'n'$, en doublant le second terme, ce qui donnera

$$[1] \quad v'^2 \cos^2 r = v^2 \cos^2 i + 4e (f + f' + \dots + f_n).$$

La composante horizontale étant la même en a et en b , on aura

$$[2] \quad v'^2 \sin^2 r = v^2 \sin^2 i; \quad \text{d'où } v'^2 = v^2 + 4e (f + f' + f'' \dots + f_n),$$

en ajoutant les égalités [1] et [2] membre à membre.

La quantité entre parenthèses doit être regardée comme proportionnelle au nombre des molécules comprises dans la sphère d'attraction, c'est-à-dire proportionnelle à la densité δ . Si donc on représente par k^2 un coefficient, constant pour une même substance, on pourra écrire $v'^2 = v^2 + k^2 \delta$; d'où, en remarquant que $v' : v = n$, ou $v' = nv$,

$$\delta k^2 = v^2 (n^2 - 1), \quad \text{ou} \quad \frac{\delta k^2}{v^2} = n^2 - 1.$$

Le premier membre est proportionnel à l'action du corps, et il représente la *puissance réfractive*.

2863. Angle limite. — Le premier rayon incident qui ne peut émerger, est celui pour lequel la composante normale de la vitesse est détruite au moment où la particule lumineuse arrive en mn . Or, v et v' étant les vitesses dans le corps, et dans le vide, $v \cos r$ est la composante normale en $m'n'$, et $v'^2 \cos^2 r = \delta k^2$, le carré de cette composante en mn . L'angle limite sera donc donné par l'équation

$$v'^2 \cos^2 r - \delta k^2 = 0.$$

Or, on a $\delta k^2 = (n^2 - 1) v^2 = (n^2 - 1) (v'^2 : n^2)$; substituant, il vient $v'^2 \cos^2 r - (n^2 - 1) \frac{v'^2}{n^2} = 0$; d'où $\cos^2 r = 1 - \frac{1}{n^2}$, et $\sin r = \frac{1}{n}$,

comme nous le savions. La réflexion se fait alors sur la surface mn ; mais, plus la valeur de r augmente, plus elle se fait près de AB. Enfin, elle a lieu en $m'n'$, quand on a $v' \cos r = 0$, ou $r = 90^\circ$.

S'il s'agit de deux milieux consécutifs, et si n et n' sont leurs indices de réfraction, et v' , v'' les vitesses de la lumière dans ces milieux, on aurait $n = \frac{v'}{v}$, $n' = \frac{v''}{v}$, d'où $\frac{n'}{n} = \frac{v''}{v'}$ pour l'indice de réfraction relatif.

II. Expériences qui permettent de décider entre les deux systèmes.

2864. — On vient de voir que le système de l'émission rend compte d'une manière satisfaisante des lois de la réflexion et de la réfraction ; mais il y a bien d'autres phénomènes qu'il ne peut expliquer, et certains cas où il est en contradiction avec les faits. Par exemple, on ne conçoit pas comment les particules lancées suivant la même droite dans deux rayons qui marchent en sens contraire, ne se gênent pas en s'entre-choquant ; le phénomène de l'interférence est inexplicable, et nous rencontrerons bien d'autres circonstances où le système de l'émission est en défaut.

Il se présente, du reste, une particularité qui permet de prononcer entre ce système et celui des ondulations. D'après le premier (2862), la vitesse de la lumière est la plus grande dans le milieu le plus réfringent, tandis que c'est le contraire dans le système des ondulations (2843). On pourrait donc, comme l'a proposé Arago, décider entre les deux systèmes, si l'on pouvait comparer directement les vitesses de la lumière dans deux milieux différents ; par exemple, l'eau et l'air.

2865. Essais d'Arago. — En 1839, Arago, après avoir reconnu toute la fécondité de la méthode du miroir tournant, employée par Wheatstone dans ses recherches sur la vitesse de l'électricité (III, 2048), songea à en faire usage pour comparer les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau ; il exposa en détail le système d'expériences qu'il avait imaginé, et fit même construire les appareils destinés à les exécuter¹. Il se proposait de recevoir sur un miroir tournant autour d'un axe vertical les rayons partant de deux points lumineux brillant instantanément et simultanément l'un au-dessus de l'autre. Les rayons partant d'un des deux points ne devaient arriver au miroir qu'après avoir traversé une colonne d'eau ; de sorte que, la lumière ne marchant pas avec la même vitesse dans ce liquide et dans l'air, les images réfléchies ne devaient plus être sur la même verticale ; celle qui serait en avant, dans le sens du mouvement du miroir, correspondant aux rayons qui auraient marché le plus lentement, le miroir s'étant déplacé pendant le temps qui sépare les moments d'arrivée des deux lumières à sa surface. Avec une vitesse de 1000 tours par seconde et une colonne d'eau de 14 mètres de longueur, le calcul indiquait une déviation de 30 secondes entre les deux images des points lumineux. Pour saisir le double faisceau réfléchi, et observer cette déviation, Arago proposait de disposer autour du miroir, des observateurs munis chacun d'une lunette, et de faire jaillir la lumière des deux points un grand nombre de fois, jusqu'à ce que le hasard dirigeât le double faisceau réfléchi dans l'une des lunettes. Mais l'affaiblissement de la vue de l'illustre astronome ne lui permit pas d'exécuter ces expériences, dont il lui reste l'honneur d'avoir posé les bases. MM. L. Foucault et Fizeau

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXXI, p. 49.

imaginèrent, chacun de leur côté, des appareils avec lesquels ils ramenaient dans une direction constante les faisceaux réfléchis par le miroir tournant, et ils firent de nombreuses expériences, qu'ils publièrent en 1850.

2866. Expériences de L. Foucault. — Considérons un trait lumineux S (fig. 1992) perpendiculaire au plan de la figure, et soit K une lentille convergente achromatique, qui forme en S' une image du trait S . Si l'on place un miroir plan en mn , cette image sera rejetée, par la réflexion, en un point s' symétrique de S' , et si le miroir mn tourne autour d'un axe o , perpendiculaire au plan de la figure, cette image décrira un arc de cercle ayant son centre en o , et soutendant un angle double du déplacement angulaire du miroir (2436). Plaçons en s' un miroir sphérique M ayant aussi son centre en o . Les rayons réfléchis en mn et tombant en s' , seront renvoyés par le miroir M en un faisceau qui coïncidera avec le faisceau incident, se réfléchira de nouveau en mn , et

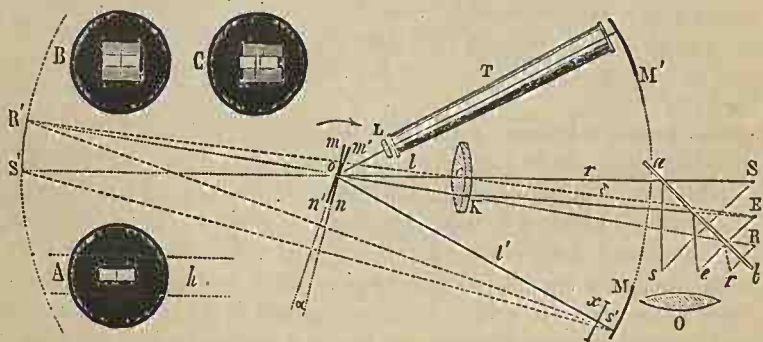


Fig. 1992.

reviendra au point de départ S , quelle que soit la position du miroir tournant mn , pourvu que le faisceau qu'il réfléchit rencontre le miroir M . Cette image, se confondant avec le trait lumineux, on la réfléchit dans la direction as , au moyen d'une glace sans tain ab , de manière qu'en plaçant l'œil en s , on la verra par intermittences, si le miroir tourne lentement, et d'une manière continue, s'il fait plus de 10 tours par seconde. Cette image s'observe au moyen d'une loupe O munie d'un fil focal.

Si l'on fait en sorte que l'image coïncide avec le fil quand le miroir ne fait que 20 à 30 tours par seconde, on le voit s'en écarter dans le sens de la rotation quand il fait plusieurs centaines de tours. Par exemple, le miroir tournant dans le sens de la flèche, l'image se déplace de S en E , ou de s en e . Le déplacement de l'image provient de ce que le miroir mn ayant eu le temps de tourner d'une quantité sensible pendant qu'une particule ou une pulsation lumineuse réfléchie s'est transportée de o en s' et de s' en o , celle-ci rencontre, au retour, le miroir dans la position $m'n'$, et la lumière qu'il réfléchit est dans le même cas que si elle partait du point R' . L'axe du faisceau réfléchi pour la seconde fois sur $m'n'$

est donc dévié, et forme en o , avec le faisceau incident So , un angle double du déplacement a du miroir.

Calcul de la vitesse. — Voyons maintenant comment la vitesse de la lumière est liée à la déviation observée. Soit r la distance Sc de S à la lentille K ; l et l' les distances co et os' ; d l'arc de déviation SE ou se ; n le nombre de tours que fait le miroir mn par seconde; et enfin V la vitesse de la lumière dans l'air. Le rayon réfléchi en M trouvant le miroir mn , en $m'n'$, quand il y revient, se réfléchit suivant oK , et la déviation serait SoR , si le rayon n'était pas déplacé par la lentille cK , ou, ce qui revient au même, si le centre optique c était en o . Supposons d'abord qu'il en soit ainsi; alors l'angle de déviation SoR est double du déplacement angulaire α que subit le miroir pendant que la lumière franchit l'espace $2os' = 2l'$. Le temps employé par la lumière pour parcourir cet espace est $2l' : V$. Le déplacement angulaire du miroir pendant ce temps, en fraction de tour, sera $\alpha = 2l'n : V$, et l'arc correspondant, ayant pour rayon $oS = r + l$, sera $D = 2\alpha \cdot 2\pi \cdot oS = 8\pi n l' (r + l) : V$.

Mais le rayon réfléchi oK est dévié par la lentille cK ; menons $R'e$, par le centre optique c et par R' , point symétrique de s' par rapport au miroir $m'n'$; l'image du point R' formé par la lentille sera en E , sur l'axe secondaire $R'e$, et l'angle de déviation sera $\delta = ScE$. Or, les triangles $oR'S'$, $cR'S'$ donnent $\sin R'eS' = \sin \delta = R'S' : S'e = R'S' : (l + l')$, et $\sin R'oS' = \sin 2\alpha = R'S' : l'$. Divisant ces deux égalités membre à membre, prenant les angles pour les sinus et remplaçant 2α par sa valeur $4nl' : V$, il vient $\delta = 4nl'^2 : V(l + l')$. L'arc $SE = d = 2\pi\delta$, dont le rayon est r , est alors

$$d = \frac{8\pi l'^2 nr}{V(l+l')} ; \quad \text{d'où } V = \frac{8\pi l'^2 r n}{(l+l') d}$$

formule qui donne la vitesse de la lumière dans l'air, en fonction de d .

En supposant V connu, on peut chercher quel serait d dans des conditions données. Faisons, par exemple, $r = Sc = 3^m$, $l' = os' = 4^m$, et $l = co = 1^m, 88$, et supposons que le miroir fasse 800 tours par seconde, on trouvera $d = 0^{mm}, 6$; quantité facile à distinguer même à l'œil nu.

La vitesse de la lumière ainsi déterminée, ne peut l'être que par à peu près, la plus faible erreur dans la valeur du facteur qui contient l , l' , et r , étant multipliée par un très-grand nombre, $n : d$; et ce n'est que par le hasard que Foucault a pu arriver à un résultat peu éloigné du nombre connu. Mais il n'en est pas moins merveilleux qu'on ait pu, en ne disposant que d'une distance de quelques mètres, constater la transmission progressive de la lumière.

Vitesse dans l'eau. — Cette méthode, si elle était suffisamment précise, pourrait être employée à mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau, en faisant franchir aux rayons une colonne de ce liquide, T (*fig.* 1992), limitée par des glaces, et disposée entre le miroir tournant mn et le miroir sphérique M' . Seulement, comme la colonne d'eau dévie les rayons, pour que le foyer se fasse en M' , il faut corriger l'effet de l'eau par une lentille divergente placée en L .

La colonne d'eau ne pouvant exister dans toute la distance oM' , on n'obtient en réalité que la vitesse moyenne U de la lumière, dans un espace occupé en partie par l'eau, et en partie par l'air. Si E et A sont les espaces occupés par ces deux fluides, et V' et V la vitesse qu'y possède la lumière, les temps employés à parcourir les espaces A et E seront $\frac{A}{V}$ et $\frac{E}{V'}$, et le temps total, $\frac{A}{V} + \frac{E}{V'} = \frac{AV' + EV}{VV'}$. Si l'on divise l'espace total $A + E$ par ce temps, on obtiendra la vitesse moyenne

$$U = \frac{VV'(A + E)}{AV' + EV}; \quad \text{d'où } V' = \frac{EVU}{(A + E)V - AU};$$

formule dans laquelle V et U sont donnés par l'expérience.

2867. Comparaison des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau. — La méthode de Foucault se prête facilement à une semblable comparaison; en effet, il suffit d'observer quelle est la plus grande des déviations, quand les rayons ont traversé simplement l'air ou quand ils ont traversé une colonne d'eau. — Pour cela, on place en S (fig. 1992) un écran percé d'une ouverture carrée, traversée par un fil, ou *mire*, parallèle à l'axe du miroir tournant, mire dont on observe la déviation en O . On fait d'abord coïncider l'image de cette mire avec le fil focal de la loupe O , quand la vitesse de rotation est assez faible pour qu'il n'y ait pas de déviation. Un second miroir sphérique, ayant son centre en o , est placé en M' , ce qui rend les intermittences lumineuses deux fois plus fréquentes qu'avec le seul miroir M . Les rayons venus de M' ont eu à traverser deux fois une colonne d'eau T . Devant le miroir M , est placé un écran x , représenté à part en A , percé d'une fente horizontale moins haute que l'ouverture carrée de l'écran placé en S ; de sorte que l'image observée en O présente la forme d'un carré, à travers lequel se dessine l'image de la mire, et dans lequel on distingue sur un fond verdâtre formé par la lumière qui a traversé la colonne d'eau; une bande horizontale blanche et plus éclatante formée par la superposition des rayons réfléchis en M et M' , comme on le voit en B .

Quand le mouvement du miroir mn est très-rapide, la déviation se manifeste, l'image de la mire ne coïncide plus avec le fil du micromètre, et l'image de l'ouverture carrée prend l'aspect représenté en C . La bande blanche moyenne est moins déviée que le reste du carré lumineux; d'où l'on doit conclure que le miroir mn se déplace moins pendant le passage de chaque pulsation lumineuse à travers l'air, que pendant son passage à travers l'eau. Avec les dimensions ci-dessus, et en supposant $E = 3^m$, et $A = 1^m$, et 500 tours par seconde, la différence des déviations était de $0^{mm}, 094$. *La vitesse de la lumière est donc moindre dans l'eau que dans l'air*, comme il résulte du système des ondulations. *Le système de l'émission est donc en contradiction avec l'expérience*, et doit, par conséquent, être rejeté.

2868. Disposition du miroir tournant. — Le miroir, représenté en m (fig. 1993), est composé de deux glaces argentées, enchâssées dos à dos dans un anneau. Ce système est fixé à l'arbre d'une petite turbine r , disposée à peu près

comme la sirène acoustique, et dont on voit une coupe en $r'r'$. De la vapeur arrivant en V sort par deux ouvertures sous la roue r, r' , dont elle frappe les aubes obliques, après avoir traversé un tube aplati et chauffé, T, dans lequel elle se dessèche. Depuis, on l'a remplacée par le vent d'un soufflet de forge. Le nombre des tours accomplis en une seconde se calcule au moyen du son produit par la sortie de la vapeur, en faisant un calcul inverse de celui qu'on applique à la sirène (I, 623).

L'axe tournant est terminé par des pointes qui s'engagent dans les cavités coniques de deux vis d'acier forées, à travers lesquelles arrive de l'huile comprimée dans des réservoirs, b , par de l'air venant des flacons t, t' . Une pièce triangulaire o , dont on lime plus ou moins les angles, sert à faire coïncider l'axe d'inertie avec l'axe de figure du système tournant, ce qui a lieu quand la rotation n'est plus accompagnée d'un son produit par les vibrations de l'arbre.

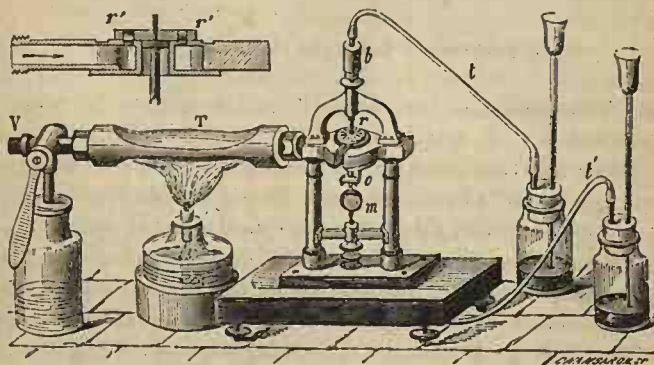


Fig. 1993.

2869. Expériences de MM. Fizeau et Breguet. — Pendant que L. Foucault démontrait que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau, MM. Fizeau et Breguet arrivaient, de leur côté, au même résultat, par une méthode semblable. Dans leur appareil, qui était installé à l'Observatoire de Paris, le mouvement était imprimé au miroir plan par un mécanisme d'horlogerie, construit par M. Breguet, avec une telle perfection, qu'on pouvait obtenir 2000 tours par seconde ; mais les expériences n'ont été faites qu'avec des vitesses de 500 à 600 tours. Les autres parties de l'appareil et la manière d'expérimenter ne diffèrent que par les détails, des dispositions et de la marche adoptées par Foucault, ce qui nous dispense d'entrer dans de plus longs détails.

CHAPITRE IX

DE LA DIFFRACTION — RÉSEAUX

Lumen aliquando per sui communicatio-
nem reddit obscuriorem superficiem corporis
alicunde ac prius illustratum.

(GRIMALDI, *Physico-Mathesis de lumine*,
prop. 22.)

§ 1. — DIFFRACTION

I. Diffraction par des bords rectilignes indéfinis.

2870. Historique. — Avant Grimaldi, on admettait que les rayons lumineux qui rasant un corps opaque continuaient à marcher en ligne droite, et que l'ombre projetée derrière ce corps était limitée par la surface du cône enveloppant ayant son sommet au point lumineux, surface que l'on appelle la limite de l'ombre géométrique. Mais, s'il paraît en être ainsi quand la source de lumière présente certaines dimensions, il n'en est plus de même quand ces dimensions sont assez petites pour qu'on puisse la considérer comme un point; alors, il pénètre de la lumière à l'intérieur de l'ombre géométrique, et certaines régions de l'espace extérieur sont obscures. Ces phénomènes ont été découverts par Grimaldi, en 1665, sur des rayons ayant traversé un petit trou, et il leur a donné le nom de *diffraction*. Étudiés d'abord par Hooke, Newton, Fraunhofer, Young, Arago, Biot, Pouillet..., leurs lois ont été déterminées et expliquées par Fresnel, dans le système des ondulations, au moyen du principe des interférences.

2871. Description des phénomènes. — 1° Considérons un écran AB (fig. 1996) à bord rectiligne A, et un trait lumineux de lumière simple, *s*, parallèle à ce bord. La limite de l'ombre géométrique, sur un écran nP placé à une certaine distance, sera une droite P parallèle au bord A. Mais l'expérience montre que la lumière pénètre dans cette ombre géométrique, jusqu'à une petite distance, en diminuant rapidement d'intensité d'une manière continue. De plus, on observe dans l'espace Pn des franges alternativement brillantes et sombres, parallèles au bord de l'écran, allant en diminuant de netteté, et disparaissant à une petite distance du point P.

2° Quand la lumière, partant du trait *s*, passe par une fente étroite qui lui est parallèle, il se forme des franges d'autant plus espacées que la fente est plus étroite : les unes dans l'intérieur du faisceau géométrique, les autres en dehors. Les premières changent d'aspect suivant la distance de l'écran.

3° Deux fentes très-rapprochées produisent aussi des franges, d'autant plus écartées que les fentes sont plus près l'une de l'autre.

4° Si l'on place un écran étroit parallèle à un trait lumineux, entre ce trait et un écran de projection, il se forme, tant dans l'ombre géométrique qu'en dehors, des franges d'autant plus écartées que l'écran est plus étroit.

Fresnel a constaté que ces résultats sont indépendants de l'épaisseur, de la forme, de l'état et de la nature des bords des fentes ou des écrans. Par exemple, le bord de l'écran étant dans les différentes parties de sa longueur, arrondi, tranchant, poli ou dépoli, recouvert de noir de fumée, fait de verre ou de laiton, les franges conservent leur régularité dans toute leur longueur. Malus et Berthollet avaient déjà fait quelques observations de ce genre. De Haldat, après les avoir répétées, a cherché à modifier encore plus profondément les surfaces que rasant les rayons; il a employé des lames de fer ou de cuivre chauffées au rouge blanc, ou refroidies à -10° ; des lames de fer aimantées par des aimants puissants; il a fait passer à travers les fils servant d'écran étroit, des décharges électriques ou des courants capables de les faire rougir à blanc; enfin, il a projeté au travers des faisceaux lumineux, avant leur arrivée à l'obstacle devant les diffracter, des traits vifs de lumière, des décharges électriques; les franges ont toujours conservé le même aspect¹.

Quant aux lois des phénomènes, nous les ferons connaître en développant les explications d'où elles découlent; et nous en agissons ainsi d'autant plus volontiers que la plupart n'ont été découvertes qu'à l'aide de la théorie.

Franges irisées. — L'expérience prouve que les franges données par de la lumière simple sont d'autant plus serrées que les rayons sont plus réfringibles. Il résulte de là que la lumière blanche donnera des franges irisées dans lesquelles le violet sera en dedans, c'est-à-dire du côté de la droite passant par le point lumineux et par le bord de l'écran, ou par le milieu de la fente ou de l'écran étroit. La lumière sera donc *décomposée par diffraction*.

2872. Diffraction des radiations calorifiques et chimiques. — M. Knoblauch a, dès 1846, annoncé la diffraction de la chaleur; il a constaté qu'un faisceau calorifique sortant d'une fente, diverge en dehors des limites géométriques, et d'autant plus que la source linéaire des rayons est plus éloignée, et que la fente est plus étroite. La température était observée au moyen d'une pile thermo-électrique dont la base était couverte par un écran à fente étroite parallèle aux franges. — MM. Foucault et Fizeau, en appliquant leur méthode thermométrique (2837), ont reconnu des variations de température dans le voisinage de la limite géométrique de l'ombre d'un écran parallèle à une fente par laquelle entraient les rayons solaires. La température augmentait de l'intérieur de l'ombre à sa limite géométrique, atteignait un maximum dans la première frange brillante, et ce maximum était supérieur à la température de l'espace où les rayons parvenaient sans être influencés par l'écran.

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. XLI, p. 424.

Les radiations *chimiques* éprouvent aussi la diffraction, car Arago et M. Abria les ont photographiées sur une couche de chlorure d'argent.

2872. Appareil de diffraction. — Les expériences de diffraction se font avec le *banc de diffraction* (fig. 1980). La lumière part de la ligne focale d'une lentille cylindrique recevant les rayons solaires. Cette lentille est fixée à une plaque que l'on engage dans des coulisses de l'échancrure E d'un support AV (fig. 1994). La vis V sert à disposer la lentille bien verticalement. Quand on veut la remplacer par une fente, on glisse dans la coulisse le système C, cc, portant deux lames parallèles l, l', articulées par leurs extrémités à deux petites barres aussi parallèles. La vis v, à laquelle s'oppose le ressort r, sert à faire varier la largeur de la fente.

Un second support, semblable à A, reçoit différentes plaques, ou *fiches*, destinées à diffracter la lumière. Veut-on observer les franges produites par le bord d'un écran, on emploie un système semblable à C, dont on a enlevé l'une

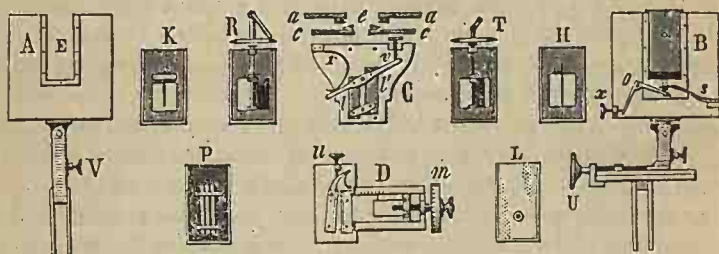


Fig. 1994.

des lames; la vis *v* sert alors à déplacer le bord de l'écran parallèlement à lui-même. — La fiche D, imaginée par Sgravesande, sert à observer les effets d'une fente étroite. La largeur peut être modifiée et mesurée au moyen de la vis micrométrique *m*. La vis *u* sert à incliner un des bords, quand on veut que la fente soit plus large à une extrémité qu'à l'autre. — Les effets d'un écran étroit s'observent au moyen de la fiche H, portant une large ouverture dans laquelle est tendu un fil métallique. — Pour expérimenter avec deux fentes, on emploie trois gros fils métalliques parallèles, P, laissant entre eux deux espaces très-étroits.

Les franges sont reçues, soit sur un écran en verre dépoli fixé à un support que porte la règle du banc de diffraction, soit au foyer du micromètre de Fresnel, au moyen duquel on peut mesurer leurs distances relatives.

On observe facilement des franges, en regardant la flamme d'une bougie cachée en partie par un écran à ouverture étroite, à travers une fente faite dans une carte par la pointe d'un canif, ou en plaçant un cheveu devant l'œil.

2873. De l'explication de la diffraction. — On a d'abord attribué la diffraction à la présence d'une couche d'air condensée à la surface des corps,

et déviant les rayons par réfraction. De Mairan admettait, en outre, des réflexions dans les couches d'air, dont la densité augmentait rapidement en s'approchant de la surface du corps. Mais Newton produisit la diffraction avec un cheveu entouré d'eau entre deux lames de verre; et il supposa que les particules lumineuses qui rasant les bords d'un écran en sont attirées ou repoussées, suivant la distance. Il y a d'abord attraction décroissante quand on s'éloigne du bord, puis répulsion, puis attraction, et ainsi de suite jusqu'à une très-petite distance. On peut, au moyen de cette hypothèse peu vraisemblable, rendre compte d'une partie des phénomènes; mais la forme et la nature des bords des écrans devraient avoir de l'influence, et l'on ne peut expliquer les franges qui se forment dans l'ombre d'un corps étroit. Newton niait même l'existence de ces franges, qui pourtant sont faciles à observer. Nous allons voir avec quelle simplicité la théorie des ondulations rend compte de tous les faits de diffraction. Les premiers essais dans cette voie sont dus à Young, qui voyait dans les franges, le résultat d'interférences de rayons directs avec des rayons réfléchis par les bords des corps, dont la nature ne devrait pas alors être indifférente. En outre, il existe des faits contredisant cette explication. Fresnel, en partant du principe d'Huyghens et de celui des interférences, est arrivé à donner une théorie complète des phénomènes de diffraction, et à calculer analytiquement, dans les divers cas, les effets résultants des ondes élémentaires aux différents points d'un écran sur lequel sont reçues les franges, effets inégaux quand des obstacles interceptent une partie de la surface de l'onde¹. Cauchy et M. Knochenhauer ont considéré le cas des franges produites par les fentes, et M. Quet, ce dernier cas et celui des franges produites par un écran très-étroit². M. Schwersch a publié un

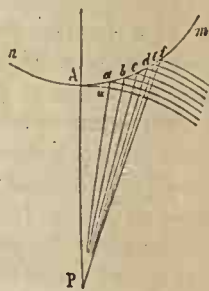


Fig. 1995.

Traité sur les phénomènes de diffraction. Ces divers travaux mathématiques ont conduit constamment à des résultats d'accord avec ceux de l'expérience. Ne pouvant suivre ici cette marche analytique, nous emploierons une méthode élémentaire, donnée par Fresnel, et qui s'appuie sur un lemme que nous allons d'abord énoncer.

2874. Lemme. — Soit un point P (fig. 1995) placé à une certaine distance d'un point lumineux situé sur le prolongement de PA, et nm la surface d'une onde sphérique ayant son centre en ce dernier point. L'ébranlement lumineux reçu au point P peut, d'après le principe d'Huyghens (2823), être considéré comme l'effet résultant des actions qu'y exercent les ondes émanant des divers points de la surface nm, considérés comme autant de centres d'ébranlement. Il est facile de voir que l'effet résultant produit en P n'est dû qu'aux portions de

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XI, p. 246.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLIX, pp. 385 et 417.

la surface d'onde nm , très-voisines de la droite PA normale à cette surface, ou très-voisines du point A , que nous appellerons le pôle du point P . En effet, désignons par r la distance AP , et décrivons du point P comme centre avec des rayons égaux à r , $r + \frac{1}{2}\lambda$, $r + \frac{2}{2}\lambda$, $r + \frac{3}{2}\lambda$, ..., des arcs de cercle, qui divisent l'arc Am , aux points a, b, c, d, \dots , en parties de plus en plus petites, que nous nommerons *éléments d'interférence*. A mesure qu'on s'éloignera du point A , deux éléments consécutifs différeront de moins en moins entre eux, de manière qu'on pourra les regarder comme égaux à partir d'un certain point, d par exemple. Si nous joignons les points a, b, c, d, e, \dots au point P , les rayons dP , eP , seront sensiblement parallèles, et, comme leur différence de longueur est égale à $\frac{1}{2}\lambda$, ils interféreront en arrivant en P . On peut en dire autant de tous les rayons partant des différents points des arcs sensiblement égaux de, ef : les ébranlements provenant de tous les points de ces arcs s'entre-détruisent deux à deux. Il en est de même des arcs situés au-delà du point d considérés deux à deux, de sorte que la lumière reçue en P proviendra presque totalement des arcs les plus rapprochés du pôle A . Ces arcs étant inégaux entre eux, les ébranlements produits par les différents points de l'arc Aa ne sont détruits que partiellement par ceux qui proviennent des points moins nombreux de ab , et, ceux-ci étant eux-mêmes en partie détruits par ceux qui viennent de l'arc bc , l'action de Aa l'emportera beaucoup sur ce qui restera de celle de ab .

On voit que l'intensité de la lumière envoyée en P par les différents points de la surface de l'onde, décroît très-rapidement à mesure que ces points s'éloignent du pôle A . Le sens du mouvement vibratoire de l'éther en P est donc déterminé par celui qui dépend du premier arc Aa , et la lumière reçue en P est plus intense dans la direction de la normale PA à la surface de l'onde que dans une direction oblique, comme l'avait déjà établi Huyghens, et même est nulle dès qu'on s'écarte un peu de cette normale. — Si l'intensité lumineuse produite en P par la demi-onde Am est 1, celle qui résultera de l'action de l'onde entière sera 2, plus petite, du reste, que celle qui résulterait des actions des deux premiers éléments, Aa , s'ils étaient seuls, une partie de leur effet étant détruite par les arcs suivants.

2875. I. Effets produits par le bord d'un écran. — Joignons le point lumineux s au bord A de l'écran AB (fig. 1996)¹, et soit 1 l'intensité de la lumière reçue au point P , et provenant de la demi-onde Am . Considérons un point e tel que l'on ait $Ac - ac = \frac{1}{2}\lambda$. Ce point recevra, de la demi-onde am , de la lumière d'intensité 1, et de l'arc aA , de la lumière d'intensité plus grande que 1; car les ébranlements émanant des différents points de l'arc aA , ne sont plus partiellement détruits par ceux qui émaneraient de l'arc suivant, puisque ce dernier est intercepté. Il y aura donc en e une lumière plus vive qu'en P , et d'intensité $1 + l$, plus grande que 2.

¹ Pour rendre les résultats distincts, on a, dans cette figure, ainsi que dans les suivantes, énormément exagéré les distances des franges, et les longueurs qui représentent λ .

Considérons le point n tel que $An - nb = 2\frac{1}{2}\lambda$, et divisons l'arc Ab en deux éléments Aa' , $a'b$, tels que l'on ait $An - a'n = \frac{1}{2}\lambda$, et $a'n - bn = \frac{1}{2}\lambda$; le point a' étant nécessairement autre que a . Les actions engendrées par les différents points des deux arcs Aa' , $a'b$, se détruiront presque totalement, et l'intensité lumineuse en n ne sera que $1 + k$, k étant très-petit. En c' (fig. 1997), point tel que l'on a $c'A - c'd = \frac{3}{2}\lambda$, l'intensité sera $1 + l'$, l' étant beaucoup plus grand que 1; car les actions provenant des différents points des deux arcs les plus éloignés de d s'entre-détruisent presque entièrement, celles qui émanent du plus rapproché conservent presque tout leur effet, et l' est à peine moindre que l . On verra de même qu'un peu au-delà de c' , la lumière n'aurait qu'une intensité à peine supérieure à 1..... On aura donc alternativement des points sombres et brillants, ou des franges, si le point s est remplacé par un trait

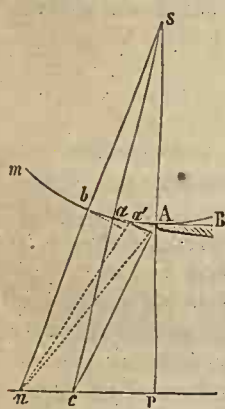


Fig. 1996.

lumineux parallèle au bord de l'écran. Ces franges seront de moins en moins nettes; les arcs dont les effets se détruisent ne le faisant pas totalement, de sorte qu'un peu de lumière s'ajoute aux bandes sombres, et en quantité d'autant plus grande que leur ordre est plus élevé. Enfin, aux points assez éloignés de P , pour que la partie interceptée de la demi-onde soit trop

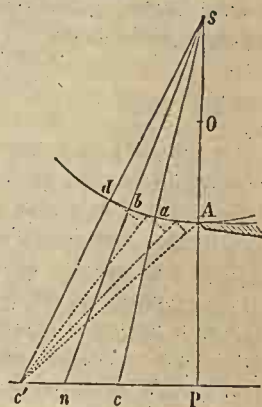


Fig. 1997.

éloignée du pôle d pour avoir une influence sensible, la lumière sera uniforme et d'intensité 2.

La longueur λ étant plus petite pour les rayons violets que pour les rouges, les franges seront plus serrées pour la première espèce de rayons que pour la seconde, de là les *franges irisées* que donne la lumière blanche.

Trajectoire hyperbolique des franges. — La trajectoire formée par une frange d'un certain ordre, considérée à différentes distances de l'écran AB , appartient à une branche d'*hyperbole* dont les foyers sont en A et s . En effet, si l'on considère la frange obscure c' (fig. 1997) de rang m , on a $Ac' - dc' = m\frac{1}{2}\lambda$. Changeant les signes et ajoutant aux deux membres sd ou sA , il vient $sc' - Ac' = sA - m\frac{1}{2}\lambda$. La différence $sc' - Ac'$ est donc constante, quel que soit AP , et le point P est sur une branche d'*hyperbole* dont les foyers sont en A et en s .

Pour obtenir l'équation de cette hyperbole en fonction de la distance $sA = 2C$

(fig. 1997), de la longueur d'ondulation λ , et du nombre m , posons $OP = x$, $Pc' = y$, et cherchons les valeurs des axes $2A$ et $2B$ de la courbe. On a d'abord $2A = sc' - Ac' = s\lambda - m\frac{1}{2}\lambda = 2C - m\frac{1}{2}\lambda$; d'où $A^2 = C\left(C - m\frac{1}{2}\lambda\right)$, en négligeant le terme en λ^2 . La relation connue $B^2 = C^2 - A^2$ donne alors $B^2 = C^2 - C\left(C - m\frac{1}{2}\lambda\right) = mC\frac{1}{2}\lambda$. L'équation de l'hyperbole rapportée à son centre et à ses axes, est donc approximativement :

$$C\left(C - m\frac{1}{2}\lambda\right)y^2 - mC\frac{1}{2}\lambda x^2 = -C^2\left(C - m\frac{1}{2}\lambda\right)m\frac{1}{2}\lambda,$$

$$\text{ou } Cy^2 - m\frac{1}{2}\lambda x^2 = -C^2m\frac{1}{2}\lambda,$$

en négligeant $m\frac{1}{2}\lambda$ devant C . — Si l'on veut rapporter la courbe au point A comme origine, il faut remplacer x par $x + C$, et l'on obtient une nouvelle équation, d'où l'on tire

$$y^2 = \frac{m\frac{1}{2}\lambda(x^2 + 2Cx)}{C}.$$

On voit que y est proportionnel à la racine carrée de m ; les franges sont donc d'autant plus serrées que leur ordre est plus élevé. On voit aussi que, pour les mêmes valeurs de x et de m , y est d'autant plus petit que C est plus grand. Les franges sont donc d'autant plus éloignées de l'ombre géométrique, et d'autant plus espacées, que le point s est plus près de l'écran A .

Ces résultats ont été vérifiés par Fresnel, au moyen de son micromètre. Comme la limite de l'ombre géométrique ne se voit pas, pour mesurer sa distance aux franges, il disposait du côté opposé au bord A , un autre écran, assez éloigné pour que les franges produites par les deux bords ne se modifiassent pas mutuellement, et il déduisait la distance entre les limites des deux ombres géométriques, des distances du trait lumineux au plan commun des écrans, et au plan qui recevait les franges. Mesurant ensuite l'intervalle entre deux franges de même ordre appartenant aux deux systèmes, il le retranchait de la distance entre les limites des ombres géométriques, et obtenait ainsi le double de la distance d'une des franges à la limite d'ombre du même côté. — On peut aussi tirer de l'équation précédente la valeur de λ , quand on connaît les valeurs de x , y et C .

Lumière dans l'ombre géométrique. — Les points pris dans l'ombre géométrique, reçoivent la lumière d'une portion d'onde d'autant plus petite et plus éloignée du pôle correspondant, que ces points sont plus éloignés du bord de l'écran; et la partie la plus efficace de cette portion étant enlevée dans un espace de plus en plus grand, l'éclat va en diminuant rapidement et d'une manière continue.

Remarque. — On voit pourquoi la nature et la forme du bord de l'écran n'ont pas d'influence sur les résultats, l'écran ne faisant qu'intercepter une partie de la surface de l'onde. Cependant, si cet écran était très-épais et si son

bord présentait une courbure peu prononcée, la surface de l'onde, considérée à la face postérieure de l'écran, n'aurait plus une intensité uniforme, car elle recevrait des franges particulières provenant d'une surface d'onde passant par la face antérieure. Ces franges sont très-faibles, très-serrées et insensibles tant que l'écran n'est pas trop épais.

2876. Franges au bord d'un miroir. — On peut obtenir des franges au bord d'un miroir incliné; car les rayons réfléchis sont dans le même cas que s'ils venaient de l'image symétrique du trait lumineux. Les franges se font du côté du miroir, et la lumière continue se manifeste au-delà de son bord, où l'espace non réfléchissant remplace l'écran. On voit en R (fig. 1994) la section transversale du petit miroir incliné servant à cette expérience; au-dessous, est dessinée la fiche à laquelle il est fixé.

2877. II. Franges produites par une fente. — Dans ce cas, il peut se former des franges dans la partie éclairée et dans l'ombre, soit simultanément, soit séparément, et la frange centrale peut être obscure ou brillante, suivant la largeur de la fente ou la distance à laquelle on observe les franges.

1° Franges intérieures. — Soit AB la fente très-étroite (fig. 1998), s un trait lumineux parallèle, et supposons d'abord l'écran A'B' placé à une distance telle que les différences AP — oP et BP — oP soient égales à $\frac{1}{2}\lambda$; tous les points de la partie AB de la surface de l'onde enverront en P des ébranlements concordants. Il en sera de même, à fortiori, si l'écran A'B' est plus éloigné; la différence AP — oP étant alors moindre que $\frac{1}{2}\lambda$. Il y aura donc une bande brillante en P.

Si nous rapprochons l'écran A'B', de manière que les différences AP — oP et BP — oP soient plus grandes que $\frac{1}{2}\lambda$ et égales à $n\frac{1}{2}\lambda$, quand n sera pair, chaque moitié de la partie AB de l'onde pourra se diviser en un nombre pair d'éléments d'interférence (2874) dont les actions se détruiront deux à deux; la frange centrale sera donc obscure. Si n est impair, il restera un de ces éléments qui ne sera pas détruit, et la frange centrale sera brillante. Cette frange sera donc successivement brillante ou obscure, quand on écartera peu à peu l'écran de la fente, jusqu'à ce que la distance oP soit telle que AP — oP = $\frac{1}{2}\lambda$; distance à partir de laquelle la frange centrale restera toujours brillante.

Au lieu de faire varier la distance oP, on peut la laisser constante, et rétrécir la fente, ce qui produit le même effet que si l'on éloigne l'écran. Tous ces résultats se vérifient par l'expérience.

Voyons maintenant ce qui se passe en A'B' à droite et à gauche du point P, et supposons, pour fixer les idées, que la frange centrale étant brillante, on ait AP — oP = $\frac{1}{2}\lambda$; il sera facile d'étendre ce que nous allons dire au cas d'une



Fig. 1998.

frange centrale obscure. Considérons le point n tel que $Bn - An = 2\frac{1}{2}\lambda$. Nous pourrions partager l'arc AB en deux éléments d'interférence aA , aB . Les ébranlements communiqués au point n par les deux arcs aA , aB se détruiraient en grande partie, et il y aura en n une bande sombre. En c , tel que $cB - cA = \frac{3}{2}\lambda$, il y aura une bande lumineuse; car on pourra partager AB en trois éléments d'interférence, les actions des deux éléments les plus éloignés de c se détruiraient presque totalement, et il restera l'effet de l'arc contigu au bord A , arc qui donnera en c une bande brillante; et ainsi de suite.

Il est facile de voir que les franges seront d'autant plus écartées que l'écran $A'B'$ sera plus éloigné de la fente; car, pour avoir la même différence de marche dans les rayons nA , nB , il faut d'autant plus s'éloigner du point P que la distance oP est plus grande; il en est de même quand la fente devient plus étroite. — Si l'écran vient à une distance $A''B''$ telle que $BA'' - AA'' = \frac{1}{2}\lambda$, la première bande sombre sera en A'' , et, par conséquent, il n'y aura pas de franges dans l'espace éclairé; et cela aura lieu pour une distance d'autant plus petite de l'écran, que la fente sera plus étroite.

Trajectoire des franges. — Ces résultats peuvent aussi se déduire de la courbe que forme une frange d'un même ordre quand l'écran se déplace. Cette courbe est évidemment une branche d'hyperbole dont les foyers sont en A et B . Mais comme ces foyers sont très-rapprochés, la courbe se confond sensiblement avec ses asymptotes, et peut être considérée comme une ligne droite. L'équation de l'asymptote est $Bx = Ay$, en appelant y la distance de l'écran $A'B'$ à la fente, et x la distance au point P de la frange considérée. Or, on a $2A = m\frac{1}{2}\lambda$; et, en appelant $2C$ la largeur AB de la fente, $B^2 = C^2 - A^2 = C^2 - \frac{1}{16}m^2\lambda^2$; ou $B^2 = C^2$, en négligeant le terme en λ^2 . L'équation de l'asymptote devient alors

$$x = \pm \frac{m}{2C} \frac{1}{2}\lambda y. \quad [1]$$

m est impair pour les franges brillantes, et pair pour les franges obscures. On voit que les franges sont également distantes; car on a, pour les milieux de deux franges voisines, $x' - x = \pm \frac{1}{2C} \frac{1}{2}\lambda y$. L'intervalle entre les franges est proportionnel à leur distance y à la fente, et en raison inverse de sa largeur C ; si donc la fente allait en se rétrécissant d'une de ses extrémités à l'autre, les franges iraient en s'écartant du côté de l'extrémité la plus étroite.

La distance $x' - x$ des franges est proportionnelle à λ . Ces franges sont donc plus serrées avec la lumière violette qu'avec les autres couleurs; c'est pourquoi la lumière blanche donne des franges *irisées*. — Tous ces résultats se vérifient au moyen de la fiche D (*fig.* 1994) dont on peut faire varier la largeur et la forme de la fente, en agissant sur les vis m et u .

2° Franges extérieures. — Ces franges ne changent pas d'aspect avec la distance de l'écran, parce qu'elles sont produites par une portion d'onde AB ,

dont le pôle est intercepté. Tout point N pour lequel la différence $NB - NA$ sera égale à un nombre *impair* de fois $\frac{1}{2} \lambda$, sera le lieu d'une frange brillante; et d'une frange sombre si la différence est d'un nombre *pair*. — Les franges extérieures forment des hyperboles, dont les foyers sont A et B et qui se confondent sensiblement avec leurs asymptotes; elles suivent les mêmes lois que les franges intérieures, et l'équation [1] leur convient. Les franges extérieures perdent rapidement leur netteté en s'éloignant du bord de l'ombre géométrique, et elles disparaissent quand la fente est trop large pour que les rayons partis du point B soient sensibles en A' (2874). Il faut donc, pour qu'il y ait à la fois des franges extérieures et intérieures, que la fente ne soit ni trop large ni trop étroite. — Les divers résultats qui précèdent avaient été découverts par l'expérience, par Biot et Pouillet, avant que la théorie ne les eût fait connaître.

On obtient des franges très-brillantes pouvant être projetées sur un écran éloigné, en appliquant sur une fente de 1^{cm} de largeur, une lentille cylindrique très-peu convergente, au foyer de laquelle on place l'écran. — Au lieu d'une fente, on peut employer un miroir étroit incliné à 45°, au moyen duquel les rayons sont dirigés, après réflexion, comme s'ils partaient de l'image symétrique du trait lumineux. On se sert alors de la fiche T (fig. 1994).

2878. III. Franges produites par deux fentes très-étroites et très-rapprochées. — Ce cas n'est autre chose que l'expérience de Grimaldi et Young (2827). La trajectoire des franges est une hyperbole dont les foyers sont aux fentes. Une lame transparente très-mince, placée sur une de ces fentes, déplace les franges de son côté. — Nous avons vu (I, 609) que Despretz a obtenu un résultat analogue avec les ondes sonores.

2879. IV. Franges produites par un écran très-étroit. — Supposons que l'écran AB (fig. 1996), au lieu d'être indéfini, soit assez étroit pour que la lumière venant de ses deux bords, dépasse le milieu de l'ombre géométrique; les rayons agiront les uns sur les autres, et il en résultera des franges intérieures à l'ombre, indépendamment de celles qui se forment à l'extérieur. De plus, ces dernières seront modifiées, car il parvient, aux points où elles se forment, de la lumière venant du côté opposé de l'écran étroit; et, en effet, si l'on masque un des bords avec un écran, on voit ces franges changer sensiblement d'aspect, en même temps que les franges intérieures disparaissent.

Franges intérieures. — Quand l'écran AB (fig. 1999), n'est pas trop étroit, ces franges diffèrent très-peu de celles qui seraient fournies par deux fentes placées en A et B, à la place des bords de l'écran; ce qui tient à ce que la lumière envoyée par les arcs élémentaires qui touchent l'un et l'autre bord, détermine le sens de l'action produite à une certaine distance (2874). Mais il n'en est plus ainsi quand l'écran est très-étroit, et que les franges sont observées à une distance assez grande de AB pour qu'elles soient très-rapprochées des franges extérieures.

Considérons d'abord le milieu P de l'ombre géométrique; ce point recevra les ondulations concordantes émanant des deux parties libres Ad, Bd' de l'onde.

Il y aura donc en P une frange brillante, dont l'éclat différera d'autant moins de celui que donnerait la surface entière de l'onde, que l'écran sera plus étroit. Si donc on plaçait l'œil en P, on apercevrait un trait lumineux *comme si l'écran AB était fendu dans toute sa longueur*. Considérons maintenant le point n de l'ombre géométrique; la lumière qu'il reçoit est la résultante des actions émanant des différents points de la partie d'onde Ad, combinée avec la résultante des actions dues à la partie Bd'. Partageons l'arc Ad en éléments d'interférence Aa, ab, bc... Si l'arc Aa était seul, l'effet qu'il produirait en n pourrait être remplacé par celui d'une onde unique, ou *onde résultante*, partant d'un point o tel que l'on ait $on - an = an - on = \frac{1}{2}\lambda$. Cependant, les actions des divers

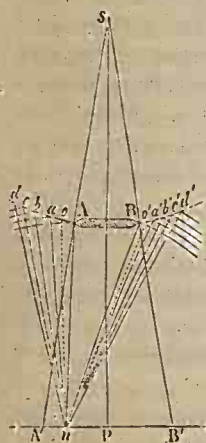


Fig. 1999.

points de l'arc Aa, allant en diminuant à mesure que ces points sont plus éloignés du pôle correspondant au point n , le centre de l'onde résultante sera un peu plus rapproché du point A que du point a . L'arc Aa n'étant pas seul mais étant suivi des arcs ab, bc... qui en détruisent en partie l'effet (2874), surtout pour les points les plus éloignés du pôle, on voit que le centre de l'onde résultante sera encore plus rapprochée de A, et d'autant plus que l'arc Aa sera plus éloigné du pôle. Les centres des ondes résultantes étant supposés en o et o' , on voit qu'il y aura une frange brillante en n , si la différence $o'n - on$ est égale à un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, et une frange sombre si ce nombre est impair. La trajectoire sera une hyperbole ayant ses foyers en o et o' ; foyers différents pour les franges des divers ordres, les centres des ondes résultantes changeant de position dans les arcs Aa, Ba, et ces arcs eux-mêmes changeant de grandeur avec les distances des bords A et B au pôle du point n .

Les franges sont d'autant plus espacées que AB est plus petit; car, pour obtenir une même différence de marche entre les rayons $o'n$, on , il faut que le point n soit d'autant plus éloigné de P que AB est plus petit. Cela se vérifie facilement au moyen de la fiche K (fig. 1994), dans laquelle une aiguille forme l'écran étroit; on voit les franges s'étaler en éventail du côté de la pointe. Quand l'écran n'est pas très-étroit, les franges se confondent avec celles que produiraient deux fentes étroites, les distances oA et $o'B$ étant alors insensibles par rapport à AB. Fresnel et M. Quet ont retrouvé tous ces résultats par le calcul.

Nous avons vu (I, 611) comment on peut observer la *diffraction du son* derrière un obstacle imitant la disposition de l'écran étroit.

M. Cornu a fait connaître une méthode géométrique propre à résoudre avec promptitude la plupart des problèmes sur la diffraction produite avec une onde cylindrique¹.

¹ Journal de physique de M. d'Almeida, t. III, pp. 5 et 44.

II. Diffraction par des ouvertures ou des écrans très-petits dans tous les sens.

2880. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, les bords des écrans ou des fentes, assez étendus pour que leurs extrémités n'aient pas d'influence sur la partie observée des franges, et il nous a suffi alors de chercher les effets des points de la surface d'onde cylindrique situés dans une section droite. Mais quand les ouvertures ou les écrans sont très-petits dans tous les sens, la théorie est beaucoup plus compliquée; il faut tenir compte des actions produites par les ébranlements partis de tous les points de la surface libre de l'onde, et considérer, au lieu d'arcs élémentaires, des *zones* étroites circulaires enveloppant l'ouverture ou l'écran, et ayant des épaisseurs égales aux longueurs des arcs d'interférence. A défaut de la méthode synthétique, qui ne peut plus s'appliquer, il faut employer l'analyse mathématique, qui conduit toujours à des résultats d'accord avec les observations. M. Schwerd, surtout, a fait des recherches étendues sur ce sujet. Prenant pour point de départ la méthode analytique de Fresnel, il l'a développée et appliquée à un grand nombre de cas variés, parmi lesquels nous citerons ceux d'une petite ouverture ayant la forme d'un cercle, d'un trapèze, d'un parallélogramme, d'un carré, d'un triangle. Nous ne pouvons exposer ici ces calculs élevés; nous allons seulement décrire quelques-uns des résultats fournis par l'expérience.

2881. Anneaux produits par un trou ou un écran circulaire. — Quand des rayons émanant d'un point lumineux passent par un petit trou circulaire, on obtient, à une certaine distance, des anneaux irisés ou franges circulaires, les uns dans l'image géométrique de l'ouverture, les autres en dehors et analogues aux franges linéaires formées par une fente étroite. Fraunhofer a trouvé que les diamètres des anneaux sont en raison inverse du diamètre du trou; ils sont équidistants, seulement la distance du centre au premier anneau est moindre que la distance de deux anneaux consécutifs. Si $r, r', r'' \dots$ sont les rayons des anneaux, et D le diamètre du trou, on a

$$r = \frac{0^{\text{mm}},00054}{D}; \quad r' = 1 \cdot \frac{0^{\text{mm}},00065}{D} + r; \quad r'' = 2 \cdot \frac{0^{\text{mm}},00065}{D} + r'; \dots$$

Au centre, il y a un point brillant ou un point noir, suivant la distance de l'écran au trou, ou suivant la grandeur de ce dernier; et ces dimensions peuvent être telles que les anneaux intérieurs ou extérieurs disparaissent.

Écran circulaire. — Dans le cas d'un disque très-petit, on obtient aussi des franges circulaires analogues aux franges linéaires produites par un écran allongé très-étroit. Un résultat curieux, indiqué par le calcul, c'est que, pour certaines distances, le centre de l'ombre doit être aussi éclairé que si le disque n'existait pas. Cette conséquence des formules de Fresnel a été signalée par Poisson et vérifiée par Arago, au moyen d'un disque de 2^{mm} de diamètre; ce

disque semblait percé à son centre. Le point brillant central est d'autant plus étendu que le disque est plus petit.

2882. Ouverture annulaire. — Fraunhofer a examiné le cas d'une ouverture annulaire très-petite, qu'il obtenait en découpant, au moyen d'une pointe de compas, plusieurs feuilles d'or superposées sur une lame de verre. Il obtint ainsi des anneaux irisés tout à fait semblables à ceux que donne une ouverture circulaire; seulement, dans les valeurs de r' , r'' ..., D représente la largeur de la fente circulaire, et la valeur de r est différente. Si l'on couvre d'un écran la moitié au plus de la fente, il n'y a de changé que l'éclat des anneaux; mais, si l'écran couvre plus de la moitié, les anneaux ne se montrent qu'au-dessous de la partie découverte, et dans l'espace angulaire opposé. On conclut de là que chaque élément de l'anneau se comporte comme une portion de fente produisant des franges disposées symétriquement de chaque côté, dans le sens du rayon, et qui se superposent quand elles proviennent de deux éléments opposés.

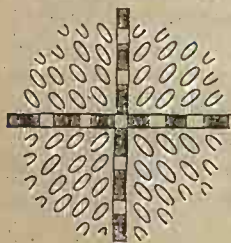


Fig. 2000.

Dans ces diverses expériences, on se procure un point lumineux, soit au moyen d'une lentille à très-court foyer, soit au moyen d'un très-petit trou pratiqué dans une plaque de métal, et traversé par les rayons solaires. La lumière tombe sur une seconde plaque percée d'une ouverture annulaire ou circulaire, B (fig. 1994), ou sur un petit disque de métal fixé à une lame de verre, L. On voit en B le support destiné à recevoir ces fiches. Ce support peut être déplacé transversalement au banc de diffraction par la vis de rappel U. On peut aussi élever ou abaisser la fiche, au moyen d'une vis x , agissant sur un levier coudé o , qui la soulève plus ou moins. Ces deux mouvements sont destinés à centrer le disque ou l'ouverture, par rapport au point lumineux.

2883. Trou rectangulaire. — Une ouverture rectangulaire très-petite donne deux séries de franges dirigées perpendiculairement aux côtés, et dont les distances sont en raison inverse de la largeur de l'ouverture dans la direction de chaque série (fig. 2000). Les choses se passent donc à peu près comme si l'on employait deux fentes perpendiculaires l'une à l'autre; mais, en outre, on aperçoit dans les angles que forment les deux séries de franges, une multitude de petits spectres obliques distribués régulièrement.

2884. Cas de deux trous ronds. — Chacun des trous donne des anneaux comme s'il était seul; mais, s'ils sont assez rapprochés pour que ces anneaux se rencontrent, il se forme, par l'action mutuelle des rayons partis des deux trous, des franges très-serrées ab (fig. 2001), droites et perpendiculaires à la ligne des centres; et, en outre, deux systèmes de franges obliques mm , nn . Si l'on bouche un des trous, ces franges disparaissent. C'est là l'expérience célèbre de Grimaldi, par laquelle il a découvert que de la lumière ajoutée à de la lumière peut donner de l'obscurité. Quand les deux trous sont inégaux, les franges

obliques disparaissent, et les franges perpendiculaires, *ab*, se courbent en forme de branches d'hyperbole ayant l'ouverture la plus grande pour foyer.

La figure 2002 représente, d'après Fraunhofer, le résultat donné par la lumière reçue dans une lunette, après qu'elle a traversé deux trous circulaires de 0^{mm},555 de diamètre, dont les centres sont distants de 0^{mm},972. Les bandes verticales et obliques correspondent évidemment aux franges droites de la figure 2001. Quand on augmente le nombre des trous, les spectres deviennent de plus en plus brillants et purs.

2885. Apparences au foyer des fortes lunettes¹. — W. Herschel a remarqué que, si l'on regarde une étoile, par un ciel bien pur, à travers une lunette grossissant au moins 200 fois, l'étoile apparaît comme un très-petit disque à contour bien tranché, entouré d'anneaux alternativement noirs et brillants, très-serrés, équidistants et sur les bords desquels on distingue, avec beaucoup d'attention, une légère coloration. Le disque central est d'autant plus large que l'étoile est plus brillante. Si un léger nuage vient à la voiler, son image se réduit à un point. Quand on observe une étoile double, on remarque aussi que la plus faible du système présente un disque plus étroit que l'autre. — Pour expliquer ces phénomènes, on remarque que, si les rayons qui, réunis

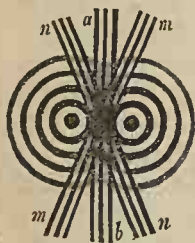


Fig. 2001.

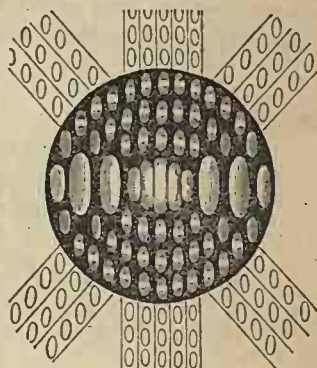


Fig. 2002.

sur l'axe de la lunette, donnent l'image de l'étoile, n'ont pas éprouvé de différence de marche, ceux qui aboutissent en des points écartés latéralement du foyer, sont, suivant l'écart, en discordance ou en concordance; ce qui produit les alternatives de lumière et d'obscurité qui forment les anneaux. Si l'on entrevoit ainsi la cause du phénomène, on n'en explique pas toutes les particularités; par exemple, on ne voit pas pourquoi le disque apparent est d'autant plus grand que l'étoile est plus brillante. On ne peut attribuer cet effet à l'irradiation; car, dans ce cas, le disque empiéterait sur les premiers anneaux, ce qui n'a pas lieu.

Effets des diaphragmes. — J. Herschel, ayant placé devant l'objectif de la lunette dirigée vers une étoile, des diaphragmes de diverses formes, a observé des effets très-curieux, dus évidemment à la diffraction des rayons qui rasent les bords des ouvertures de ces diaphragmes, et à la convergence que l'objectif leur impose. Ces phénomènes doivent être observés par un temps calme et une

¹ *Traité de la lumière*, par J. Herschel, traduction française, t. I, p. 504.

atmosphère pure ; on peut les varier indéfiniment. En voici quelques exemples.

Diaphragme à ouverture circulaire ou annulaire. — Quand l'objectif est rétréci par un diaphragme à ouverture circulaire, l'image de l'étoile s'agrandit en forme de disque, et est entourée d'anneaux colorés, dans lesquels le violet est en dedans. Ces anneaux, ainsi que le disque, sont d'autant plus grands que le trou est plus petit. Quand il est très-petit, de 12^{mm},5 par exemple, les anneaux pâlisent, disparaissent, et les contours de l'image sont très-diffus.

Arago a remarqué que si l'on enfonce ou qu'on retire peu à peu l'oculaire de la lunette, l'image de l'étoile présente à son centre une tache alternativement noire et lumineuse. Il y a là analogie avec ce qui se passe avec un petit trou rond (2881), et nous avons vu le parti qu'on en a tiré dans la construction des scintillomètres (2704).

Les ouvertures annulaires produisent des effets analogues très-brillants et très-réguliers. Quand on rétrécit la fente circulaire, l'épaisseur des anneaux colorés diminue, ainsi que le diamètre de l'image centrale, qui finit par se réduire à un point pendant que les anneaux se confondent, après s'être tellement

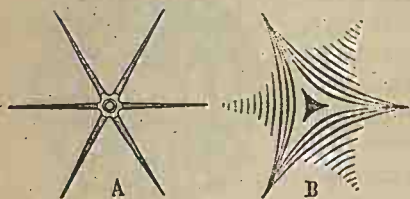


Fig. 2003.

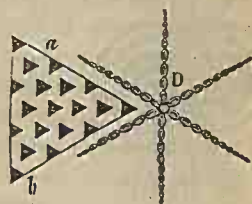


Fig. 2004.

multipliés qu'on ne peut les compter. Les diamètres des anneaux et de l'image centrale ont paru à J. Herschel, en général, proportionnels à $(r' - r) : r$; r' et r étant les rayons extérieur et intérieur de la fente circulaire. Indépendamment de ces anneaux très-rapprochés, on en voit d'autres beaucoup plus grands, mais très-faibles, qui sont bien plus distincts quand on emploie deux fentes circulaires concentriques.

Trois trous ronds, dont les centres sont aux sommets d'un triangle équilatéral, donnent un disque brillant, auquel sont tangents 6 disques de même grandeur, mais d'un éclat plus faible. Le tout est entouré de larges anneaux semblables à des halos. Si les trous circulaires sont remplacés par trois trous triangulaires égaux, les résultats sont les mêmes que s'il n'y en avait qu'un. Mais, si l'on enfonce ou retire peu à peu l'oculaire, on distingue trois systèmes d'anneaux correspondant aux trois trous, et qui se séparent de plus en plus.

Diaphragme à ouverture triangulaire, etc. — Lorsque l'ouverture du diaphragme a la forme d'un triangle équilatéral, on voit un petit disque brillant entouré d'un anneau noir, d'où partent 6 rayons minces, brillants, à bords

bien nets, A (*fig. 2003*), et correspondant aux angles et aux milieux des côtés du triangle. Les rayons ne sont identiques qu'en apparence; car, si l'oculaire n'est pas au point, l'image prend l'aspect B, où trois rayons sont formés de stries longitudinales, et trois autres de stries transversales. Une fente formant un triangle donne les mêmes résultats.

Un diaphragme percé de petits trous triangulaires régulièrement arrangés, comme en *ab* (*fig. 2004*), produit une sorte d'étoile à 6 rayons formés de petits ovales lumineux entourés d'un anneau plus ou moins coloré. Au centre est un disque brillant incolore.

Une fente figurant un carré, au lieu de donner 8 rayons, comme on aurait pu le penser, n'en donne que 4, qui sont composés de taches ovales alternativement brillantes et sombres (*fig. 2005*). La première tache de chaque rayon est irisée transversalement; les couleurs des autres sont peu distinctes.

2886. Application aux observations astronomiques. — M. Ch. André a étudié les phénomènes de diffraction qui précèdent, au point de vue de l'influence qu'ils peuvent avoir sur les observations faites au moyen des lunettes, ou des télescopes réflecteurs, qui donnent des résultats semblables quand on place un diaphragme sur le miroir¹. Il est évident d'abord que la séparation des composantes d'une étoile multiple sera d'autant plus difficile à effectuer que l'image focale sera plus étalée. Le pouvoir séparateur d'un télescope sera donc d'autant plus grand que son objectif sera lui-même plus grand.

Si l'on cache le milieu de l'objectif au moyen d'un écran circulaire, on rétrécira, au contraire, l'image, et le pouvoir séparateur sera d'autant plus augmenté que la zone non couverte sera plus étroite.

M. André a aussi étudié le cas des astres ayant un diamètre apparent, et a montré que l'image focale géométrique est entourée d'une auréole de lumière diffractée de quelques secondes de largeur, et d'autant plus large que l'ouverture de l'instrument est plus étroite. Dans le cas du passage de Vénus ou de Mercure sur le soleil, le diamètre apparent de l'astre vu sur le fond brillant devra, par conséquent, paraître moindre que lorsque l'astre se projette sur le ciel moins brillant que lui, et il paraîtra d'autant plus petit que l'objectif sera plus étroit. C'est, en effet, ce qui résulte des comparaisons de diamètres obtenus par divers observateurs, lors des derniers passages. M. André a vérifié les divers résultats précédents, sur des écrans découpés remplaçant les astres et laissant passer les rayons de lumières artificielles. Il a aussi considéré le cas des occultations des étoiles par la lune.



Fig. 2005.

¹ *Annales scientifiques de l'École normale*, 2^e série, t. V (1876), p. 275.

§ 2. — RÉSEAUX

2887. Un réseau, en optique, consiste en une série de petits espaces alternativement transparents et opaques, excessivement rapprochés et régulièrement distribués. Quand la lumière traverse un réseau, il se produit des effets de diffraction très-remarquables, qui ont été découverts par Fraunhofer. — Nous allons d'abord considérer les *réseaux parallèles*, formés de traits parallèles alternativement opaques et transparents.

Fraunhofer formait des réseaux, au moyen de deux vis égales parallèles, entre lesquelles il tendait un grand nombre de fois un fil très-fin, dont les tours étaient séparés par l'épaisseur très-petite du pas. Il employa ensuite une feuille d'or collée sur une lame de verre, dans laquelle il pratiquait des raies équidistantes; ou simplement une lame de verre, sur laquelle il traçait au diamant des traits opaques qui laissaient entre eux des espaces transparents. C'est presque toujours ainsi qu'on fait aujourd'hui les réseaux, en se servant de la machine à



Fig. 2006.

diviser. Quelquefois les traits sont pratiqués dans du vernis, appliqué sur du verre qu'on attaque ensuite partout où le vernis a été enlevé, au moyen des vapeurs d'acide fluorhydrique. Quand on veut une grande régularité, on doit se contenter de 300 divisions par millimètre; il suffit, du reste, qu'il y en ait au moins 38, pour que les phénomènes se manifestent complètement.

2888. **Effets des réseaux parallèles.** — Quand on regarde un trait lumineux à travers un réseau dont les stries lui sont parallèles, on aperçoit le trait lumineux comme à l'œil nu, mais un peu moins brillant, et l'on voit, de part et d'autre, un espace obscur N, N (fig. 2006), suivi d'un spectre s, s , dont le violet est en dedans, et dont les couleurs sont tellement pures, qu'on y distingue facilement les principales raies. Vient ensuite un nouvel espace obscur n, n , plus étroit que le premier, suivi de plusieurs spectres de plus en plus étalés, mais empiétant de plus en plus les uns sur les autres, de manière que les couleurs pâlissent et finissent par disparaître. Ces spectres peuvent être séparés au moyen d'un prisme, et alors on y distingue aussi des raies. Si l'on opère avec de la lumière simple, on obtient des bandes isolées, de la couleur de la lumière employée, et qui ne sont que les portions correspondantes des spectres. — Ces phénomènes peuvent s'observer par projection, en formant l'image de la fente

sur un écran, au moyen d'une lentille à long foyer, après laquelle est placé le réseau enchâssé dans une lame opaque.

On fait des réseaux dont les stries sont disposées circulairement autour d'un centre. Si l'on regarde un point lumineux à travers ce système, les bandes noires et les spectres successifs forment de larges et beaux anneaux. — M. Soret a fait une étude spéciale des réseaux circulaires, et a indiqué diverses applications qu'on en peut faire¹.

2889. Mesure des déviations. — Fraunhofer mesurait la distance angulaire des raies des spectres, à l'image centrale du trait lumineux, par un moyen analogue à celui qui lui a servi à relever les raies du spectre solaire. Le réseau, *r* (fig. 2007), était fixé au centre d'un cercle gradué portant une lunette mobile à réticule, *o*, dont l'objectif était tout près du centre.

Babinet employait une méthode très-précise beaucoup plus simple : on regarde à travers le réseau placé en *o* (fig. 2008), deux fentes parallèles, pouvant s'écarter plus ou moins l'une de l'autre. On voit alors deux systèmes de spectres *ec*, *e'e'*,

qui se superposent en partie, mais qu'on peut distinguer l'un de l'autre en plaçant une des fentes un peu plus haut que l'autre. On fait en sorte, en écartant plus ou moins les fentes, ou éloignant plus ou moins le réseau, que la raie *a*, dont on veut avoir la déviation et qui appartient à un spectre formé à droite par la



200 Fig. 2.

fente *e*, coïncide avec la raie *a'* du spectre de même ordre formé à gauche par la fente *e'*. L'angle *eoc* est alors égal au double de la déviation cherchée $D = aoe$, et le triangle rectangle *aeo* donne $\text{tang } D = ae : ao$, d'où $D = \frac{1}{2} ec : ao$, en prenant l'angle pour la tangente. — On déduit donc la déviation, de l'espace *ec* qui sépare les fentes, et de leur distance *ao* au réseau. On voit en *ff* le système des fentes, pouvant s'écarter plus ou moins, et que l'on installe sur le banc de diffraction (2830).

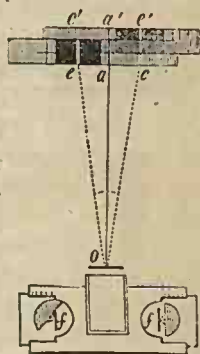


Fig. 2008.

2890. Lois de Fraunhofer. — 1° Les milieux des spectres successifs sont équidistants, ou, ce qui revient au même, les déviations de ces milieux sont entre elles comme la série des nombres entiers 1, 2, 3, 4...

2° Les longueurs des spectres successifs, ou les distances entre deux de leurs raies de même nom, sont entre elles comme les mêmes nombres.

3° La différence d'épaisseur des traits transparents et opaques n'a pas d'influence sur l'étendue et la position des spectres; elle modifie seulement leur éclat.

4° L'étendue des spectres dépend de la somme d'un espace opaque ajouté à

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. VII, p. 409.

un espace transparent, somme que l'on appelle *élément* du réseau. La déviation d'une même raie est en raison inverse de la distance de deux éléments consécutifs, ou proportionnelle au nombre d'éléments compris dans un millimètre. Quand il y en a 100, le premier spectre a l'étendue de celui que donne un prisme de flint de 60°; de plus, les couleurs occupent des espaces sensiblement égaux, de manière qu'on a un *spectre normal*, à couleurs très-pures, et auquel on peut comparer les spectres à couleurs inégalement distribuées, donnés par les prismes.

Les lois qui précèdent sont renfermées dans la formule $D = mkN$, dans laquelle D est la déviation d'une raie prise dans le spectre d'ordre m , N le nombre d'éléments du réseau par millimètre, et k un coefficient constant qui dépend de la couleur dans laquelle se trouve la raie considérée.

2891. Explication des effets des réseaux. — Le système des ondulations aidé de l'analyse mathématique, explique complètement les phénomènes des

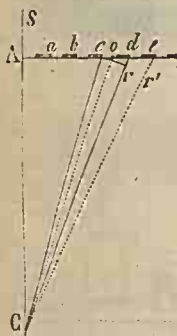


Fig. 2009.

réseaux. Nous allons employer ici une méthode synthétique due à Babinet¹. Soit Ae (fig. 2009) la surface du réseau; a, b, c, d, e, \dots les parties opaques. Supposons l'œil placé en C , et le trait lumineux, sur la droite Cs perpendiculaire à Ae , à une distance assez grande pour que tous les rayons qui traversent le réseau puissent être regardés comme parallèles, et pour que la surface de l'onde passant par le point A , puisse être supposée confondue avec Ae . Si le réseau était enlevé, on verrait le trait lumineux dans la direction Cs , et, dans toute autre direction, on ne verrait aucune lumière, les éléments d'interférence se détruisant deux à deux (2874). La présence du réseau n'empêchera pas de voir le trait; seulement, son éclat sera affaibli par les parties opaques, et l'obscurité régnera toujours de part et d'autre du trait. Mais si l'on s'écarte de A , à une distance

Ad , telle qu'une raie opaque couvre précisément l'élément de l'onde qui détruirait l'élément précédent, il y aura lumière dans la direction Co . Soit, par exemple, $\angle CAc$ un angle tel que l'on ait $dC - oC = oC - cC = \frac{1}{2}\lambda$ du violet. Les ébranlements envoyés au point C par l'élément co , ne seront plus détruits par l'élément od , et il viendra de la lumière violette dans la direction oC , lumière d'autant plus brillante que le bord de l'espace opaque sera plus rapproché du point o .

Pour calculer la déviation $dCA = d$, décrivons, du centre C , l'arc cr ; le triangle dcr donne $rd = \lambda = \overline{cd} \sin d$. Si nous supposons que cd soit compris N fois dans un millimètre, on a $1^{mm} = N \cdot \overline{cd}$, et l'équation précédente devient $\sin d = N\lambda$; ou, en prenant l'angle pour le sinus, $d = N\lambda$, qui n'est autre chose que la formule des réseaux dans le cas du premier spectre (2890). On voit que la déviation est indépendante de la différence entre les espaces opaques et transparents, et que la constante k n'est autre chose que λ , pour la couleur

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XL, p. 166.

considérée. — Pour les autres couleurs, on aura $d' = N\lambda'$, $d'' = N\lambda''$..., λ' étant plus grand que λ , λ'' plus grand que λ' , etc.; les couleurs se verront donc les unes à côté des autres, à des distances angulaires du point A sensiblement proportionnelles à λ , λ' , λ'' ...

Considérons maintenant un autre élément de réseau, situé à une distance du point A telle que la différence $dC - cC$ soit égale à 2λ , ou, en général, à $m\lambda$, m étant un nombre entier. On pourra diviser l'intervalle cd en $2m$ éléments d'interférence correspondant à des différences de distance au point C égales à $\frac{1}{2}\lambda$, et, ces éléments étant en nombre pair, les actions produites par leurs différents points s'entre-détruisaient deux à deux, s'il n'y avait pas de partie opaque. Mais, si nous supposons que les parties opaques recouvrent un nombre impair d'éléments, de manière qu'il en reste aussi un nombre impair de libres, il y en aura un de ces derniers qui conservera toute son action, et l'on aura de la lumière dans la direction correspondante. Le triangle cdr donnerait alors $d = m\lambda N$, qui est la formule générale de Fraunhofer (2890).

Il reste à voir pourquoi la lumière d'une couleur donnée manque entre la bande lumineuse qui correspond à la différence de distance $m\lambda$ du point o , et celle qui correspond à la différence $(m + 1)\lambda$. Or, on peut considérer, sur le réseau, entre les stries qui correspondent à ces deux bandes, deux zones dans lesquelles les différences de distance au point C vont en augmentant, de $m\lambda$ à $m\lambda + \frac{1}{2}\lambda$; puis, de cette dernière à $(m + 1)\lambda = m\lambda + 2\frac{1}{2}\lambda$. Les rayons envoyés par les points correspondants de ces deux zones seront en différence de marche de $\frac{1}{2}\lambda$, et s'entre-détruiront en arrivant au point C. Il y aura donc obscurité dans la direction de ces zones. Quand on emploiera la lumière blanche, les couleurs, en se juxtaposant, feront disparaître les bandes obscures, sauf les deux premières de chaque côté.

Nous avons supposé que les rayons incidents arrivent au réseau parallèlement les uns aux autres. Si ces rayons partaient d'un point peu éloigné, l'explication serait la même; seulement, il faudrait tenir compte des différences de marche des rayons obliques voisins, au moment où ils rencontrent le réseau.

2892. Remarques. — 1° Il résulte de l'explication des couleurs qui forment les différents spectres, sauf le premier, que, si la partie opaque recouvrirait un nombre pair des éléments d'interférence compris dans un intervalle opaque et transparent, les éléments à découvert seraient aussi en nombre pair, et s'entre-détruisaient deux à deux; de manière que le spectre correspondant manquerait. Si donc nous désignons par $n : n'$ le rapport entre les espaces obscurs et transparents, le spectre d'ordre $m = n + n'$ manquera, ou sera très-faible; car on pourra diviser l'intervalle considéré en deux parties contenant, l'une $2n$, l'autre $2n'$ éléments d'interférence sensiblement égaux. Les premiers, étant seuls libres, s'entre-détruiront deux à deux. Par exemple, si $n = n' = 1$, le second spectre manquera; si $n = 1$, $n' = 3$, le spectre d'ordre $m = 1 + 3 = 4$ manquera. C'est ce que Fraunhofer a vérifié par l'expérience.

2° La formule $\sin d = mN\lambda$ montre que si $N\lambda$ est plus grand que 1, c'est-à-

dire si $1 : N$ ou un élément du réseau est moindre que λ , $\sin d$ sera plus grand que 1, et il ne pourra y avoir de spectres; et, en effet, les réseaux à stries trop serrées n'en donnent plus.

3° Si l'on opérât dans un autre milieu que l'air, en appelant l la longueur d'ondulation du violet dans ce nouveau milieu, on aurait $d_1 = Nl$, égalité qui, combinée avec $d = N\lambda$, donne $d_1 : d = l : \lambda = n$; les déviations sont donc entre elles comme les indices de réfraction 1 et n de l'air et du milieu. C'est ce que Fraunhofer a trouvé par l'expérience, en plaçant la fente et le réseau aux deux extrémités d'un tube plein de liquide.

4° Dans la théorie qui précède, on considère deux éléments consécutifs, sans s'occuper de l'ensemble des traits ou de ce qu'on appelle l'ouverture du réseau. M. Rayleigh a montré que cet ensemble constitue une donnée des plus importantes de la question, et il a développé une théorie dans laquelle il en tient compte. Il fait voir aussi de quelle importance est la parfaite régularité de distances des traits dans toute l'étendue du réseau¹.

5° Mesure de λ . — La formule $\sin d = N\lambda$ donne le moyen de mesurer les longueurs d'ondulation correspondant aux raies du spectre, ce qu'on ne peut faire avec les franges d'interférence, dans lesquelles ces raies ne sont pas distinctes. C'est par ce moyen que Babinet a obtenu les valeurs de λ consignées dans le tableau ci-dessus (2832). — M. Eisenhohr², en projetant, au moyen d'un objectif de 3^m de foyer, le spectre d'un réseau dont l'élément était de 0^{mm},0377, sur un écran enduit de sulfate de quinine, a rendu la partie ultra-violette visible par fluorescence, et a pu mesurer les longueurs d'ondulation qui lui correspondent. Il a trouvé ainsi pour la partie extrême 0,000354. Le rouge extrême lui ayant donné 0^{mm},000354, on voit que, des rayons ultra-violets les plus réfrangibles au rouge extrême, il y a une octave entière, sans tenir compte des rayons obscurs qui précèdent le rouge.

Masson a reconnu que la lumière électrique donne, avec les réseaux, des spectres à raies brillantes, comme avec les prismes. On peut donc mesurer les longueurs d'ondulation correspondant aux raies de cette sorte de lumière.

Pour ces sortes de mesures, il faut employer des réseaux gravés sur verre avec une grande perfection. On en fait aujourd'hui avec lesquels on peut distinguer toutes les raies des cartes d'Angström (2639). De semblables réseaux sont rares et coûteux; M. Rayleigh a eu l'idée de les reproduire par la photographie sur un collodion chloruré sur lequel on applique le réseau. Après 5 à 6 minutes d'exposition au soleil, on passe à l'hyposulfite, et on a un réseau présentant les mêmes qualités que celui qui a servi de cliché.

2893. Réseaux irréguliers. — Fraunhofer a fait de nombreuses expériences avec des réseaux à intervalles inégaux. Quand l'irrégularité est complète, toutes les couleurs se mêlent, et le réseau ne produit qu'une traînée blanchâtre

¹ *Philosophical Magazine*, février, mars 1874, et *Journal de physique*, t. III, p. 320.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLIX, p. 504.

perpendiculaire aux stries ; mais, si les irrégularités sont soumises à une certaine loi, et se reproduisent périodiquement, les spectres se montrent encore, et leur déviation est donnée par la formule $\sin d = m\lambda : L$, dans laquelle L représente l'espace dans lequel se trouvent réparties les stries formant une période. Les spectres successifs diffèrent alors beaucoup en intensité ; il en est de très-pâles qui, placés à côté d'autres très-brillants sur lesquels ils se superposent en partie, n'en altèrent pas sensiblement les couleurs ; ce qui permet de distinguer dans les spectres d'ordre élevé, des raies que la superposition des spectres ne permet pas de distinguer avec un réseau régulier. — Quand on rapproche les paupières, de manière que les cils forment un réseau devant l'œil, on aperçoit ordinairement, en regardant une bougie, une lueur horizontale blanchâtre, les cils étant généralement inégalement espacés ; mais il arrive assez souvent qu'on aperçoit des spectres dont les couleurs sont assez distinctes.

2894. Réseaux à mailles carrées, circulaires, etc. — Fraunhofer a fait beaucoup d'expériences avec des réseaux formés de petites ouvertures égales de différentes formes, et régulièrement distribuées. On peut former un réseau à mailles carrées, au moyen de deux réseaux parallèles croisés, ou avec un morceau de mousseline ou de ruban. Ces sortes de réseaux donnent une multitude de petits spectres, les uns disposés suivant les bras d'une croix parallèles aux côtés des carrés, les autres distribués obliquement dans les quatre angles, et présentant l'aspect de la figure 2000. Le phénomène est des plus brillants, et son aspect varie avec la grandeur des mailles du *réseau quadrillé* et la distance au point lumineux.

2895. Réseaux par réflexion. — Quand la lumière se réfléchit sur des stries alternativement polies et ternes, elle produit les mêmes effets que les réseaux, les rayons réfléchis étant dans le même cas que s'ils partaient de l'image symétrique du point lumineux, par rapport au plan du réseau. Fraunhofer a obtenu des résultats identiques, sauf l'intensité, au moyen de rayons réfléchis et transmis par un même réseau, formé par des stries pratiquées dans une feuille d'or collée sur une lame de verre. La théorie des réseaux par transmission s'applique donc aussi aux réseaux par réflexion.

Les couleurs irisées que présente la nacre sont produites par des stries très-fines provenant de sa structure feuilletée. En effet, Brewster, ayant appliqué sur de la nacre polie, du mastic, de la cire noire ou de l'alliage fusible, leur fit prendre l'empreinte des stries, et les vit en reproduire les couleurs par réflexion. Le gypse à structure fibreuse présente aussi des couleurs qui s'expliquent de la même manière. — Les plumes de certains oiseaux doivent leurs brillants reflets à des effets de réseaux produits par des filaments très-fins qui les composent. — Un métal à demi-poli peut présenter aussi des couleurs irisées à cause des stries parallèles produites par la poudre qui a servi à le polir, quand elles sont suffisamment régulières et pas trop serrées (2892). — On fabrique, en Angleterre, des boutons d'habits en métal, sur lesquels sont tracées des stries, ou de petites figures très-régulières, obtenues par la compression d'un coin

d'acier finement gravé. Ces boutons, connus sous le nom de *boutons de Barthon*, réfléchissent les couleurs les plus brillantes, quand ils sont éclairés par une lumière vive.

2896. Passage des phénomènes de diffraction ordinaire à ceux des réseaux. — C'est en étudiant les phénomènes produits par de petites ouvertures de plus en plus nombreuses, que Fraunhofer a été conduit à considérer les réseaux. M. Schwerd a suivi une marche semblable dans quelques-unes de ses recherches analytiques; il a retrouvé les résultats de l'expérience, et en a signalé d'autres passés inaperçus et qu'il a ensuite vérifiés. C'est ainsi qu'une théorie vraie éclaire l'expérience, qui, à son tour, lui sert de contrôle et la confirme.

Fraunhofer nomme de *première classe* les spectres, ou franges irisées, donnés par une seule fente, dont nous avons parlé (2877). Avec deux fentes, ces spectres sont accompagnés des franges intérieures (2878), qu'il nomme *spectres imparfaits de deuxième classe*, parce qu'on n'y distingue pas de raies, et, avec trois fentes, des *spectres de troisième classe*, situés entre ceux de deuxième. Si l'on augmente le nombre des fentes, il ne se forme plus de nouvelles classes de spectres; mais ceux qui existent déjà se modifient.

Fraunhofer annonce que, si l'on augmente de plus en plus le nombre des fentes, les spectres de deuxième classe ne changent que peu de position, pendant que ceux de troisième classe se resserrent en se rapprochant de la bande centrale, avec laquelle ils finissent par se confondre, et qu'ils s'épurent de manière qu'on finit par y distinguer les raies. De nombreuses mesures lui ont appris que leurs largeurs sont en raison inverse du nombre de fentes libres d'un même réseau, et, pour des réseaux différents, en raison inverse de la largeur de leurs éléments. N étant le nombre d'éléments par millimètre, m le rang du spectre, et v le nombre de fentes, on a, en général,

$$d = 0^{\text{mm}},000528 \frac{m}{Nv}.$$

Quand les spectres de troisième ordre se confondent avec la bande centrale, il y a un espace noir entre cette bande et les premiers spectres du deuxième ordre. M. Schwerd trouve par l'analyse mathématique que, en effet, les spectres de deuxième classe ne changent pas de place quand le nombre de fentes augmente. Il trouve, de plus, que les spectres de troisième classe ne se confondent pas avec la bande centrale, mais se resserrent tellement qu'ils semblent former une lumière continue. Il reconnaît aussi qu'il y a des spectres de troisième classe entre deux spectres de deuxième classe consécutifs quelconques, mais de moins en moins nets à mesure qu'on s'éloigne de la bande centrale, et il est parvenu à les distinguer par l'expérience. Les bandes noires NN, nn (fig. 2006), contiennent de ces spectres de troisième classe, mais très-faibles, ce qui fait qu'ils avaient échappé à l'observation.

§ 3. — MÉTÉORES DÉPENDANT DE LA DIFFRACTION

2897. Explication des arcs-en-ciel surnuméraires. — Les arcs-en-ciel surnuméraires ou secondaires, supplémentaires (2718) qui s'observent à l'intérieur du premier arc et à l'extérieur du second, consistent en minces franges alternativement vertes et violettes, en nombre variable, bordées en dehors d'un peu de jaune, puis de rouge. On les observe surtout quand la pluie est fine et quand l'arc est élevé, et leur épaisseur diminue du sommet aux pieds, où ils ne sont que rarement distincts. Young, le premier, les a rapportés à des effets de *diffraction*. Voici comment on peut les expliquer.

Indépendamment des faisceaux efficaces qui forment l'arc-en-ciel ordinaire, et parcourent la même longueur de chemin dans la goutte d'eau, il existe une multitude d'autres rayons qui, deux à deux, émergent *parallèlement*, l'un entrant *au-dessus* du faisceau efficace, l'autre *au-dessous*. Pour concevoir ce résultat, considérons le rayon incident *ai* (fig. 2010), donnant le rayon réfracté *inr* tangent en *n* à la diacaustique *enn'*, se réfléchissant en *r*, et émergeant en *e*. Menons par le point *r* une seconde tangente *i'r'n'* à la courbe. Le rayon incident *a'i'* donnant un rayon *i'r* qui se réfléchit en *r*, fournira un rayon émergent *e'* parallèle à *e*. Les déviations égales des rayons *aive*, *a'i're'*, sont moindres que 41° , déviation du faisceau efficace *sbd*, et n'en diffèrent que peu. Par exemple, pour une incidence de 70° degrés, la déviation est $D = 38^\circ 12'$, et l'autre rayon, qui éprouve la même déviation, tombe sous l'incidence de $56^\circ 45'$. Les deux rayons *ee'* ont éprouvé dans la goutte d'eau une certaine différence de marche l'un par rapport à l'autre, puisqu'ils n'ont pas traversé la même épaisseur de liquide; ils pourront donc interférer. Si donc on regarde, à travers une lame de verre de couleur simple, dans une direction formant avec la droite passant par l'œil et par le centre du soleil, un angle égal à la déviation *d*, on observera de la lumière ou de l'obscurité, suivant que la différence de marche sera un nombre pair ou impair de fois $\frac{1}{2} \lambda$. Cette direction sera un peu au-dessous de celle suivant laquelle on reçoit les rayons efficaces du premier arc-en-ciel; et, en descendant encore au-dessous, on trouvera des alternatives d'obscurité et de lumière formant des franges d'autant plus écartées que les gouttes d'eau seront plus petites; la déviation devant changer d'autant plus, pour obtenir une même différence de marche, que ces gouttes seront moins grosses. La différence de marche devant aussi être plus grande pour les rayons rouges que pour les violets, on voit que le rouge sera au-dessous:

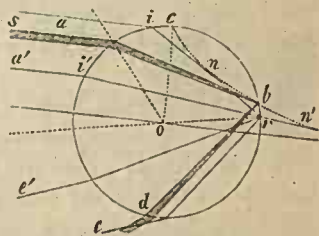


Fig. 2010.

Il résulte de ce qui précède, que les arcs surnuméraires ne seront suffisamment écartés pour être distincts, que lorsqu'il y aura un très-grand nombre de gouttes de pluie très-petites et sensiblement égales. Les arcs surnuméraires ne s'observant qu'à une certaine hauteur, il faut en conclure que les gouttes d'eau cessent, en s'approchant du sol, de remplir les conditions d'interférence, soit parce qu'elles deviennent trop grosses, soit parce qu'elles cessent d'être égales, en se réunissant les unes aux autres; soit enfin parce que les agitations de l'air près de la surface de la terre altèrent leur forme sphérique. — Cependant, M. Ch. Montigny a observé à Rochefort, le 30 août 1879, un arc-en-ciel très-élevé, dont les pieds seuls présentaient des arcs surnuméraires distincts. Mais il y avait deux couches de nuages, dont une, plus basse et plus rapprochée de l'observateur, assombrissait les pieds de l'arc, et dont les gouttes étaient fines, parce qu'elles portaient d'une faible hauteur; ce qui lui a servi à expliquer d'une manière satisfaisante ce cas exceptionnel.

Les arcs surnuméraires qui accompagnent très-rarement en dessus l'arc-en-ciel extérieur, s'expliquent d'une manière analogue, au moyen de rayons émergeant parallèlement deux à deux, après avoir éprouvé deux réflexions.

Babinet a observé les couleurs des arcs surnuméraires, dans un filet d'eau cylindrique de 1^{mm} de diamètre, fortement éclairé. Il a pu distinguer, à côté des couleurs qui correspondent au premier arc-en-ciel, 16 franges intérieures, et près de celles du second arc, 8 à 9 franges extérieures. Des distances angulaires de ces franges aux couleurs principales, il a pu déduire le diamètre du cylindre. — Nous ajouterons que M. Airy a développé par l'analyse la théorie des arcs surnuméraires, et que M. Miller a vérifié les formules sur un filet d'eau de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{5}$ de diamètre, frappé par les rayons solaires.

2898. DES COURONNES. — Quand de légers nuages passent devant le soleil ou la lune, on aperçoit souvent autour de l'astre un ou plusieurs cercles colorés connus sous le nom de *couronnes*. Ces cercles sont équidistants, mais leur diamètre angulaire n'a rien de constant, ce qui les distingue des halos. Le diamètre du premier cercle peut varier de 1° à 4°. Souvent l'éclat de l'astre empêche de distinguer les couronnes, et pour les voir, il faut cacher le soleil avec un petit écran circulaire, ou observer son image par réflexion sur l'eau. — Les couronnes sont produites par les gouttelettes d'eau interposées entre l'astre et notre œil. On les imite au moyen de poussières à *grains réguliers*, pour lesquelles l'explication est la même.

2899. Couronnes produites par des corpuscules. — Si, comme l'a fait Young, on dépose sur une lame de verre, de la poudre de lycopode, de lycoperdon ou de la carie du blé, des globules du sang, en général des poussières fines à grains généralement égaux, on observe, quand on regarde à travers cette lame la flamme d'une bougie, plusieurs anneaux irisés ayant le violet en dedans, et équidistants; on peut aussi les voir par réflexion. On obtient encore des couronnes au moyen de poils très-fins, comme ceux du lièvre, groupés confusément entre deux lames de verre; au moyen de la rosée déposée par l'haleine sur une

lame de verre, ou avec une lame de verre dépolie. Une poudre à grains inégaux, comme les poussières inorganiques, ne donne pas de couronnes. Quand on regarde la flamme d'une bougie, peu d'instants après s'être réveillé, on la voit entourée parfois de beaux anneaux irisés, dus à des stries de la conjonctive, ou à des globules de sang, dont elle est injectée.

Delezenne a constaté que les distances entre les anneaux produits par les poudre fines, suivent les mêmes lois que les distances entre les spectres formés par les réseaux parallèles, et que les anneaux ont d'autant plus d'éclat que les grains sont plus serrés et plus près d'être exactement égaux. — Antérieurement, Fraunhofer, ayant disposé irrégulièrement, entre deux lames de verre, de petits disques égaux, avait trouvé les diamètres d'un même anneau brillant proportionnels aux longueurs d'ondulation de la lumière employée, et *en raison inverse du diamètre des disques*. Un fait important, c'est que la grandeur des anneaux ne change pas avec la distribution des disques ou des corpuscules, et ne dépend pas, comme pour les réseaux, de la somme d'un intervalle opaque et d'un intervalle transparent.

Ériomètre d'Young. — La relation entre le diamètre des anneaux et la grosseur des corpuscules, a fourni à Young le moyen de comparer les grosseurs des filaments de diverses sortes de laine, en prenant le rapport entre les

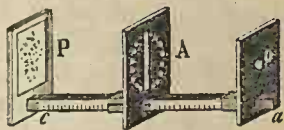


Fig. 2011.

diamètres des anneaux formés par des flocons placés entre deux lames de verre, à travers lesquelles on regarde un point lumineux. On compare de la même manière les poussières organiques, les grains de fécule, etc. Par exemple, on trouve que la poussière de la carie du blé donne des anneaux doubles de ceux de la poudre de lycoperdon cervinum; et, en effet, des mesures microscopiques ont donné $0^{\text{mm}},014$ et $0^{\text{mm}},028$ pour les épaisseurs de ces grains

L'instrument destiné à cet usage porte le nom d'*ériomètre* (fig. 2011). P est une plaque de verre sur laquelle est déposée la poussière à examiner. En A est un écran portant une ou plusieurs séries circulaires de trous, et une longue fente à travers laquelle on aperçoit une partie de tous les anneaux formés par la poudre, quand on regarde par l'ouverture *o* d'un écran fixe, un point lumineux placé derrière la plaque P. On fait glisser l'écran A sur la règle divisée *ac*, de manière qu'un anneau d'un même ordre coïncide dans tous les cas avec une même série de trous, opération facilitée par la fente. Les diamètres angulaires des anneaux sont alors entre eux comme les distances de l'écran A à l'ouverture *o*.

2900. De la théorie des anneaux produits par les corpuscules. —

Newton a fait beaucoup de tentatives pour expliquer ces anneaux dans le système de l'émission. Fraunhofer pensait que chaque corpuscule formait séparément un système d'anneaux (2880), et que ces anneaux superposés formaient ceux qu'on observe; mais, entre autres difficultés, cela suppose que chaque corpuscule se comporte comme s'il était isolé, et les phénomènes des réseaux nous ont montré

qu'il n'en peut être ainsi. Plus tard, on a voulu assimiler les lames couvertes de poussière à des réseaux circulaires, et l'on supposait que, souvent, plusieurs étaient arrangés de manière à constituer un élément de réseau; mais cela ne peut s'appliquer au cas de filaments groupés confusément. On doit à Babinet le principe sur lequel repose l'explication du phénomène.

Principe de Babinet¹. — Si l'on place un très-petit corps opaque tout près de la ligne qui joint un point lumineux à l'œil, il produira le même effet qu'une ouverture égale laissant passer la lumière incidente. Pour se rendre compte de ce résultat, en apparence paradoxal, il faut se rappeler que toutes les parties d'une onde sphérique qui ne sont pas tout près de la droite qui joint l'œil au point lumineux, s'entre-détruisent mutuellement (2874). Or, le corps opaque interceptant une partie de l'onde qui concourt à cette destruction, les effets émanant des points voisins de ce corps ne sont plus détruits, la lumière apparaît dans sa direction, et ce corpuscule produit autant d'illumination qu'il semblait devoir en éteindre.

Ce principe est aussi une conséquence du calcul (2887). Il a servi à Babinet à expliquer le fait suivant, observé par Necker, à Genève : le soleil se levant derrière une colline couverte de broussailles, l'observateur placé dans l'ombre de la colline, un peu au-dessous des rayons qui passaient par-dessus sa tête, voyait de petites branches d'arbustes se projeter sur le ciel en lignes brillantes, et non en lignes noires. C'est aussi par le même principe qu'on explique les couleurs des fils d'araignée, et des corpuscules flottant dans l'air traversé par les rayons solaires.

Recherches de Verdet. — Le principe de Babinet n'explique pas immédiatement les anneaux engendrés par les poussières, parce que les grains n'étant pas isolés, mais très-rapprochés les uns des autres, leurs effets se modifient mutuellement. Verdet a tenu compte de cette circonstance, et voici la marche qu'il a suivie² : Il résulte du principe, que la surface d'onde coïncidant avec le plan des corpuscules, peut être remplacée par une surface opaque munie d'ouvertures ayant la même forme et la même position que ces corpuscules. Si nous imaginons un cylindre oblique ayant pour base la pupille ou l'objectif d'une lunette, ce cylindre interceptera sur la surface de l'onde un espace égal à la pupille ou à l'objectif, et tous les corpuscules contenus dans cet espace enverront des rayons qui se réuniront en un point de la rétine ou au point focal de la lunette. Là, il se produira un effet résultant dépendant de la différence de marche des rayons, et provenant de leur obliquité sur la surface d'onde. Les cylindres ainsi construits dans différentes directions n'interceptent pas, il est vrai, des portions égales de cette surface, mais on peut néanmoins les regarder comme égales à cause du grand nombre de particules qu'elles contiennent, et le problème revient à déterminer comment varie l'intensité de la lumière envoyée dans différentes

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. IV, p. 342.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIV, p. 129.

directions par une portion limitée d'onde plane recouverte de corpuscules circulaires égaux, distribués sans ordre régulier, et produisant le même effet que de petites ouvertures circulaires. Le calcul donne pour l'expression de l'intensité, la formule à laquelle on arrive dans le cas d'une seule petite ouverture circulaire ; d'où résulte l'identité des anneaux produits par une seule ouverture, et ceux que produiraient une multitude d'ouvertures remplaçant les grains de poussière. Il n'y a de différence que sous le rapport de l'éclat, qui est plus grand qu'avec une seule ouverture.

Verdet a vérifié par l'expérience la loi des diamètres des anneaux. Il a aussi contrôlé le principe qui lui a servi de point de départ, en produisant des couronnes au moyen d'un grand nombre de petits trous circulaires égaux, pratiqués dans une lame métallique, et irrégulièrement espacés.

2901. Explication des couronnes. — La théorie qui précède s'applique aux couronnes qu'on observe autour de la lune et du soleil, les gouttelettes d'eau formant les légers nuages qui voilent l'astre, remplaçant les corpuscules. Les cirrus, composés de particules glacées, ne donnent pas de couronnes.

On reproduit le phénomène des couronnes, en raréfiant rapidement de l'air humide sous un récipient, de manière à y produire une précipitation de vapeur, sous forme de brouillard. Si, pendant l'opération, on se place à une certaine distance, on voit, autour de la flamme d'une bougie disposée de l'autre côté du récipient, de belles couronnes irisées (fig. 2012), qui disparaissent bientôt en même temps que le brouillard.



Fig. 2012.

Stéphanomètre. — On peut déduire la grosseur des gouttelettes, du diamètre angulaire du premier anneau. Delezenne a imaginé pour cela un petit instrument composé d'un tube, au fond duquel se trouvent plusieurs verres qui ne laissent passer qu'une seule couleur, le bleu par exemple, et qui affaiblissent la lumière du soleil, de manière qu'on peut distinguer des couronnes dans une foule de cas où l'éclat de l'astre empêché de les voir à l'œil nu. L'instrument forme donc un *stéphanoscope*. Pour en faire un *stéphanomètre*, on recouvre une partie du verre, de poudre de lycopode. On voit alors, en même temps, les couronnes produites par cette poussière et celles que produisent les nuages, de manière à pouvoir comparer leurs diamètres, qui sont en raison inverse des grosseurs des corpuscules qui les engendrent. On a trouvé ainsi que les globules des brouillards sont généralement plus gros en hiver qu'en été. Voici quelques résultats obtenus par Kaemitz dans l'Allemagne centrale et en Suisse :

Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.
0 ^{mm} ,0275	0,0350	0,02	0,0192	0,0156	0,018
Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 ^{mm} ,0169	0,014	0,0224	0,203	0,0245	0,0349

2902. Cercle d'Ulloa, arc-en-ciel blanc, etc. — Les phénomènes que nous allons décrire se montrent à l'opposé du soleil quand il est très-bas, sur des nuages ou des brouillards situés à une petite distance de l'observateur, qui doit être placé sur un lieu élevé; sur une montagne isolée, dans un aérostat. Il aperçoit d'abord, sur le brouillard, son ombre, souvent assez nette pour y distinguer la tête, les bras, les jambes. La tête paraît ensuite entourée de plusieurs couronnes irisées équidistantes, quelquefois très-brillantes, de diamètre variable et dont le violet est en dedans; c'est ce qu'on désigne sous les noms d'*ombres frangées, gloires, couronnes antisolaires*, et quelquefois *anthéliques*. A une grande distance du centre, se montre quelquefois un dernier anneau blanchâtre, nommé *cercle d'Ulloa, ou arc-en-ciel blanc*, dont le diamètre angulaire, mesuré par différents observateurs, paraît varier de 35 à 42°. Bouguer et Ulloa, témoins de ce phénomène pendant leur séjour sur le Pichincha, en ont donné la première description précise. Le cercle d'Ulloa est assez rare, et souvent le phénomène est réduit à l'ombre de l'observateur. C'est ce qui a lieu sur le Brocken, en Hanovre, où ce phénomène constitue le fameux *spectre du Brocken*, dont la fréquence avait, sans doute, concouru à établir la célébrité superstitieuse attachée à cette montagne, du temps des anciens Saxons.

Les ombres frangées sont attribuées à des couronnes formées autour du soleil, et dont les rayons, au lieu de tomber dans l'œil, sont reçus sur les particules du brouillard comme sur un écran, et s'y réfléchissent de manière à revenir à l'observateur, qui tourne le dos au soleil. La faculté des brouillards de réfléchir ainsi la lumière est attestée par l'illumination que produisent, dans nos rues, les becs de gaz, et par les ombres qui les traversent, formées par les montants des lanternes qui protègent ces becs. Babinet a fait quelques observations qui confirment cette explication : il a vu, sur de la poudre de guerre étendue au soleil, l'ombre de sa tête entourée de couronnes irisées; il a observé, dans les Landes, des couronnes sur des brouillards très-rapprochés, et en a vu se former sur des particules en suspension dans l'eau de certaines rivières. — Les ombres frangées ont été observées fréquemment dans les régions boréales, où elles sont très-brillantes; ce qui s'explique par le grand pouvoir réflecteur des brouillards glacés, sur lesquels se réfléchissent les couronnes dues aux rayons solaires traversant d'autres brouillards formés de particules aqueuses.

Quant à l'*arc-en-ciel blanc*, il a été l'objet de beaucoup de recherches théoriques. Bravais en a donné une théorie mathématique, mais dans laquelle il s'appuie sur la supposition erronée que les nuages sont composés de globules creux (II, 1461). Il paraît prouvé aujourd'hui que ce météore n'est autre chose qu'un arc-en-ciel à couleurs très-pâles à cause de la petitesse des gouttelettes d'eau qui le produisent, et accompagné d'arcs surnuméraires, qui, d'après la théorie de M. Airy (2897), donnent à la partie la plus brillante un diamètre d'autant plus petit que les gouttes d'eau sont plus fines. D'après les calculs de M. Raillard, le demi-diamètre angulaire peut ainsi descendre à 35°, ce qui est d'accord avec l'observation.

CHAPITRE X

ANNEAUX COLORÉS

.... L'influence des rayons lumineux les uns sur les autres, démontrée par les phénomènes de la diffraction, l'est encore par les anneaux colorés.

(FRESNEL, Œuvres, 1866. t. I, p. 134.)

§ 1. — ANNEAUX COLORÉS DANS LES LAMES MINCES.

I. Faits et lois expérimentales.

2903. Couleurs dans les lames minces. — Lorsque la lumière frappe une lame *très-mince*, de quelques *millièmes de millimètre* d'épaisseur, les rayons réfléchis présentent des couleurs vives, qui dépendent de l'épaisseur de la lame et de la substance dont elle est formée. Des lames minces de mica, de verre soufflé au point d'éclater, la couche d'oxyde qui se forme sur l'acier recuit, celle qu'on dépose sur les métaux par la galvanoplastie, les couleurs de Nobili (III, 1984), les ailes membraneuses de certains insectes, etc., nous présentent des exemples de ce phénomène. Ces couleurs se montrent encore dans les fissures du verre fêlé ou les joints de clivage des cristaux ; entre deux plaques de verre pressées l'une contre l'autre, dans les couches minces de vernis, dans l'huile, l'éther, en couche imperceptible sur l'eau, l'humidité de l'haleine sur une lame de verre. Les eaux stagnantes contenant des matières animales, se recouvrent parfois d'une pellicule grasse irisée.

La surface du verre altérée par l'humidité présente souvent des couleurs. MM. Fremy et Clémendot sont parvenus à obtenir des couleurs irisées très-déli-cates sur les objets en verre, en les plongeant pendant 6 ou 7 heures dans de l'eau contenant 45 pour 100 d'acide chlorhydrique, à une température de 120° environ, sous une pression de 2 à 3 atmosphères.

Des bulles d'eau de savon présentent de semblables couleurs quand elles sont très-minces, et l'on y reconnaît l'influence de l'épaisseur ; car, si l'on préserve la bulle des agitations de l'air, en la recouvrant d'une cloche de verre, on distingue à sa surface des bandes *horizontales* irisées, dont la couleur change à mesure que l'épaisseur diminue par l'action de la pesanteur, qui entraîne le liquide vers les parties inférieures. Bientôt une tache noire apparaît au sommet,

et la bulle éclate. — Si elle est éclairée avec de la lumière simple, les bandes irisées sont remplacées par des bandes alternativement noires et brillantes, qui descendent peu à peu, à mesure que l'épaisseur diminue.

Les expériences se font facilement avec le liquide glycérique de M. Plateau, qui donne des bulles persistant pendant très-longtemps. Nous avons cité (I, 169) les couleurs irisées des figures laminaires formées au moyen de charpentes métalliques. M. Terquem, en étendant une lame mince du liquide dans un anneau placé verticalement sous une cloche de verre, a vu les couleurs se disposer en bandes horizontales, descendant lentement. Il a aussi opéré avec un liquide formé de 100 parties d'eau avec 1 de savon de Marseille et 40 de sucre¹.

M. Jeannettaz, lors de ses expériences sur la conductibilité des cristaux (II, 972), ayant percé des lames de gypse, de mica, parallèles à un plan de clivage, les a souvent séparées en deux parties, légèrement écartées l'une de l'autre et entre lesquelles pénétrait l'air. Il se formait alors des anneaux irisés en forme d'ellipses dont les axes étaient en rapport avec les différents degrés de cohésion dans les diverses directions parallèles au plan de clivage.

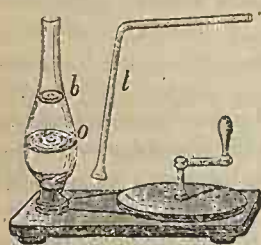


Fig. 2013.

M. Bertin obtient des anneaux très-brillants et d'une grande régularité, par le moyen suivant : Dans un tube renflé *b* (fig. 2013) on souffle, avec le liquide glycérique, une grosse bulle, qui forme bientôt, en rencontrant les parois, deux cloisons transversales concaves. On imprime au tube un

mouvement rapide de rotation, la force centrifuge tend à éloigner le liquide de l'axe de rotation, à partir duquel l'épaisseur de la mince cloison va en augmentant. On aperçoit alors de beaux anneaux irisés, qui s'étendent peu à peu et dont l'aspect change à mesure que l'épaisseur diminue dans les parties centrales. Bientôt une tache noire s'y montre, et la pellicule disparaît.

M. A. Guehard, en soufflant l'haleine sur du mercure dont la surface a été fraîchement nettoyée en y passant le bord d'une carte, obtient des anneaux qui se resserrent par l'évaporation de la couche liquide, plus épaisse au milieu que sur les bords. En éclairant avec la lampe monochromatique, on en voit ainsi des centaines, qui semblent se précipiter vers le centre. Une goutte de certaines essences légères, de pétrole, de bergamote, de citron..., donnent de beaux anneaux réguliers, de plusieurs décimètres de diamètre, pouvant être projetés au moyen de l'appareil Duboseq (2544). Enfin, l'éther légèrement collodionné, certains vernis à l'alcool, laissent sur le mercure une pellicule à anneaux irisés, qu'on peut enlever et coller sur du carton verni, où elle se conserve indéfiniment.

Les lames minces incolores impriment aussi des couleurs à la lumière

¹ Journal de physique de M. d'Almeida, t. II, p. 409.

transmise ; seulement ces couleurs paraissent, en général, moins vives que celles qui sont produites par réflexion.

Boyle paraît être le premier qui ait écrit sur les couleurs des lames minces ; il parle du verre soufflé, des couleurs de l'acier recuit, des bulles formées avec divers liquides. Hooke, dans sa *Micrographie*, cite beaucoup d'expériences sur ce sujet ; il constate que la couleur est uniforme quand la lamé mince a partout la même épaisseur, et que la couleur disparaît quand l'épaisseur est trop grande ou est excessivement petite. Ayant appliqué sur une plaque de verre, une lentille à très-long foyer, il vit autour du point de contact, des anneaux irisés, dans lesquels il remarqua que les couleurs étaient disposées suivant le même ordre que dans le premier arc-en-ciel. C'est au moyen d'un semblable système, dit *appareil de Hooke*, que Newton a découvert par l'expérience, les lois de ces curieux phénomènes.

2904. Anneaux réfléchis dans les lames minces. — Si l'on applique la face courbe d'une lentille plan-convexe à très-long foyer, sur une glace bien plane, et qu'on reçoive dans une direction sensiblement normale aux faces planes, de la lumière simple réfléchiée par ce système, on aperçoit une série d'anneaux alternativement brillants et obscurs, de plus en plus serrés à mesure qu'on s'éloigne du centre, et finissant par disparaître à une certaine distance (*fig. 2017*). Quand il y a contact apparent au centre, on y voit une tache noire, et les anneaux qui l'entourent sont dits du premier, du second, du troisième... ordre. Si les deux surfaces s'écartent un peu, on voit les anneaux se rapprocher du centre et former les uns après les autres une tache centrale alternativement brillante et noire. Si l'on rapproche les surfaces par pression, les anneaux s'agrandissent, au contraire, et la tache centrale, alternativement noire et brillante, est noire quand il y a contact ; ce qu'on obtient en pressant fortement. Ces phénomènes se manifestent, quelle que soit la nature du fluide interposé entre les deux verres ; ils ont aussi lieu dans le vide, et les diamètres des anneaux d'un même ordre dépendent du milieu interposé et de la courbure des verres. Mais ils sont indépendants de la nature de ces verres, quand ils sont tous deux de même matière.

Anneaux irisés. — Les diamètres des anneaux dépendent de la lumière simple employée, et sont d'autant plus petits que les rayons sont plus réfringibles. Si l'on fait tomber successivement les différentes parties d'un spectre sur le système des verres, on voit les anneaux s'étendre quand on passe du violet au rouge. Si donc on se sert de lumière blanche, les anneaux seront *irisés*, et l'on obtiendra ainsi la *décomposition de la lumière par les lames minces*.

Si l'n'y a pas contact au centre, et qu'on rapproche les surfaces par pression, les anneaux s'étendent, les couleurs se remplacent successivement au centre, où une tache noire apparaît dès qu'il y a contact.

2905. Anneaux transmis. — Quand on regarde la lumière des nuées à travers le système des verres, on aperçoit encore des anneaux, mais moins apparents que par réflexion. Ces anneaux, irisés avec la lumière blanche, sont alternativement sombres et brillants avec la lumière simple, et l'on reconnaît, en

mesurant les diamètres, que les anneaux brillants transmis occupent la place des anneaux noirs vus par réflexion, et réciproquement.

Dans le cas des anneaux irisés, les couleurs qui se montrent au même point par transmission et par réflexion, sont complémentaires. Pour le prouver, Young et Arago placent les verres perpendiculairement au milieu d'une feuille de papier uniformément éclairée, de manière que le système reçoive de la lumière des deux côtés; quelle que soit la position de l'œil, on ne distingue pas d'anneaux, ceux qui viennent des rayons transmis formant de la lumière blanche avec ceux que donnent les rayons réfléchis. Si l'on intercepte, au moyen d'un écran noir, les rayons qui viennent d'un des côtés, l'un des systèmes d'anneaux manquant, l'autre apparaît aussitôt. Ces expériences

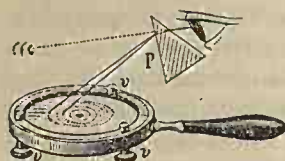


Fig. 2014.

montrent aussi que les anneaux complémentaires ont la même intensité.

Application à la photométrie. — Arago a déduit de là, une méthode photométrique assez précise. Les deux lumières que l'on veut comparer sont placées symétriquement de part et d'autre du système de verres, et l'on éloigne la plus vive jusqu'à ce que les anneaux disparaissent. Les intensités des lumières sont alors comme les carrés de leurs distances au centre des anneaux.

2906. Manière d'observer les anneaux. — La figure 2014 représente l'appareil de Hooke. Les deux verres sont pressés entre deux colliers, au moyen de vis v, v, v . Si l'on emploie la lampe monochromatique, on peut distinguer une quarantaine d'anneaux, tandis qu'on n'en voit que huit à dix avec la lumière du jour, les anneaux se serrant de plus en plus, de manière à se mêler en formant du blanc.

On distingue un bien plus grand nombre d'anneaux avec la lumière blanche, en les observant, comme l'a fait Newton, à travers un prisme P. Les rayons violets étant plus relevés vers le sommet que les rayons rouges, se rapprochent de ces derniers de manière à produire un anneau étroit presque blanc, séparé des anneaux voisins par un espace noir. Les couleurs sont à peine distinctes, mais les anneaux sont plus fins et plus nombreux. Il est évident que cela n'a lieu que dans la partie située au-delà du centre par rapport au prisme. Dans la partie opposée, au contraire, la réfraction du prisme écarte le rouge du violet dans chaque anneau, et la confusion est augmentée.



Fig. 2015.

Appareil à prisme. — Au lieu de regarder le système des deux verres à travers un prisme, on peut remplacer le verre supérieur par un prisme à angle droit P (fig. 2015), dont la face hypothénuse est appliquée sur une plaque de verre légèrement convexe. Le tout est fixé dans un cadre métallique, et deux vis v, v' servent à presser le prisme contre la plaque. Si l'on regarde dans une direction à peu près normale à l'une des faces latérales du prisme, on voit les

rayons réfléchis après être entrés par l'autre face, former de beaux anneaux minces et très-nombreux. Si l'angle du prisme était plus grand que 90° , la réflexion totale réduirait beaucoup trop le champ dans lequel les anneaux pourraient être aperçus.

Quand on éclaire les plaques avec une flamme, et qu'on regarde très-obliquement, on distingue plusieurs systèmes d'anneaux dont les centres sont situés dans le plan d'incidence. Ces anneaux, signalés par Dutour et par Herschel, ne sont que des images de ceux qui sont formés dans la lame mince réfléchis par les surfaces des plaques.

2907. Loi des diamètres dans les lames minces. — Newton a mesuré les diamètres des anneaux de différents ordres formés par de la lumière simple, quand il y avait contact au centre. Il se servait d'un compas, et avait soin de prendre les diamètres perpendiculaires au plan de réflexion, afin d'éviter l'altération qu'apporte l'obliquité, comme nous le verrons, à la longueur des autres diamètres. Il plaçait l'œil le plus près possible de l'axe de la lentille, et faisait correspondre les extrémités du compas aux points les plus brillants de chaque anneau. Il a constaté ainsi les lois suivantes :

Les carrés des diamètres des anneaux brillants vus par réflexion, sont entre eux comme la série des nombres impairs 1, 3, 5....; et les carrés des diamètres des anneaux obscurs, comme la série des nombres pairs 0, 2, 4.... — Les anneaux brillants transmis occupant la place des anneaux obscurs réfléchis (2905), *les carrés des diamètres des anneaux brillants transmis sont entre eux comme la série 0, 2, 4....; et les carrés des diamètres des anneaux obscurs, comme la série 1, 3, 5....*

Les diamètres mesurés par Newton étaient modifiés par la réfraction des rayons à travers le verre supérieur; mais cette circonstance ne change rien aux lois. En effet, soit ca (fig. 2016), la surface supérieure de la lame mince dans laquelle se forment les anneaux vus d'un point très-éloigné de la lentille, et $c'a'$, ea , ses deux faces, que nous considérons comme parallèles, la courbure de la face inférieure étant insensible dans l'espace ca . Un rayon partant du point a d'un certain anneau, sera dévié à sa sortie en a' , de manière que le diamètre de l'anneau paraîtra être $c'a' = d'$, au lieu de $ca = d$. Pour trouver le rapport de d à d' , menons la normale en a' ; on a $ca = d = cb + ba = d' + ba$. Le triangle $ba'a$ donne $\overline{ba} = \overline{ba'} \operatorname{tang} r = e \times i : n$, en appelant e l'épaisseur ba' et n l'indice de réfraction et prenant l'angle pour la tangente, r et i étant très-petits. On a en outre, dans le triangle $ic'a'$, $i = d' : l$, en désignant par l la distance de l'œil à $c'a'$. Donc, $ba = ed' : nl$. Portant cette valeur dans celle de d , il vient $d = d' \left(1 + \frac{e}{nl} \right)$. Les diamètres vrais sont donc entre eux comme ceux qu'on observe, $e : nl$ étant constant.

Babinet a imaginé un moyen ingénieux de mesurer les diamètres réels des



Fig. 2016.

anneaux. Il trace sur la glace inférieure, une division, sur le zéro de laquelle il applique la lentille; les rayons partant des traits de division subissant les mêmes déviations que ceux qu'envoient les anneaux, on obtient les diamètres réels en voyant sur quelles divisions se projettent ces anneaux.

2908. Relation entre les diamètres et les épaisseurs. — La loi des diamètres peut s'exprimer autrement, en considérant les épaisseurs de la lame mince. Soit R (fig. 2017) le rayon de courbure de la surface convexe de la lentille, $r = oa$ le rayon d'un anneau, et e l'épaisseur $am = co$ de la couche mince, au point considéré de cet anneau. On aura, en abaissant mc perpendiculaire sur la normale oR au point de contact, $mo^2 = 2R \times co = 2R \cdot e$; ou sensiblement, R étant très-grand, $mc^2 = r^2 = 2R \cdot e$, d'où $e = r^2 : 2R$. L'épaisseur est donc proportionnelle au carré de r ; il résulte donc des lois ci-dessus (2907), que les épaisseurs qui correspondent aux anneaux des divers ordres sont entre elles comme la série des nombres impairs, pour les anneaux brillants réfléchis; et comme la série des nombres pairs, pour les anneaux noirs; et vice versa pour les anneaux transmis.

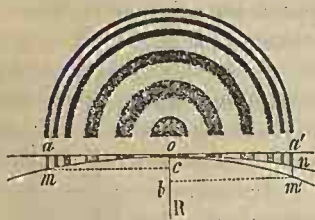


Fig. 2017.

Si la surface plane ad' était remplacée par une surface sphérique concave, on, l'épaisseur en m' serait $m'n = e - e'$, en désignant par e et e' les distances $m'a'$; na' . Or, on a $e = r^2 : 2R$, et $e' = r'^2 : 2R'$; d'où $m'n = e - e' = r^2 \left(\frac{1}{2R} - \frac{1}{2R'} \right)$; quantité proportionnelle à r^2 . — Si la surface on était convexe vers om' , on changerait le signe de R' .

Les formules qui précèdent permettent de mesurer les épaisseurs excessivement petites qui correspondent aux anneaux des divers ordres, quand on connaît leur diamètre vrai (2907) et la valeur de R . Newton a trouvé ainsi, que les épaisseurs sont $0^{\text{mm}},0001611$ et $0^{\text{mm}},0001015$, au périmètre intérieur du premier anneau rouge et du premier anneau violet formés dans l'air.

2909. Largeur des anneaux. Lentille conique. — Newton a constaté que la différence entre l'épaisseur au bord intérieur et au bord extérieur est la même dans tous les anneaux brillants ou noirs; d'où il résulte, à cause de l'accroissement de plus en plus rapide des épaisseurs avec la distance au centre, que la largeur des bandes annulaires va en diminuant quand on s'éloigne du centre, et que, par conséquent, les anneaux sont de plus en plus serrés. Il résulte aussi de là que, si au lieu d'une lentille, on posait sur le verre plan un cône excessivement aplati suivant son axe, les anneaux seraient de même largeur et également espacés.

2910. Loi des indices. — Newton a reconnu, par l'expérience, que les épaisseurs aux endroits où se forment des anneaux d'un même ordre, réfléchis ou transmis, sont en raison inverse des indices de réfraction des substances dont

sont formées les lames minces. Cette loi peut se vérifier facilement pour l'air et l'eau : on engage entre les deux verres qui donnent les anneaux, une goutte d'eau, qui pénètre par capillarité et remplace l'air dans une partie de l'espace qui s'étend autour du point de contact. On remarque que le 4^e anneau dans l'air coïncide avec le 5^e dans l'eau. Or, les épaisseurs aux anneaux dans l'air, sont : $e, 3e, 5e, 7e, 9e, \dots$, et dans l'eau $e', 3e', 5e', 7e', 9e', \dots$, et comme le 4^e anneau dans l'air se forme sous la même épaisseur que l'anneau du 5^e rang dans l'eau, on a $7e = 9e'$, d'où $e : e' = n' : n = \frac{9}{7}$, rapport égal à l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air.

Application. — La loi qui précède fournit un nouveau moyen de mesurer approximativement les indices de réfraction des liquides par rapport à l'air ; car, dans l'expression $e : e' = n' : n$, remplaçons le rapport des épaisseurs des anneaux de même ordre par celui des carrés de leurs diamètres (2908) ; nous en tirerons la valeur de n' en fonction de l'indice n de l'air. M. Sirks a appliqué cette méthode à la mesure de l'indice du *selenium*, dont il fondait une parcelle entre les 2 verres, et comparait les anneaux à ceux de l'air. Il a trouvé ainsi le nombre 2,98.

2911. Explications de Newton. — Newton a cherché à expliquer, dans le système de l'émission, les couleurs des lames minces, au moyen d'une hypothèse célèbre, qui n'est que la traduction des lois des phénomènes, mais qui a occupé une trop grande place dans la science, pour que nous omettions d'en faire connaître les principaux traits.

Théorie des accès. — Newton suppose que : 1^o Les particules lumineuses acquièrent, en pénétrant dans un milieu réfringent, une disposition à se réfléchir facilement en arrivant à la surface d'un second milieu, ou à pénétrer facilement dans ce milieu. Ces dispositions se succèdent périodiquement, à des intervalles de temps égaux extrêmement petits ; il les désigne sous les noms d'*accès de facile réflexion*, et *accès de facile transmission*. 2^o Le passage d'un accès au suivant se fait d'une manière continue, et l'espace très-petit parcouru par chaque particule dans son passage d'un accès au suivant, se nomme *longueur d'accès*. 3^o La longueur d'accès n'est pas la même pour les rayons de différentes couleurs, et augmente du violet au rouge.

Il résulte de là que les rayons qui pénètrent dans la lame mince de l'appareil de Hooke, et qui se trouvent en entrant, dans un accès de facile transmission, arrivent à la seconde surface de cette lame dans un accès de facile réflexion et sont réfléchis, partout où l'épaisseur est égale à une longueur d'accès ou à un nombre impair de longueurs d'accès ; alors la particule se présente de nouveau à la première surface dans un accès de facile transmission, et peut sortir de la lame mince. Les épaisseurs correspondant aux anneaux brillants réfléchis, ou aux anneaux noirs transmis, seront donc entre elles comme la série des nombres impairs. Partout où l'épaisseur est moindre qu'une longueur d'accès ou égale à un nombre pair de longueurs d'accès, les particules lumineuses arrivent à la seconde surface dans un accès de facile transmission, passent outre, et donnent

des anneaux brillants transmis, et par suite des anneaux noirs par réflexion.

Pour expliquer les changements de diamètre des anneaux quand on les regarde obliquement, Newton suppose que les longueurs d'accès varient avec l'obliquité ; et pour exprimer la loi des indices, il suppose que les longueurs d'accès varient dans les diverses substances, en raison inverse de leurs indices de réfraction ; nouvelles hypothèses calquées sur les faits qu'il s'agit d'expliquer. Nous allons voir combien la théorie des ondulations l'emporte sur celle de l'émission dans l'explication de ces phénomènes, et avec quelle facilité elle en retrouve les lois.

2912. Couleur des corps. — Newton avait aussi voulu expliquer la couleur des corps par des effets de lames minces. La lumière pénétrant à une certaine profondeur au-dessous de la surface mathématique du corps (2861), une partie serait réfléchiée à la surface supérieure des molécules, ou des groupes moléculaires ; l'autre pénétrerait dans leur intérieur, serait réfléchiée à leur surface intérieure, et éprouverait une coloration dépendant de l'épaisseur traversée et du pouvoir réfringent de la substance. Newton a longuement développé cette théorie dans son *Traité d'optique*. Mais elle est sujette à plusieurs difficultés sérieuses : 1^o les couleurs des couches minces déposées à la surface des corps opaques, ont un aspect métallique que ne présentent pas les corps colorés ordinaires ; 2^o on ne voit pas pourquoi les corps doivent être dépolis, pour paraître colorés ; 3^o les corps translucides, éclairés par derrière, devraient présenter la couleur complémentaire de celle qu'ils donnent par réflexion. — X. de Maistre a combattu la théorie de Newton, et lui en a substitué une autre dans laquelle il regarde la couleur des corps comme produite par l'absorption de certains rayons dans leur passage à travers la couche superficielle, dans laquelle ils pénètrent avant de se réfléchir¹. Il est probable qu'il en est ainsi pour certains corps ; mais la nécessité de l'absence de poli, montre que l'explication qui s'appuie sur les interférences (2856) est celle qui convient au plus grand nombre de cas.

II. Théorie des anneaux dans les lames minces.

2913. — Young a expliqué, dans le système des ondulations, les couleurs produites par les lames minces, en montrant que ces couleurs sont dues aux interférences des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame mince, ou à celles des rayons transmis, avec des rayons ayant éprouvé deux réflexions. Plus d'un siècle avant, Hooke avait invoqué le principe des interférences, mais sans apporter de preuves, et ses tentatives avaient été oubliées.

Principe d'Young. — Quand une ondulation rencontre la surface de séparation de deux milieux, il y a réflexion, et l'ondulation se propage en retour dans le milieu d'où elle vient. Si le second milieu est moins réfringent que le premier, le sens du mouvement de la molécule d'éther reste le même, et elle

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Sciences et arts, 1831), XLVII, p. 47.

continue à parcourir sa phase de vibration, sans que sa vitesse change de signe. Si, au contraire, le second milieu est plus réfringent que le premier, le sens du mouvement de l'éther change brusquement, de manière que le rayon réfléchi se trouve dans le même cas que s'il avait éprouvé un retard égal à $\frac{1}{2}\lambda$.

Young avait établi ce principe en considérant ce qui se passe quand une balle élastique, A, vient en choquer une autre en repos, B. Si elles ont même masse, la balle choquée B prend la vitesse de A qui reste à l'état de repos; si B présente moins de masse que A, celle-ci continue de se mouvoir dans le sens primitif, après avoir perdu de sa vitesse. Si, au contraire, la masse de B est plus grande que A, celle-ci revient sur ses pas, et il y a pour la balle choquante un changement dans le sens de la vitesse (I, 555). — Nous avons trouvé le même principe dans la réflexion du son (I, 602); la vitesse des molécules d'air en vibration change de signe quand l'onde rencontre un obstacle plus résistant que l'air, et conserve son même sens quand le second milieu est moins résistant que le premier. Le principe d'Young a été démontré plus tard par Poisson, au moyen de l'analyse mathématique.

2914. Explication des anneaux réfléchis vus

normalement. — L'œil étant placé sur l'axe de l'appareil

de Hooke, soient mm (fig. 2018) la lame mince, et sa un

rayon de lumière simple sensiblement perpendiculaire à

mm . Une partie de ce rayon se réfléchit en a , suivant ar ,

et l'autre pénètre en c , en donnant le rayon $a'r$ parallèle

à ar , la lame mince ayant ses deux faces parallèles dans

l'étendue insensible aa' . En arrivant en a' , le rayon réflé-

chi $a'r$ aura parcouru, de plus que le rayon réfléchi ar , un

espace aca' égal à $2e$, sa étant censé perpendiculaire à mm . Si nous supposons

la lame mince moins réfringente que les deux verres qui la contiennent, il y

aura changement de signe dans le mouvement vibratoire, en c ; c'est donc

comme si le retard était augmenté de $\frac{1}{2}\lambda$. Le retard sera donc égal à $2e + \frac{1}{2}\lambda$.

Les deux rayons ar , $a'r$ seront en concordance, quand cette somme sera égale

à un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, ou quand on aura $2e + \frac{1}{2}\lambda = 2m\frac{1}{2}\lambda$, ou

$e = (2m - 1)\frac{1}{4}\lambda$, c'est-à-dire pour des épaisseurs entre elles comme la

série des nombres impairs. Si l'on a, au contraire, $2e + \frac{1}{2}\lambda = (2m + 1)\frac{1}{2}\lambda$,

ou $e = 2m\frac{1}{4}\lambda$, il y aura discordance et obscurité, et les épaisseurs seront alors

entre elles comme la série des nombres pairs. Si l'on fait $m = 0$, d'où $e = 0$,

il y aura obscurité. La tache centrale est donc noire quand il y a contact. On

voit que les épaisseurs qui correspondent aux anneaux de même ordre étant

proportionnelles à λ , les anneaux violets seront plus petits que les rouges. On

retrouve donc toutes les lois données par l'expérience.

Si la lame mince était plus dense que les milieux qui la limitent, comme une

mince lame solide ou liquide dans l'air, le changement de signe des vitesses de

vibration aurait lieu à la première réflexion seulement; la différence de marche

serait $2e - \frac{1}{2}\lambda$, et les conséquences resteraient les mêmes.

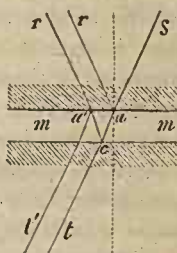


Fig. 2018.

Remarquons que le passage des épaisseurs où il y a concordance à celles où il y a discordance se faisant d'une manière continue, il y a entre elles des épaisseurs pour lesquelles la concordance ou la discordance n'ont pas lieu complètement, ce qui explique pourquoi les anneaux noirs et brillants se fondent les uns dans les autres et ne sont pas terminés par des contours nets.

Loi des indices. — Considérons l'anneau réfléchi brillant de l'ordre m , et soit λ , λ' ; n , n' les longueurs d'ondulation et les indices de réfraction de la lumière simple considérée, dans les deux substances; on aura, pour l'une d'elles, $e = (2m + 1) \frac{1}{4} \lambda$; et pour l'autre, $e' = (2m + 1) \frac{1}{4} \lambda'$; d'où $e : e' = \lambda : \lambda' = n' : n$ (2910).

2915. Anneaux réfléchis à centre blanc. — Quand il y a contact, ou a une tache noire au centre. Si l'indice de réfraction de la lame mince était compris entre les indices du milieu supérieur et du milieu inférieur, les réflexions en a et en c (fig. 2018) se feraient dans les mêmes conditions; les deux rayons réfléchis éprouveraient donc en même temps ou n'éprouveraient pas, le changement de signe du mouvement vibratoire, représentant $\frac{1}{2} \lambda$; et la différence de marche serait simplement égale à $2e$. Il y aurait donc concordance des rayons, quand on aurait $2e = 2m \frac{1}{2} \lambda$, ou $e = 2m \frac{1}{4} \lambda$. Or, pour $m = 0$, on a $e = 0$; il y aurait donc lumière au centre, où l'épaisseur est sensiblement nulle. Ce fait curieux, inexplicable dans la théorie des accès, et signalé par Young comme conséquence de la théorie des ondulations, a été vérifié par l'expérience, au moyen d'huile de sassafras ou d'huile de girofle, dont les indices sont 1,53 et 1,539, engagée entre une lentille de crown et une plaque de flint, qui ont pour indices 1,50 et 1,575. — On peut, en n'introduisant l'huile que dans une partie de l'espace autour du point de contact, obtenir deux systèmes d'anneaux incomplets, l'un à centre blanc, l'autre à centre noir formé dans l'air.

2916. Anneaux transmis. — Young explique les anneaux transmis, par l'interférence des rayons passant directement, comme *set* (fig. 2018), avec une partie t' des mêmes rayons ayant éprouvé deux réflexions dans la lame mince, en c et a' . La différence de marche des deux rayons t , t' est $2e$; les changements de signe aux deux réflexions se compensent. Il y a donc concordance quand $2e$ contient un nombre pair de fois $\frac{1}{2} \lambda$, et discordance quand il en contient un nombre impair. Les anneaux brillants transmis occupent donc la place des anneaux noirs réfléchis, et, lors du contact, le centre est brillant. S'il n'y a pas contact entre les deux verres, la tache centrale est brillante ou obscure, suivant l'épaisseur de la lame d'air. — Les anneaux transmis sont peu distincts, à cause de la grande quantité de lumière qui passe dans toutes les directions autour de celle qui forme les anneaux.

2917. ANNEAUX VUS OBLIQUEMENT. — Quand l'œil s'écarte de l'axe de la lentille qui produit les anneaux, ces anneaux, réfléchis ou transmis, s'agrandissent de plus en plus, *en restant pour chaque position de l'œil, soumis aux mêmes lois*; seulement l'épaisseur de la lame mince correspondant à un anneau d'un certain ordre, est d'autant plus forte que l'obliquité est plus grande. Newton a trouvé,

par l'expérience, que, en appelant e , e' les épaisseurs d'une lame d'air, à un anneau du même ordre, vu normalement ou suivant l'incidence i , on a, $e' = e : \cos i = e \times \sec i$. Mais, par suite d'expériences erronées, il trouva cette loi en défaut pour les incidences dépassant 60° ; et il représentait alors l'épaisseur par la formule $e' = e \cdot \sec u$; u étant un angle donné par la formule, $106 \sin u = (106 + n) \sin i$, dans laquelle n est l'indice de réfraction de la lame mince par rapport à celui de la lentille.

2918. Théorie des anneaux vus obliquement. — Considérons le cas des anneaux réfléchis. Soit mn (fig. 2019) la lame mince d'air, dont nous supposons les faces parallèles dans l'étendue très-petite où se font les réflexions d'un même rayon, et $b'b$ la surface supérieure de la lentille, parallèle à mn . Un rayon incident sb , faisant un angle i avec la normale, se réfléchit en partie en a , en donnant le rayon émergent adr ; l'autre partie pénètre dans la lame mince, se réfléchit en c , et donne le rayon émergent $b'r'$. Le chemin parcouru par une pulsation partant du point b , quand elle arrive à la surface $b'z$ en suivant la route $badz$, est $2ba + dz$. Dans le rayon réfléchi en c , donnant le rayon émergent r' , ce chemin parcouru est

$2ba + 2ac + \frac{1}{2}\lambda$; en tenant compte du changement de signe qui se fait à la réflexion en c . La différence de marche est donc, $2\overline{ac} - \overline{ad} + \frac{1}{2}\lambda$. Le triangle rectangle $db'z$ donne $\overline{ad} = \overline{db'} \cdot \sin i$. Or, on a $db' = aa' = 2ac' = 2e' \tan i$, en appelant e' l'épaisseur cc' de la lame mince au point c ; on a donc $ad = 2e' \sin i \tan i = \frac{2e' \sin^2 i}{\cos i}$. Quant à ca , il est

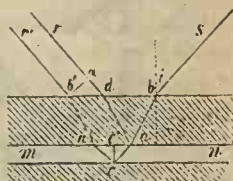


Fig. 2019.

égal, dans le triangle rectangle acc' , à $\frac{e'}{\cos i}$. Remplaçant ca et ad par leur valeur, dans l'expression de la différence de marche, il vient

$$2ca - ad + \frac{1}{2}\lambda = 2e' \cos i + \frac{1}{2}\lambda.$$

On voit déjà que, pour avoir une même différence de marche, c'est-à-dire des anneaux d'un même ordre, il faut que e' augmente en même temps que i .

Le retard relatif à un anneau vu normalement est $2e + \frac{1}{2}\lambda$ (2914), e étant l'épaisseur qui correspond à cet anneau. Si donc on veut qu'il soit de même ordre que celui qui est vu obliquement, il faut que la différence de marche soit la même, c'est-à-dire que l'on ait $2e' \cos i + \frac{1}{2}\lambda = 2e + \frac{1}{2}\lambda$, d'où $e' = e : \cos i = e \cdot \sec i$.

Nous avons supposé la lame mince formée d'air, comme le milieu ambiant; s'il n'en était pas ainsi; l'angle $c'a$ serait r différent de i , et il faudrait multiplier le chemin $2\overline{ca}$ par son équivalent optique n (2841), n étant l'indice de réfraction de la matière de la lame mince par rapport à l'air. La valeur de db' ou aa' , est alors $2e' \tan r$; et l'on a $ad = 2e' \sin i \tan r = 2ne' \sin i \tan r$, en

remplaçant $\sin i$ par $n \sin r$ (2503). La différence de marche est donc $2n \cdot \overline{ca} - xd + \frac{1}{2}\lambda = 2ne' \cos r + \frac{1}{2}\lambda$. Le retard d'un anneau de même ordre vu normalement est $2ne + \frac{1}{2}\lambda$, en introduisant l'équivalent optique n ; d'où $e' = e \sec r$. On retrouve donc la loi, en considérant l'angle que fait le rayon avec la normale, dans l'intérieur de la lame mince.

2919. Généralité de la loi des sécantes. — La théorie indique que la loi des sécantes s'applique aux plus grandes incidences, contrairement à ce qu'avait trouvé Newton; et J. Herschel voyait dans cette contradiction une grave objection au système des ondulations. Fresnel, pour lever la difficulté, alla jusqu'à admettre que la loi de Descartes était en défaut, dans le passage très-oblique des rayons à travers les lames minces. Il est vrai que cette dernière loi n'avait jamais été vérifiée avec un soin suffisant surtout pour les grandes incidences, avant les expériences précises de Dutron, qui s'est servi des raies de Fraunhofer.

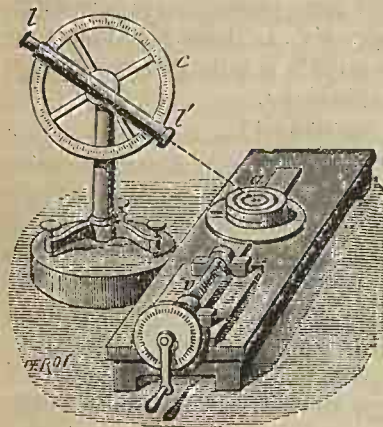


Fig. 2020.

Voulant trancher définitivement la question, MM. de la Provostaye et P. Desains eurent l'idée de répéter les expériences, et ils reconnurent que la loi des sécantes s'applique aux plus grandes incidences¹. Voici comment ils ont procédé : le système de la plaque de verre et de la lentille plan-convexe, *a* (fig. 2020), était installé sur un plateau métallique horizontal que l'on pouvait déplacer au moyen d'une vis micrométrique *v*.

Les anneaux, formés par la lumière simple de l'alcool salé, étaient observés au moyen de la lunette *l'* d'un cercle répéteur *c* perpendiculaire à la vis. Après avoir incliné la lunette de manière à faire passer le fil horizontal du réticule par le centre des anneaux, on faisait mouvoir le système des verres, et l'on amenait le fil vertical à être tangent à l'anneau considéré, successivement aux extrémités d'un même diamètre. La vis micrométrique donnait le déplacement, et par conséquent le diamètre, sans qu'il fût nécessaire de faire de correction, les rayons réfractés n'étant pas déviés hors du plan d'incidence, dans lequel se trouvait toujours l'axe de la lunette. L'angle de cet axe avec la verticale donnait, d'autre part, l'angle d'émergence. Pour observer sous un autre angle, on éloignait plus ou moins le système des verres, dans une direction perpendiculaire à la vis. — La lumière, tamisée à travers une feuille de papier blanc huilé, était fournie par une lampe monochromatique

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVII, p. 423.

à double courant d'air, mais sans cheminée. Dans le cas des grandes incidences, il fallait abaisser un écran assez près de la surface supérieure de la lentille, avant le point d'incidence, pour arrêter les rayons qui, réfléchis à cette première surface, empêchaient de distinguer les anneaux. — La loi des diamètres des anneaux a été vérifiée, par cette méthode, avec une grande précision, en allant jusqu'au 43^e anneau; et la loi des sécantes, jusqu'à l'incidence de 86°, 14', la plus grande avec laquelle on ait pu distinguer les anneaux. Ainsi s'est trouvée supprimée une contradiction qui déparait le bel ensemble que forme la théorie des ondulations.

2920. Applications. — Les déplacements considérables qu'éprouvent les anneaux pour les variations les plus minimes des épaisseurs, en font, dans certains cas, un moyen de mesure des plus délicats. Nous allons en citer quelques exemples.

1^o Mesure de λ . — La formule $e = m \frac{1}{2} \lambda$ peut servir à évaluer λ en remplaçant e par sa valeur $r^2 : 2R$, dans laquelle r est le rayon de l'anneau, et R celui de la lentille (2908).

M. P. Desains procède en mesurant directement l'épaisseur¹. La lentille est fixe, et peut être éloignée ou rapprochée de la plaque de verre, au moyen d'une vis micrométrique dont le pas, de $\frac{1}{2}$ mm, est très-régulier. La lumière simple, empruntée à un spectre bien pur, donne des anneaux qui couvrent toute la surface de la lentille. Le contact étant établi, on écarte lentement la plaque; on voit les anneaux se resserrer, et l'on compte le nombre de fois, m , que la tache centrale s'est reproduite. Si l'écart donné par la vis est e , on a $e = m \frac{1}{2} \lambda$, d'où l'on tire λ . Par exemple, pour faire rentrer 60 anneaux dans la tache centrale, il a fallu, avec la lumière de la lampe monochromatique, faire tourner la vis de près de 13°.

2^o Influence de la température sur les indices. — Si l'on ne peut voir les anneaux irisés que dans les lames extrêmement minces, avec la lumière simple on peut en distinguer un très-grand nombre, avec des différences de marche allant à des milliers de λ . Voici comment opère M. Fizeau². Les deux verres étant disposés de manière à pouvoir être plus ou moins rapprochés au moyen d'une vis micrométrique, il place près de l'œil regardant normalement, un prisme à réflexion totale, qui renvoie sur l'appareil les rayons d'une lampe monochromatique. Au-dessus des verres, est une lentille convergente dont le foyer est égal à sa distance à l'œil, qui reçoit ainsi des rayons partis des anneaux dans des directions parallèles. On voit alors la surface des verres couverte jusqu'aux bords d'anneaux très-nets. Si l'on écarte les verres, les anneaux se contractent et disparaissent au centre, et l'on peut compter le nombre de ceux qui passent devant un repère marqué sur le verre supérieur. Jusqu'à la 4^e centaine, ces anneaux sont très-nets; mais, à partir de ce nombre, M. Fizeau a

¹ *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. III, p. 105.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXVI, p. 429.

remarqué des périodes de netteté et de trouble, qui semblent dépendre de ce que la lumière jaune employée n'est pas parfaitement simple, puisque sa raie D peut être séparée en plusieurs autres (2634). Quand l'alcool de la lampe ne contient que des traces de sel, on peut voir passer jusqu'à 50,000 anneaux, le dernier correspondant à une différence de marche de 50,000 λ ; de sorte qu'on peut calculer λ avec une extrême précision.

En substituant à la lame d'air, une lame de verre de 10^{mm} d'épaisseur, par exemple, on verra des bandes sombres et brillantes indiquant que les surfaces ne sont pas rigoureusement planes, ou que la masse n'est pas absolument homogène. Si l'on chauffe cette lame, les bandes se déplacent sans changer de forme, et l'on peut compter le nombre de celles qui passent sur le repère, chaque passage correspondant à $\frac{1}{2}\lambda$ de plus. Le déplacement est dû à l'accroissement d'épaisseur par la dilatation, et à la variation de l'indice de réfraction par la chaleur.

Pour exprimer la part de chacune de ces causes, soit F le nombre d'ondulations qui mesure la différence de marche $F\lambda$; on aura (2914) $F\lambda = 2ne$, en

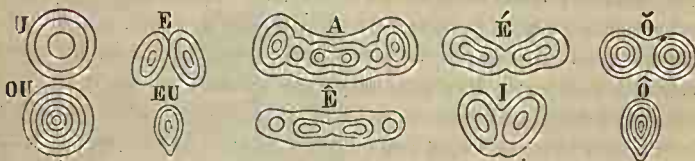


Fig. 2021.

désignant par λ la longueur d'ondulation dans l'air pour la lumière considérée, par e l'épaisseur, et par n l'indice de réfraction de la lame à la température ordinaire. Si on l'échauffe de t° , n deviendra n' , l'épaisseur sera $e(1 + kt)$, et, f étant le nombre de franges qui sont passées sous le repère, on aura

$$(F + f)\lambda = 2n'e(1 + kt); \quad \text{d'où} \quad n' = \frac{2ne + \lambda f}{2e(1 + kt)},$$

en remplaçant F par sa valeur tirée de $F\lambda = 2ne$. Au moyen des valeurs de e, k, n, t, λ , évaluées avec le plus grand soin, M. Fizeau a reconnu que la chaleur augmente légèrement l'indice, et, par conséquent, diminue la vitesse de la lumière, quoique la densité soit diminuée (2843). L'augmentation dépasse à peine $\frac{1}{10000}$ pour 100°, sur le verre de Saint-Gobain, et elle est insensible pour certains crowns.

Nous avons indiqué antérieurement l'application qu'a faite M. Fizeau de la méthode qui précède, à l'étude de la dilatation des cristaux (II, 1002).

3^e Étude phonéoscopique des voyelles. — M. Guébbard a fait une application curieuse des iris qu'il obtient en soufflant son haleine sur le mercure (2906), à l'indication des diverses attitudes que prennent les cavités buccales pendant l'émission des voyelles. Le courant d'air humide lancé pendant cette

émission, d'une distance de 3 à 4^{cm}, forme un cylindre dont la section droite dépend de la disposition des cavités buccales d'où il sort; la position des lèvres et de l'arcade dentaire n'y contribuant pas sensiblement. On obtient ainsi, en quelques secondes, des courbes irisées symétriques latéralement, pouvant présenter plusieurs centres, et dont la forme dépend de la voyelle émise et des nuances qu'elle peut recevoir. La figure 2021 représente au trait, quelques-unes de ces courbes irisées. On voit combien elles changent avec les différentes voyelles, et, pour une même voyelle, quand elle est longue ou brève¹.

§ 2. — COULEURS DANS LES LAMES ÉPAISSES

2021. ANNEAUX PRODUITS PAR RÉFLEXION DIFFUSE. — Newton, ayant fait tomber normalement sur un miroir sphérique concave en verre étamé, *mm*, (fig. 2022), un mince faisceau de rayons solaires passant par une petite ouverture placée au centre de courbure *o* de ce miroir, obtint autour de cette ouverture, une série d'anneaux irisés, ayant le violet en dedans comme dans les lames minces. Avec la lumière simple, ces anneaux étaient alternativement brillants et obscurs.

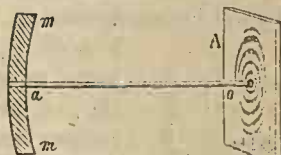


Fig. 2022.

Newton a reconnu que : 1° les diamètres de ces anneaux sont soumis aux mêmes lois que ceux des anneaux *transmis* formés par les lames minces; 2° quand on emploie différentes lumières simples, les rapports entre ces diamètres sont aussi les mêmes qu'avec les lames minces; 3° les diamètres des anneaux formés par des miroirs de même rayon et d'épaisseur différente, sont en raison inverse des racines carrées de ces épaisseurs. Ces lois ont été vérifiées par Biot et Pouillet.

Si l'écran *ab* ne passe pas par le centre du miroir, les anneaux sont moins brillants. — Lorsqu'on incline peu à peu le miroir, de manière que l'image focale de l'ouverture de l'écran se projette à côté du faisceau incident, le centre des anneaux se trouve au milieu de la droite qui joint l'ouverture à son image, qui, avec la lumière simple, est alternativement brillante et obscure, et passe par toutes les nuances du spectre quand on emploie la lumière blanche.

La formation des anneaux est subordonnée à une condition qui avait échappé à Newton : c'est que la surface antérieure du miroir doit être un peu trouble. Les anneaux sont à peine visibles quand elle est nette et polie, tandis que si on la ternit par le souffle de l'haleine, en y projetant de la poussière, ou en y passant une légère couche de vernis ou d'eau blanchie avec un peu de lait qu'on laisse ensuite sécher, les anneaux présentent un éclat remarquable. D'un autre côté, si l'on enlève la couche de tain de la surface postérieure, les anneaux sont

¹ *La Nature, revue des sciences*, janvier 1880, p. 75.

faibles, et il ne s'en produit pas avec un miroir métallique. On conclut de là que ces anneaux sont produits par la combinaison des rayons réfléchis à la surface postérieure du miroir, avec les rayons *diffus* renvoyés par la surface antérieure dont on a terni l'éclat. Cette conclusion devient encore plus évidente dans la manière d'opérer du duc de Chaulnes.

Anneaux du duc de Chaulnes. — Au lieu d'employer un miroir de verre, le duc de Chaulnes se servait d'un miroir métallique, devant lequel il plaçait parallèlement une lame de verre un peu ternie *ab* (fig. 2023), ou une lame de mica remplaçant la surface antérieure du miroir de verre.

Anneaux de Pouillet. — Au lieu d'une lame transparente, Pouillet place devant le miroir *métallique*, un écran *n* (fig. 2025) percé d'une ouverture de forme quelconque, assez petite pour que ses bords rencontrent les rayons incidents et réfléchis sur le miroir. Un simple bord rectiligne placé devant le miroir suffit même pour produire des anneaux; mais on ne distingue bien qu'une partie de leur circonférence.

2022. Anneaux aériens. — Les anneaux formés par la lumière diffuse peuvent être vus directement, sans être projetés sur un écran. M. Stokes prend le miroir sphérique de verre à surface ternie, dispose une bougie au centre, de manière que son image se confonde avec elle, et, plaçant l'œil au-delà du centre, il voit de beaux anneaux dans l'air. — Quételet place une bougie près de l'œil, à une distance d'environ 1 mètre d'une glace plane à surface ternie, de manière que la bougie et son image paraissent se toucher, et il voit, autour de l'image, des portions d'anneaux irisés.

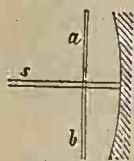


Fig. 2023.

W. Herschel fait tomber un pinceau de rayons solaires sur un miroir sphérique concave en métal, et intercepte, au moyen d'un écran, le pinceau réfléchi; puis, formant dans l'air un nuage de poussière devant le miroir, il aperçoit des anneaux aériens assez brillants.

2023. Explication des anneaux produits par les miroirs ternis. — Newton avait voulu expliquer ces anneaux par sa théorie des accès. Il les attribuait aux rayons réfléchis d'une manière diffuse par la surface étamée du miroir, rayons qui se présentaient à la surface antérieure, dans différentes phases d'accès suivant leur obliquité, et pouvaient sortir par cette surface ou être réfléchis en dedans. Biot avait étendu cette explication à l'expérience du duc de Chaulnes. Mais le tain des glaces ne diffuse pas sensiblement la lumière, et nous venons de voir le rôle évident que joue la diffusion à la surface *antérieure* du miroir. Voyons comment le système des ondulations explique ces phénomènes. Nous ne considérerons que le cas où le faisceau incident passe par le centre du miroir.

Soient *mm'*, *m'm'* (fig. 2024), les deux faces de ce miroir, et *sa* un pinceau incident de lumière simple. Une partie de ce pinceau se réfléchit spéculairement en *a* et revient sur lui-même, pendant qu'une autre partie est réfléchie *avec diffusion*, par la surface trouble du miroir. Le reste du pinceau pénètre dans le

verre du miroir; une partie directement suivant ab , et l'autre en formant un cône de *lumière diffuse* ayant son sommet au point a , où tous les rayons sont dans la même phase de vibration, et que nous prendrons pour point de départ. Le pinceau direct ab se réfléchira en b en revenant sur lui-même, et se partagera encore, à sa sortie en a , en rayons émergeant directement suivant as , et en *rayons diffus* formant un faisceau divergent, qui se réunira au cône de rayons diffus déjà formé par la lumière incidente réfléchiée à l'entrée en a . Les rayons qui composent le cône intérieur de rayons diffus nab se réfléchissent sur la surface étamée, en prenant les mêmes directions que s'ils partaient du point a' , foyer conjugué du point a ; puis ils se réfractent en émergeant à la surface $m'm'$, et se trouvent dans le même cas que s'ils partaient du point o , foyer conjugué du point a' par rapport à la surface d'émergence $m'm'$.

Nous avons donc trois cônes de rayons diffus : le premier a son sommet en o , et les deux autres, qui coïncident, ont leur sommet en a . Les rayons du premier ne pourront interférer, sur l'écran cs ,

avec ceux du cône formé par les rayons diffus réfléchis en dehors en a , à cause de la trop grande différence de marche.

Mais ces rayons interféreront avec ceux du cône formé en a lors de l'émergence du rayon réfléchi ba ; car ces deux systèmes de rayons peuvent être considérés comme ayant leur point de départ en o , et, par conséquent, comme se propageant dans l'air; ce qui nous

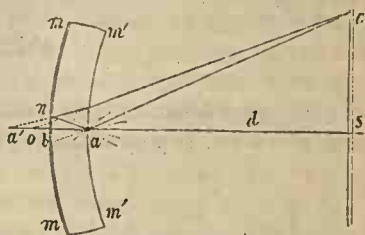


Fig. 2023.

dispense d'introduire les *équivalents optiques* (2841). Leur différence de marche, en arrivant en un point c , par exemple, sera donc $oa + ac - oc$. Si cette différence est égale à un nombre *pair* de fois $\frac{1}{2}\lambda$, il y aura *lumière*, et, si elle est égale à un nombre *impair*, il y aura *obscurité*.

Cherchons donc la différence de marche, pour en déduire les lois des diamètres des anneaux. Soient $y = sc$ le demi-diamètre, e l'épaisseur ab du miroir, f la distance oa , et d la distance as du miroir à l'écran. La différence de marche est $oa + ac - oc = f + \sqrt{d^2 + y^2} - \sqrt{(d+f)^2 + y^2}$. Égalant cette différence à $m\frac{1}{2}\lambda$, calculant les racines, et négligeant les puissances de y , qui est très-petit par rapport à d , il vient

$$y^2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d+f} \right) = m\lambda; \quad \text{d'où } y^2 = \frac{d(f+d)}{f} m\lambda; \quad [1]$$

équation qui représente une hyperbole dont les foyers sont a et o . La trajectoire décrite par un point d'un anneau, quand on change la distance de l'écran au miroir, est donc sensiblement une hyperbole, et non une ligne droite, comme il résulterait de la théorie des accès. Tout étant symétrique autour de sa , chaque anneau se trouve sur l'une des nappes d'un hyperboloïde de révolution autour

de cette droite. — On voit aussi que les carrés des diamètres des anneaux brillants, pour lesquels m doit être pair, sont entre eux comme la série des nombres pairs, et que, ces carrés étant proportionnels à λ , les anneaux violets sont plus petits que ceux des autres couleurs; ce qui fait que la lumière blanche donne des anneaux irisés.

Pour trouver la relation entre les diamètres, l'épaisseur et l'indice de réfraction, n , de la matière du miroir, cherchons la valeur de $f = oa$, en fonction de ces quantités. Les points a' et o sont des foyers conjugués par rapport à un milieu indéfini limité par la surface concave $m'n'$. Désignons par R le rayon de la surface mm , et remarquons que aa' peut être supposé égal à $2e$, le miroir étant sensiblement plan dans la petite étendue bn ; la formule qui correspond à ce cas (2517) est $-\frac{1}{f} + \frac{n}{2e} = \frac{n-1}{-R}$; d'où $f = ao = \frac{2eR}{nR + 2e(n-1)}$; ou $f = \frac{2e}{n}$, en négligeant $2e(n-1)$ devant nR . Substituant dans la formule [1], elle devient

$$y^2 = \frac{d^2 n}{2e} m \lambda. \quad [2]$$

en négligeant d devant $nd^2 : 2e$. Les carrés des diamètres des anneaux de même ordre sont donc : 1° proportionnels à l'indice de réfraction; 2° en raison inverse de l'épaisseur du miroir; comme l'avait trouvé Newton.

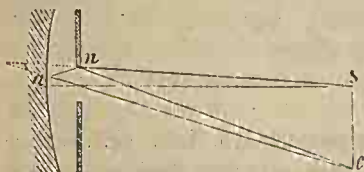


Fig. 2025.

Ce qui précède s'applique aux anneaux obtenus par la méthode du duc de Chaulnes, la forme plane de la lame antérieure n'ayant pas d'influence sensible sur les résultats; seulement il faut faire $n = 1$.

Dans l'expérience de Pouillet, les bords de l'ouverture envoient de la lumière réfléchie, soit diffusément, soit spéculairement, dans des directions très-différentes na, nc, \dots (fig. 2025), à cause de la forme du bord de cette ouverture. Un de ces rayons, na , réfléchi suivant ac par le miroir, rencontre en c un autre rayon, nc , réfléchi par le bord, et se trouve, en c , en concordance ou en discordance, de manière à donner des anneaux brillants ou obscurs.

2924. Anneaux de Babinet. — Si l'on fait tomber sur une plaque de verre à faces parallèles, ab (fig. 2026), dont les surfaces sont légèrement ternies, un faisceau de rayons lumineux rendus convergents par une lentille L , on voit, sur un écran ce placé au foyer de cette lentille, des anneaux qui suivent les mêmes lois que ceux de Newton. Ces anneaux sont produits par la combinaison de rayons diffus partant des deux faces de la lame. Par exemple, le point c reçoit un rayon bnc , du cône diffus ayant son sommet en b , rayon qui émerge en n sans éprouver de diffusion, et le rayon ac appartenant au cône diffus qui a son

sommet en a , et formé par le rayon transmis ba . Si nous prenons le point de départ de ces rayons en o , la différence de route sera $oa + ac - oc$; et, en adoptant les mêmes notations que précédemment, et, faisant les mêmes calculs, on retrouve la formule [1] (2923). Si

l'on veut introduire l'épaisseur e , et l'indice de réfraction n de la lame, il faut remplacer $f = ob$ par son équivalent

optique $e \times n$, et il vient $y^2 = \frac{d^2 n}{e} m \lambda$;

formule qui n'est autre chose que la formule [2] (2923), dans laquelle $2e$ est remplacé par e ; ce qui tient à ce

que, dans le cas du miroir sphérique, le rayon qui est réfléchi intérieurement, a parcouru deux fois l'épaisseur de la lame de verre.

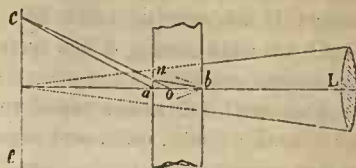


Fig. 2026.

2925. FRANGES PRODUITES PAR DES PLAQUES ÉPAISSES. — Les rayons ayant éprouvé des réflexions sur les faces de lames épaisses, peuvent interférer et produire des franges, comme les lames minces, malgré la grande différence de marche. Voici comment Brewster a réalisé ce phénomène, en 1817. On dispose deux glaces bien égales (fig. 2027), très-rapprochées, et formant un très-petit angle. On regarde à travers ce système, un disque lumineux soutenant un angle de 2° ou 3° , par exemple un trou pratiqué dans le volet de la chambre noire, et se projetant sur le ciel. On voit une image blanche de l'ouverture, suivie d'une série d'images colorées de plus en plus faibles, perpendiculaire à l'intersection des lames. Ces images, dont on ne distingue bien ordinairement que la première, présentent 15 ou 16 bandes irisées, parallèles à l'intersection, et dont les distances sont en raison inverse de l'angle des lames. Avec des glaces de 3^{mm} d'épaisseur formant un angle de $11'$, la largeur des franges est de $26'$ à $27'$.

Ces franges sont produites par l'interférence de certains rayons qui ont subi plusieurs réflexions dans les lames. Considérons seulement les rayons émergents qui n'ont subi que deux réflexions. Ces rayons sont au nombre de sept; en effet, soit A un rayon incident, et

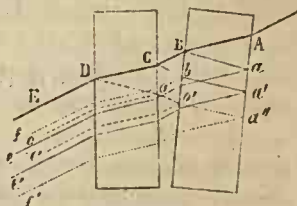


Fig. 2027.

ABCDE la partie qui passe directement à travers les deux glaces. La réflexion en B et a , donnera le rayon e ; et la réflexion en C et a' , le rayon e' . Ces deux rayons ne différant en longueur que de la quantité $CB + Cb$, pourront interférer. Une réflexion en D et o , donnera le rayon émergent c ; et une réflexion en D et o' , le rayon c' . Ces deux rayons pourront aussi interférer, la différence de marche n'étant environ que $2oo'$. Il reste encore deux rayons émergents f, f' formés par réflexions en C et b , et en D et a'' ; mais leur différence de marche entre eux et avec les autres rayons émergents, étant égale au moins au double

de l'épaisseur des plaques, ces rayons ne concourront pas à la formation des franges. Il ne reste donc, pour les former, que les couples de rayons e , e' et e , e' . D'après la direction des rayons incidents, direction qui dépend du point considéré du disque lumineux, la distance parcourue entre les glaces par ces rayons variera, la différence de marche $CB + Cb$ ou $2oo'$ sera d'un nombre pair de $\frac{1}{2}\lambda$ ou d'un nombre impair, et l'on apercevra, avec la lumière simple, des franges alternativement brillantes et obscures. Les systèmes de franges produites par les deux couples de rayons coïncideront sensiblement, parce que leur distance est tellement petite, qu'on peut regarder les différences de marche $CB + Cb$ ou $2oo'$ comme égales.

Pour faire varier l'angle des glaces, Brewster les séparait par de petites masses de cire qu'il écrasait plus ou moins. On les ajuste aussi dans deux viroles emboîtées l'une dans l'autre, et à l'axe desquelles elles sont un peu inclinées; en faisant tourner l'une des viroles, on peut amener les plaques à être parallèles, ou à former un petit angle, dont le *maximum* est égal au double de l'angle que fait chaque lame avec le plan des viroles. — Enfin, les viroles peuvent être réunies par une charnière, et une vis sert à rapprocher les bords opposés.

Nous rappellerons, en terminant, les franges de M. Jauin, obtenues au moyen de la réflexion de rayons sur les deux faces de glaces sensiblement parallèles, et dont il a fait usage dans la construction de son réfracteur interférentiel (2849). — M. Mascart a fait une étude détaillée de ces franges, ainsi que de celles de Brewster, et a élucidé différents points, laissés obscurs, de leur théorie.

CHAPITRE XI

DOUBLE RÉFRACTION

« L'existence du fluide éthéré est incontestablement démontrée par la propagation de la lumière dans les espaces planétaires, par l'explication si simple, si complète des phénomènes de diffraction..... Les lois de la double réfraction prouvent avec non moins de certitude, que l'éther existe dans tous les milieux diaphanes. »

(LAMÉ, *Sur la th. math. de l'élasticité des solides.*)

2926. — Quand un rayon de lumière pénètre dans un milieu homogène, il se réfracte en suivant les lois que nous avons fait connaître (2482). Ces lois supposent (2840) que la vitesse de la lumière reste la même dans toutes les directions que peut suivre le rayon dans l'intérieur du milieu réfringent. Mais quand ce milieu n'est pas homogène, comme cela a lieu pour certains corps cristallisés, le rayon se partage, généralement, en se réfractant, en deux autres

qui marchent séparément. Ce phénomène, connu sous le nom de *double réfraction*, a été découvert en 1669. Un voyageur avait rapporté d'Islande de beaux cristaux de spath calcaire qu'il remit à Érasme Bartholin; celui-ci, frappé de leur belle transparence, s'en servit pour étudier la réfraction, dont les lois étaient encore controversées, et découvrit la *double réfraction*. Ce phénomène a été observé ensuite dans le cristal de roche par Huyghens, puis, dans une foule d'autres cristaux, et Dufay a constaté qu'il ne se manifeste qu'avec ceux qui n'appartiennent pas au système régulier, c'est-à-dire dont la forme primitive n'est pas symétrique autour d'un point.

Cristaux à un ou à deux axes. — Parmi ces cristaux, il en est qui sont symétriques autour d'un axe, et d'autres qui ne le sont pas. Les premiers sont dits *cristaux à un axe* ou *uniaxes*, et les derniers *cristaux à deux axes* ou *biaxes*; nous allons d'abord considérer les cristaux à un axe.

§ 1. — DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN AXE.

I. Phénomènes et lois de la double réfraction.

2927. DOUBLE RÉFRACTION DANS LES UNIAxes. — Les phénomènes de la double réfraction ont d'abord été étudiés sur le *spath d'Islande*, ou chaux carbonatée cristallisée en rhomboédres faciles à cliver. Les plus beaux cristaux viennent d'Islande, où l'on en trouve d'une transparence parfaite. On en rencontre de petits échantillons de quelques centimètres d'épaisseur en France, notamment dans les Pyrénées. Les angles des faces du rhomboèdre primitif sont de $101^{\circ}55'$, et $78^{\circ}5'$. On y distingue deux sortes d'angles trièdres; deux, qui sont opposés, formés par les arêtes de trois angles dièdres obtus, égaux à $105^{\circ}5'$, et six autres formés de trois angles dièdres, égaux à $74^{\circ}55'$. La droite qui joint les deux premiers est l'*axe cristallographique* du rhomboèdre. Cet axe fait des angles de $45^{\circ}23'$ avec les trois faces, et de $63^{\circ}45'$ avec les trois arêtes qui aboutissent à ses extrémités.

Si l'on fait passer un pinceau de rayons solaires à travers un cristal de spath d'Islande, on voit, en général, ce rayon se bifurquer à son entrée, en formant deux pinceaux réfractés qui donnent chacun un pinceau émergent.

Double réfraction de la chaleur. — M. Knoblauch a le premier constaté la *double réfraction de la chaleur*, en portant un appareil thermo-électrique dans les deux pinceaux lumineux sortant du spath d'Islande. Il a reconnu que les pinceaux calorifiques suivent les pinceaux lumineux dans tous les déplacements qu'ils subissent quand on déplace le cristal. M. Tyndall est arrivé aux mêmes résultats, au moyen de chaleur obscure, après avoir fait passer les rayons solaires à travers une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone.

Rayons ordinaire et extraordinaire. — Quand, observant la double réfraction dans une lame d'un cristal uniaxe terminée par deux faces parallèles,

on fait tourner cette lame sur elle-même, de manière que ces faces restent dans le même plan, on voit l'un des rayons émergents rester en repos pendant que l'autre tourne autour de lui. Le premier rayon suit donc les lois ordinaires de la réfraction; ce qui indique que la lumière se propage, dans ce rayon, avec une vitesse indépendante de sa direction dans le cristal; on le nomme *rayon ordinaire*. L'autre rayon n'obéit pas aux lois de Descartes, la vitesse de la lumière suivant ce rayon, changeant avec sa direction dans le cristal; on le nomme *rayon extraordinaire*.

On peut aussi observer la double réfraction, en regardant un point lumineux à travers le cristal; ce point paraît double. On peut enfin poser simplement le cristal sur une page écrite; chaque lettre paraît double. Pour nous rendre compte de ces résultats; considérons un point lumineux *s* (fig. 2028); le pinceau incident *si* se bifurque, et donne deux pinceaux réfractés et deux pinceaux émergents, dont un, *e*, entre dans la pupille, et fait voir l'image *r* du point *s*, pendant que l'autre, *o*, passe en dehors de l'œil. Le pinceau *si'* donne, de même, deux pinceaux émergents *o'*, *e'*, dont le premier seul entre dans la pupille, et fait voir une seconde image *r'* du point *s*. L'une des images est donc donnée par le rayon ordinaire de l'un des pinceaux, et l'autre par le rayon extraordinaire de l'autre pinceau.

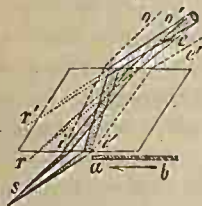


Fig. 2028.

On remarque que l'image *r'* qui correspond au pinceau le plus dévié, paraît plus rapprochée de l'œil que l'image *r*. Cela tient à ce que le sommet du pinceau conique qui a pour base la pupille, se rapproche d'autant plus de cette base que ce pinceau émergent est plus

dévié, comme il est facile de s'en assurer en appliquant la loi de Descartes.

Expérience de Monge. — Si les faces du cristal sont parallèles entre elles, les rayons émergents seront parallèles aux rayons incidents correspondants. Il faudra donc, pour que les pinceaux *o'* et *e* aboutissent à la pupille, que les pinceaux réfractés se croisent dans l'intérieur du cristal, comme le montre la figure. Si donc, comme l'a fait Monge, on fait glisser sous le cristal une carte *ab*, par exemple dans le sens de la flèche, on verra disparaître, la première, l'image *r* la plus éloignée de la carte; le faisceau *si'* étant le premier intercepté.

2028. Appareil de projection. — Pour une foule de cristaux, l'angle des deux rayons réfractés est plus petit qu'avec le spath d'Islande. On peut alors augmenter la distance entre les deux faisceaux projetés sur un écran, au moyen d'une lentille: soit *s* (fig. 2029) un point lumineux qui fournit le pinceau divergent *si*. Ce pinceau se bifurque en *i* en pénétrant dans le cristal *AB*, et donne les pinceaux émergents *e* et *e'*; dont les sommets sont en *r* et *r'*. Ces pinceaux traversent ensuite une lentille à long foyer, *L*, et vont former les images focales *R*, *R'* situées sur les axes secondaires *roR*, *r'oR'*. La distance *RR'* sera d'autant plus grande par rapport à *rr'*, que *R'o* sera lui-même plus grand par rapport à *r'o*. — En glissant un écran *e*, on reproduira l'expérience de Monge.

2929. Cause générale de la double réfraction. — Le rayon extraordinaire n'obéit pas à la loi des sinus; ce qui montre que la vitesse de propagation de la lumière varie avec la direction de ce rayon dans le cristal. On en conclut que l'éther doit avoir une densité différente dans les diverses directions; et l'on est conduit à admettre que cette inégalité de densité est due elle-même

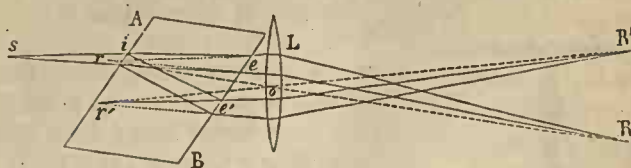


Fig. 2029.

au mode d'arrangement des molécules des cristaux bi-réfringents, molécules qui sont plus rapprochées les unes des autres dans certaines directions que dans d'autres. Ce dernier fait est attesté par la netteté différente de certains clivages; les changements, suivant les directions, de l'élasticité (I, 785), de la dilatabilité (II, 1001), de la conductibilité pour la chaleur (II, 691) et pour l'électricité (III, 1644); enfin, par la polarité diamagnétique (III, 2384).

Cette manière de voir est confirmée par ce qui se passe dans les solides transparents quand on en détruit l'homogénéité par la compression, par la trempe, etc.; ces corps produisent alors la *double réfraction accidentelle*, comme il résulte des expériences suivantes.

Double réfraction du verre comprimé, etc. — On pose sur un plan, comme l'a fait Fresnel¹, les uns à côté des autres et par leur face hypothénuse, quatre prismes rectangulaires de verre *a, b, c, d* (fig. 2030); on applique sur leurs bases, des feuilles de carton, puis des lames d'acier, sur lesquelles on exerce, avec une vis, une forte compression, qui a pour effet de raccourcir les

prismes. Entre eux, sont placés trois autres prismes *m, n, o* et deux demi-prismes *r, t*, un peu plus courts que les premiers, auxquels ils sont soudés avec du mastic en larmes, pour éviter les pertes de lumière par réflexion. Si l'on regarde à travers les faces *t* et *r*, un trait



Fig. 2030.

placé à 1 mètre de distance, on le voit double, et la distance angulaire des deux images peut aller à 6' ou 7'. Les deux faisceaux de rayons qui produisent ces images jouissent des mêmes propriétés que s'ils étaient fournis par un prisme de spath d'Islande dont les arêtes seraient parallèles à l'axe du cristal. Les prismes non comprimés sont destinés à détruire la déviation du rayon ordinaire, et à corriger la dispersion du rayon extraordinaire, dont la déviation est augmentée par chacun des prismes comprimés.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XX, p. 376.

La figure 2031 représente un appareil construit par M. Duboseq, au moyen duquel on répète cette expérience. Les prismes sont placés verticalement entre deux plaques de laiton, où ils sont comprimés au moyen de la vis placée au-dessus. A droite est un tube¹ où l'on applique l'œil, pour observer une mire fixée au bout d'une tige de 1^m de longueur fixée au support, du côté opposé de l'oculaire. Cette mire, représentée à part, à gauche du pied de l'appareil,

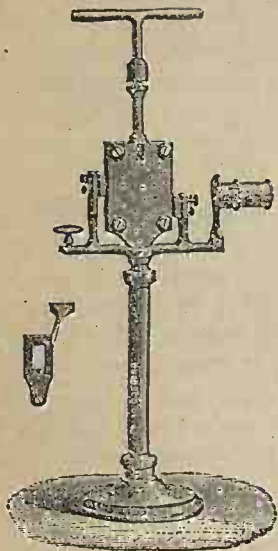


Fig. 2031.

consiste en un cadre dans lequel est tendu un fil vertical. Pour rendre la séparation des deux images du fil plus sensible, on fait passer trois fois les rayons à travers les prismes, en les faisant réfléchir sur deux petits miroirs qui se voient de chaque côté des prismes, et dont on règle la position au moyen de vis.

M. Guérard a constaté la séparation des images dans des prismes de verre trempé, par conséquent non homogènes, alternant avec des prismes de verre recuit. — La *polarisation chromatique* nous fournira plus tard des moyens très-déliés de reconnaître la double réfraction dans le verre comprimé, fléchi, trempé, inégalement échauffé; dans la corne, les plumes, et en général toutes les substances dans lesquelles les molécules ne sont pas également rapprochées dans les diverses directions.

Dans les cristaux ayant un axe de figure, les molécules sont arrangées symétriquement autour de cet axe, de manière que toutes les lames normales à l'axe sont identiques et homogènes, comme il résulte de l'étude de l'élasticité et de la conductibilité; mais la distance des molécules est différente dans une même lame; tantôt plus grande, tantôt plus petite, de ce qu'elle est quand on passe de l'une à l'autre. La double réfraction va nous montrer qu'il en est de même pour la distribution de l'éther autour de l'axe.

Dans les cristaux uniaxes, la dilatation est différente suivant l'axe et perpendiculairement à l'axe; la chaleur doit donc modifier l'angle de bifurcation des deux rayons; c'est, en effet, ce qu'a constaté Fresnel.

2930. Section principale. — Si l'on pose un cristal de spath d'Islande, sur une ligne droite tracée sur une feuille de papier et située dans le plan d'incidence, et si l'on fait tourner le cristal sur lui-même, on remarque deux positions pour lesquelles les deux images de la droite sont sur le prolongement

¹ Dans ce tube est un prisme de spath d'Islande, au moyen duquel on constate, comme nous le verrons plus tard, l'état de *polarisation* des rayons ordinaires et extraordinaires.

l'une de l'autre. Quand cela a lieu, les rayons réfractés émanant d'un même point du trait sont tous les deux dans le plan d'émergence qui passe par l'œil, ou dans le plan d'incidence. Le rayon extraordinaire obéit donc à l'une des lois de la réfraction. Quand il en est ainsi on remarque que le plan d'incidence est parallèle à la bissectrice d (fig. 2032) de l'angle obtus de la face naturelle du cristal, ou parallèle à la petite diagonale ab du losange que forme cette face quand le cristal est régulier. Le plan d'incidence est alors parallèle au plan diagonal qui contient l'axe be ; car ce dernier plan est perpendiculaire à la face abe , parce qu'il contient une droite be également inclinée sur les côtés be , bn , et la bissectrice ba de l'angle qu'ils font entre eux.

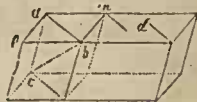


Fig. 2032.

Si l'on taille des faces artificielles dans le cristal, les deux rayons réfractés seront encore dans le plan d'incidence, quand ce plan sera parallèle à l'axe. On nomme *section principale* d'une face naturelle ou artificielle, tout plan normal à cette face et parallèle à l'axe cristallographique. On peut donc dire que les deux rayons réfractés sont dans le même plan, quand le rayon incident se trouve dans une section principale. Si le rayon incident est normal à la face d'entrée, le rayon ordinaire n'éprouve pas de déviation, et le rayon extraordinaire, le plus souvent dévié, l'est dans la section principale.

2931. Axe optique d'un cristal. — Supposons qu'on taille à l'extrémité de l'axe ce d'un cristal uniaxe (fig. 2033), une face bad perpendiculaire à cet axe. Un rayon tombant sur cette face sera toujours dans une section principale. Aussi, les deux rayons réfractés seront-ils toujours dans le plan d'incidence. Si le rayon incident, s , décrit un cône droit autour de la normale, les deux rayons réfractés o et e décriront aussi des cônes droits autour de cette droite, ce qui montre que l'éther est distribué d'une manière régulière dans toutes les sections perpendiculaires à l'axe.

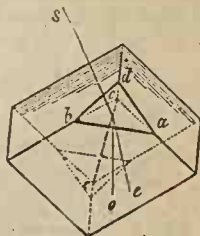


Fig. 2033.

Si le rayon incident est normal à la face bad , on ne voit plus qu'un seul rayon réfracté, dirigé normalement à cette face, c'est-à-dire parallèlement à l'axe cristallographique. Cette direction privilégiée se distingue donc par l'absence de bifurcation; elle constitue ce qu'on nomme l'*axe optique* du cristal. Brewster a démontré que cet *axe optique* est parallèle, dans tous les cristaux, à l'*axe cristallographique*.

Il est important de remarquer que l'*axe optique* n'est pas une droite fixe dans le cristal, mais une *direction*; de sorte qu'il y a une foule de rayons, parallèles entre eux, pouvant passer *suivant l'axe*. Cela se conçoit bien, la marche des rayons dépendant de l'arrangement des molécules, qui se répète de la même manière sur toutes les droites parallèles entre elles.

2932. Rayons réfractés dans un plan perpendiculaire à l'axe. —

Si l'on taille dans un cristal, un prisme dont les arêtes soient parallèles à l'axe, un rayon lumineux quelconque perpendiculaire aux arêtes de ce prisme, donnera deux rayons réfractés dans le plan d'incidence, et obéissant à la loi des sinus. Il y a donc, dans ce cas, un indice de réfraction pour le rayon extraordinaire, comme pour le rayon ordinaire. Ce résultat pouvait se prévoir, car le plan d'incidence forme une section droite dans laquelle la densité de l'éther étant constante, la vitesse de la lumière doit être la même dans toutes directions. On voit aussi que, si le rayon incident est perpendiculaire à la face d'entrée, il n'y aura pas de déviation, et les deux rayons réfractés se réuniront en un seul.

D'après Malus, les indices ordinaire, n_o , et extraordinaire, n_e , du *spath d'Islande* sont, pour les rayons jaunes, $n_o = 1,654295$, et $n_e = 1,483301$; et ceux du cristal de roche, d'après Biot, $n_o = 1,547897$, $n_e = 1,557106$.

2933. Cristaux positifs ou négatifs. — Dans le *spath d'Islande*, l'indice de réfraction du rayon extraordinaire est plus petit que celui du rayon ordinaire. C'est le contraire dans le cristal de roche. Nous avons vu que, dans le *système de l'émission*, on attribue la réfraction à l'attraction du milieu réfringent sur les particules lumineuses (2862). C'est pourquoi Biot, qui a découvert cette distinction, avait appelé *attractifs* les cristaux dans lesquels le rayon *extraordinaire*, que l'on considère particulièrement, est le plus dévié, et *répulsifs* ceux qui sont dans le cas contraire. Dans le *système des ondulations*, la réfraction étant produite par une diminution de la vitesse de la lumière dans le milieu le plus réfringent (2843), Fresnel a désigné sous le nom de *cristaux positifs*, les cristaux *attractifs*, dont l'indice extraordinaire est le plus grand, parce que la différence entre les vitesses du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire est positive; et sous le nom de *cristaux négatifs*, les cristaux *répulsifs*, dans lesquels cette différence est négative. — Dans les cristaux *négatifs*, les molécules sont plus rapprochées suivant la direction de l'axe que dans une même section droite; on peut comparer leur structure à celle d'un prisme droit comprimé par ses deux bases; l'axe optique serait celui du prisme. Dans les cristaux *positifs*, au contraire, les molécules sont plus écartées dans le sens de l'axe que dans la section droite. — Le verre comprimé, dans l'expérience de Fresnel (2929) est *positif*, et le verre trempé, *négatif*.

2934. Caractères des cristaux positifs et négatifs. — Pour reconnaître si un cristal est positif ou négatif, il faut savoir distinguer le rayon ordinaire du rayon extraordinaire. C'est ce que l'on peut faire par la méthode suivante, due à Soleil. On colle bout à bout, par leur base triangulaire, deux prismes de la substance à étudier, de manière que les arêtes soient sur le prolongement les unes des autres. Ordinairement, ces deux prismes sont appliqués sur un prisme de verre de longueur égale à la somme de leurs longueurs, de manière que l'ensemble forme un prisme à section rectangulaire. L'un des prismes à essayer doit avoir une de ses faces perpendiculaire à l'axe. On regarde à travers cette face une mire parallèle aux arêtes; en plaçant l'œil à la jonction des deux prismes. On voit alors, dans l'un des prismes, une image simple, tandis

que dans l'autre on en voit deux. Celle qui est sur le prolongement de l'image unique du premier prisme est évidemment l'image ordinaire; l'autre est l'image extraordinaire, et sa position par rapport à l'arête de sommet du prisme, indique le signe de la substance. — Nous ferons connaître dans le chapitre suivant, des propriétés particulières aux deux rayons réfractés, qui permettent de les distinguer facilement (3004).

On a fait diverses remarques sur certains caractères physiques des cristaux positifs ou négatifs. Dans les cristaux *négatifs*, comme le spath d'Islande, la dilatation est la plus grande dans le sens du plus petit axe d'élasticité; c'est le contraire dans les cristaux positifs. Babinet a remarqué que, le plus souvent, le rayon ordinaire est plus absorbé que l'autre dans les cristaux négatifs, et que c'est le contraire pour les cristaux positifs. De Senarmont a reconnu, dans ses *Études sur la conductibilité calorifique des cristaux* (II, 969), que les seuls exemples d'ellipsoïdes thermiques aplatis se trouvent dans les cristaux négatifs, et les ellipsoïdes allongés, dans les cristaux positifs.

Nous rappellerons enfin que l'axe des cristaux positifs est attiré par les aimants, tandis que celui des cristaux négatifs est repoussé (III, 2385).

Voici la liste des principaux cristaux à un axe, *positifs* ou *négatifs* :

Cristaux attractifs ou positifs.

Zircon.	Appophyllite.	Glace.
Quartz.	Sulfate de potasse.	Hyposulfate de chaux.
Tungstate de zinc.	Suracétate de cuivre et chaux.	Diopase.
Stannite.	Hydrate de magnésic.	Argent rouge.
Boracite.		

Cristaux répulsifs ou négatifs.

Spath d'Islande.	Apatite.	Sous-phosphate de potasse.
Carbonate de chaux et magnésic.	Idocrase.	Sulfate de nickel et cuivre.
Carbonate de chaux et fer.	Vernerite.	Cinabre.
Tourmaline.	Mica.	Mellite.
Rubellite.	Phosphate de plomb.	Molybdate de plomb.
Corindon.	Phosphate de plomb arséniaté.	Octohédrite.
Saphir.	Hydrate de strontiane.	Phosphate de chaux.
Rubis.	Arséniaté de potasse.	Arséniaté de plomb.
Émeraude.	Chlorure de calcium.	Arséniaté de cuivre.
Chlorure de calcium.	Chlorure de strontium.	Népheline.
Béryl.		

2935. LOIS DE LA DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN AXE. — Ces lois, relatives au rayon extraordinaire, sont destinées à en faire connaître la direction, quand on donne celle du rayon incident et la position de l'axe dans l'intérieur du cristal. C'est Huyghens qui les a découvertes. D'abord peu remarquées et repoussées pendant plus d'un siècle après que Newton les eut rejetées, elles ont été remises en lumière par les expériences de Wollaston et de Malus. Huyghens paraît y avoir été conduit par l'analogie, après avoir construit les rayons réfractés, dans divers cas particuliers que nous allons d'abord considérer.

1° **Plan d'incidence perpendiculaire à l'axe.** — Dans ce cas, les deux

rayons suivent les lois de Descartes, et l'on en obtient la direction au moyen de la construction qui nous a servi pour la réfraction simple (2488). Ainsi, II (fig. 2034) étant l'intersection de la surface d'incidence avec le plan d'incidence,

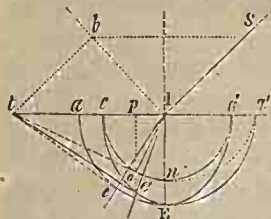


Fig. 2034.

nous décrirons, dans ce dernier plan, des circonférences avec des rayons égaux à $1 : n_o$ et $1 : n_e$, en appelant n_o et n_e les indices ordinaire et extraordinaire; nous construirons le point t , tel que tb , égal à l'unité, soit parallèle au rayon incident sl , auquel lb est perpendiculaire, et par ce point t nous mènerons les tangentes te , to , à ces circonférences, et les rayons réfractés seront le et lo . Si le cristal est négatif, on a $n_o > n_e$, et le est le rayon extraordinaire; il est plus écarté de la normale que le rayon ordinaire.

2^o Rayon incident dans une section principale quelconque. — Dans ce cas, les deux rayons réfractés sont encore dans le plan d'incidence. Soit AA' (fig. 2035) une parallèle à l'axe; cette droite sera dans le plan d'incidence, que nous prenons pour plan de la figure. Décrivons, du point I comme centre, une circonférence avec un rayon égal à $1 : n_o$, prenons sur IE , perpendiculaire à AA' , une longueur IE égale à $1 : n_e$, et construisons une ellipse ayant pour demi-axes IA et IE . Le point de contact e de la tangente menée à l'ellipse par le point t , fera connaître le rayon extraordinaire le .

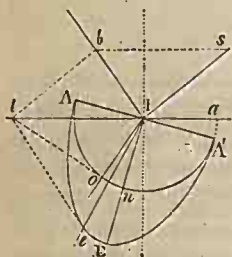


Fig. 2035.

Si la face d'incidence at était perpendiculaire à l'axe AA' , la droite IE se confondrait avec It ; et, dans le cas d'un rayon incident normal, les deux rayons se confondraient en un seul dirigé suivant l'axe.

Si la face d'incidence est parallèle à l'axe, IE sera perpendiculaire à at , et l'ellipse sera cEd (fig. 2034). — Les points de contact e' et o étant, d'après les propriétés de l'ellipse, sur la même perpendiculaire $e'p$ à It , le rayon extraordinaire, en supposant toujours le cristal négatif, sera moins écarté de la normale que le rayon ordinaire. C'est le contraire de ce qui a lieu quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe;

car le rayon extraordinaire est alors le .

On peut déduire de la construction précédente, la loi analytique qui détermine, dans ce cas, la position du rayon extraordinaire. Soient r_o et r_e les angles de réfraction ordinaire et extraordinaire, les triangles poI , $pe'I$ (fig. 2034) donnent $pl = \overline{op} \cdot \text{tang } r_o$, et $pl = \overline{e'p} \cdot \text{tang } r_e$; d'où $\text{tang } r_e : \text{tang } r_o = \overline{op} : \overline{e'p} = n_e : n_o$.

Remplaçant $\text{tang } r_o$ par sa valeur en fonction de $\sin r_o$; et $\sin r_o$ par $\frac{\sin i}{n_o}$, il vient

enfin, $\text{tang } r_e = \frac{n_e \sin i}{n_o \sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}}$. On voit que, si i est nul, ce qui a lieu quand,

le rayon incident est normal, on a $\text{tang } r_e = 0$; les deux rayons réfractés sont donc perpendiculaires à l'axe. Cela se voit sur la figure 2034 : le point t est alors à l'infini, et les points de contact des deux tangentes sont n et E . Nous verrons (2938) que les deux rayons superposés sont cependant distincts l'un de l'autre.

Si le cristal était positif, on aurait $n_e > n_o$; $IE = 1 : n_e$ (fig. 2034) correspondrait alors au rayon extraordinaire, $Ia' = 1 : n_o$ au rayon ordinaire, et l'ellipse $a'n$ aurait pour demi-axes Ia' et In . On voit que le rayon qui se rapproche le plus de la normale, dans la section perpendiculaire à l'axe, est celui qui s'en rapproche le moins dans la section qui contient l'axe.

2936. 3^e Cas général de la construction d'Huyghens. — Considérons enfin le cas où la face et le plan d'incidence ont des directions quelconques par rapport à l'axe. Soient MN (fig. 2036) la face du cristal, ta l'intersection de cette face avec le plan d'incidence du rayon sI . Menons par le point I une parallèle AA' à l'axe du cristal, et construisons une ellipse ayant pour demi-axes $IA = 1 : n_o$ et $IE = 1 : n_e$. Si nous faisons tourner cette ellipse autour de AA' , elle engendrera un ellipsoïde de révolution. Menons par le point t , toujours obtenu de la même manière, et dans la face d'incidence MN , une droite tx , perpendiculaire au plan d'incidence, et enfin, par cette droite, un plan tangent à l'ellipsoïde; le point de contact e fera connaître le rayon extraordinaire Ie . Le rayon ordinaire serait donné par le plan tangent à une sphère de rayon IA , plan dont le point de contact o sera toujours dans le plan d'incidence.

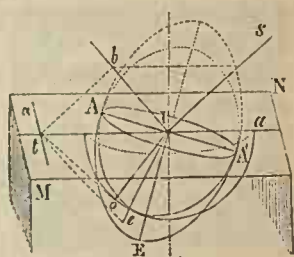


Fig. 2036.

Il est facile de passer de cette construction générale aux cas particuliers. Par exemple, si le plan d'incidence contient l'axe, l'intersection de l'ellipsoïde par ce plan n'est autre chose que l'ellipse génératrice, et le point de contact est nécessairement sur cette ellipse, puisque tx est perpendiculaire à son plan. — Si l'axe est parallèle à la face du cristal et perpendiculaire au plan d'incidence, ce dernier coupe l'ellipsoïde suivant son équateur, qui est la circonférence de rayon $1 : n_e$.

Telle est la construction remarquable d'Huyghens. Quand on veut en faire l'application, on détermine l'angle du plan de réfraction du rayon extraordinaire avec le plan d'incidence, et l'angle de ce rayon avec la normale, soit par les méthodes de la géométrie descriptive, soit par celles de la géométrie analytique à trois dimensions.

2937. Vérifications expérimentales. — Huyghens a fait beaucoup d'expériences pour établir l'exactitude de la construction qui précède. Elle a été ensuite vérifiée par Wollaston, Malus, etc., qui ont trouvé moyen de déterminer par l'expérience la position des rayons réfractés.

1° **Méthode de Malus.** — On trace sur une lame d'ivoire bien horizontale, un triangle *rectangle* très-allongé ABC (fig. 2037), dont les côtés portent une division très-fine, et l'on pose sur ce triangle une lame épaisse à faces parallèles, d'un cristal, par exemple positif. On aperçoit alors deux images *abc*, *a'b'c'*. L'hypothénuse de l'image ordinaire *abc* paraît couper en *n* le côté *a'c'* de l'image extraordinaire, et les distances *an* et *a'n* sont connues par les divisions tracées sur les côtés. Si nous prenons $Ae \equiv an$ et $Ao \equiv a'n$, nous aurons sur le triangle réel les deux points *o* et *e*, dont les images se confondent en *n* : l'une, celle de *o*, formée par le rayon ordinaire qui part de ce point; l'autre, celle de *e*, par le rayon extraordinaire qui en part. Ces deux rayons se confondent en un même rayon émergent *II*. On conclut de là que, si un rayon incident tombait sur le cristal suivant *II*, il donnerait les rayons réfractés *Io* et *Ie*. Les positions de

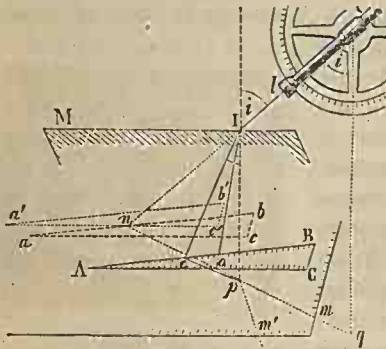


Fig. 2037.

chacun de ces rayons se déterminent facilement quand on connaît l'épaisseur *E* de la lame et la position du point *p*, projection du point d'incidence *I*. Supposons ce dernier point connu, et menons *pe*; l'angle *epo* est l'angle du plan de réfraction extraordinaire avec le plan d'incidence, et les angles *olp*, *eIp* des rayons *Io* et *Ie* avec la normale sont donnés par la relation

$$\text{tang } eIp = \frac{ep}{E}; \text{ tang } oIp = \frac{op}{E}.$$

Voici maintenant comment on obtient le point *p*. On tend en *I*, sur la surface supérieure du cristal, deux fils très-fins croisés à angle droit, et l'on vise le point de croisement avec une lunette à réticule *l*, mobile sur un limbe vertical; le point *n* paraît alors coïncider avec le point de croisement *I* des fils, et l'on mesure la distance *D* de ce point à la verticale qui passe par le centre du limbe, verticale qui rencontre le plan horizontal ABC au point *q*. On vise ensuite un point *m* d'une division finement tracée sur le bord de la table sur laquelle sont posés la lame d'ivoire et le cristal. Si l'on joint ce point *m* au point *o*, on a la trace du plan d'incidence, le rayon ordinaire *Io* se trouvant toujours dans le plan d'incidence, et l'on prend sur *qo* une longueur *qp* égale à *D*, ce qui donne le point *p*.

Quant à la direction du rayon incident, elle est donnée par celle du plan d'incidence, dont la trace est *mp*, et par l'angle d'incidence *i*, égal à celui que fait la lunette avec la verticale. Il reste à comparer cette direction à celle de l'axe du cristal; axe dont la position est connue, d'après la manière dont la lame a été taillée, par l'angle qu'il fait avec les faces parallèles et avec un côté d'une de ces faces.

2^o Méthodes de M. P. Desains ¹. — Le cristal à faces parallèles est enchâssé dans un anneau vertical pouvant tourner sur lui-même, et mobile autour d'un axe vertical passant par la face d'incidence. Sur la face de sortie, est appliqué, par le côté gravé, un micromètre sur verre. On fait tomber sur ce micromètre l'image réelle d'un second micromètre, formée par un objectif et qui est dédoublée par le cristal. Sur la face de sortie de celui-ci, on voit les points d'émergence des deux rayons ordinaire et extraordinaire, provenant d'un rayon incident qui passe par une division choisie du micromètre dont on a les deux images. On peut aussi, au moyen d'une seconde lentille, projeter sur un écran ces deux images avec celle du micromètre appuyé sur la face de sortie du cristal.

M. Desains a donné, en outre, une vérification d'ensemble de la loi d'Huyghens par les expériences suivantes. On fait tomber sur la surface d'un cristal uniaxe à faces parallèles, une mince nappe de lumière en forme de cône droit dont le sommet touche la face d'entrée, à laquelle l'axe du cône est perpendiculaire. On obtient une semblable nappe au moyen de

rayons parallèles traversant une lentille très-convergente recouverte d'un diaphragme présentant une fente circulaire et un petit orifice central; la face d'entrée de la plaque est placée au foyer principal de cette lentille. Les rayons qui se croisent au sommet du cône se divisent dans la plaque en donnant deux nappes : l'une, formée par les rayons ordinaires, et coupant la face de sortie suivant un cercle; l'autre, par les rayons extraordinaires, coupant la même face suivant une ellipse (fig. 2038). Les fais-

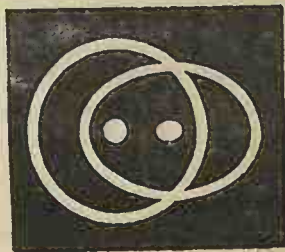


Fig. 2038.

ceaux provenant de celui qui a traversé le trou central du diaphragme, forment des taches arrondies dans l'intérieur des courbes.

Pour donner de grandes dimensions à ces courbes, on place, après la face de sortie, une lentille convergente dont l'axe coïncide avec celui de la nappe conique incidente, et l'on installe à une distance p , un écran blanc sur lequel se peignent les images de sections faites dans les nappes lumineuses, à une distance p' de la lentille donnée par la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$.

Si les faces de la plaque sont perpendiculaires à son axe optique, les deux courbes sont des circonférences concentriques. Si les faces sont parallèles à l'axe, on a une circonférence et une ellipse ayant le même centre.

M. Desains a calculé, dans les divers cas, l'équation de la courbe d'intersection de la nappe extraordinaire avec l'écran, et a trouvé des résultats d'accord avec ceux qu'on déduit de la loi d'Huyghens. Quand l'écran est suffisamment éloigné de la lentille, la courbe est sensiblement une ellipse.

¹ Leçons de physique, par M. P. Desains, t. II, pp. 429, 430.

3° Nous avons vu (2553) comment M. F. Bernard mesure les indices de réfraction, au moyen du déplacement d'un rayon dans une plaque à faces parallèles. M. Billet a appliqué cette méthode à la vérification de la loi de la double réfraction, en se servant de lames biréfringentes. M. F. Bernard a fait quelques expériences par ce moyen, et a trouvé des résultats très-concordants avec ceux que donnent les formules de M. Billet¹.

Citons encore les expériences remarquables de M. Abria². La matière biréfringente est taillée en forme de prisme dont les arêtes ont une direction quelconque par rapport à l'axe cristallographique. Un rayon traverse ce prisme, que l'on tourne de manière à avoir le *minimum* de déviation pour la raie D du rayon ordinaire; l'angle de réfraction est alors égal à la moitié de l'angle du prisme. On mesure ensuite, au moyen d'un goniomètre très-précis, l'angle que font entre eux les rayons ordinaire et extraordinaire émergents, et l'on compare cet angle à celui que donnent les formules déduites des lois d'Huyghens. M. Abria a établi ces formules et a fait de nombreuses expériences sur le spath d'Islande et le quartz, qui lui ont donné des résultats concordants avec ceux qu'il a calculés au moyen des formules, malgré la complication de celles-ci et les erreurs de mesure inévitables dans des observations aussi délicates.

2938. Interprétation théorique de la construction d'Huyghens. — Nous avons vu que dans la construction qui donne le rayon réfracté (2840), la circonférence décrite avec le rayon $1 : n$ représente un grand cercle d'une sphère qui est la surface de l'onde réfractée. Il en est de même de la circonférence de rayon $1 : n_e$, qui donne le rayon extraordinaire, quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe. L'analogie porte à admettre que la surface de l'ellipsoïde de révolution qui sert à trouver ce rayon dans les autres cas, représente aussi la surface de l'onde extraordinaire, surface qui n'est plus sphérique, à cause du défaut de symétrie dans la distribution de l'éther autour du rayon réfracté, et est *allongée* ou *aplatie* dans le sens de l'axe de révolution, suivant que le cristal est *négatif* ou *positif*. C'est, en effet, ce que Huyghens a cherché à démontrer, et ce qui résulte de la belle théorie de la double réfraction établie par Fresnel. Mais ce n'est qu'après avoir fait connaître, dans le chapitre suivant, le sens des vibrations de l'éther par rapport à la direction du rayon, que nous pourrons montrer comment cette théorie permet de déterminer la surface de l'onde. — La forme de cette surface conduit à l'énoncé très-simple qui suit, des lois qui régissent le rayon extraordinaire.

Vitesse du rayon extraordinaire. — Si nous supposons un ellipsoïde de révolution autour de l'axe du cristal, et ayant pour demi-axe polaire $1 : n_e$, et pour rayon équatorial $1 : n_o$, la vitesse de la lumière dans le rayon extraordinaire sera proportionnelle au demi-diamètre de l'ellipsoïde parallèle à sa direction. La longueur de ce demi-diamètre se déterminera par les méthodes analy-

¹ *Traité d'optique physique*, par P. Billet, t. I, p. 311.

² *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. I, p. 289.

tiques, ou par celle de la géométrie descriptive, après qu'on aura trouvé la direction du rayon extraordinaire. Remarquons que ce rayon, qui marche en ligne droite, comme le rayon ordinaire, n'est plus, en général, normal à la surface de l'onde.

Il résulte de ce qui précède que, dans le plan perpendiculaire à l'axe, la vitesse du rayon extraordinaire est la plus grande des deux, pour les cristaux négatifs, puisque l'on a $1 : n_o < 1 : n_e$; et qu'elle est la plus petite pour les cristaux positifs, l'ellipsoïde étant alors aplati, et la différence de vitesse des deux rayons atteint alors son maximum. On voit aussi que, dans le cas où les deux rayons coïncident en marchant parallèlement à l'axe, leur vitesse est la même; tandis que, dans le cas du rayon incident normal à l'axe et à la face d'incidence, les deux rayons réfractés, quoique parcourant la même route, sont encore distincts. En effet, la vitesse de la lumière, dans le rayon ordinaire, est représentée par In (fig. 2034), et dans le rayon extraordinaire par IE , quand le cristal est positif. IE est aussi le maximum de vitesse de ce dernier rayon. — Ce serait le minimum si le cristal était négatif, car alors IE représenterait la vitesse dans le rayon ordinaire, et In celle du rayon extraordinaire.

Ces derniers résultats se déduisent également de la formule de Fresnel :

$$v^2 = u^2 + (u'^2 - u^2) \sin^2 a,$$

qui donne la vitesse du rayon extraordinaire en fonction de l'angle, a , qu'il fait avec l'axe, et dans laquelle u et u' représentent les quantités $1 : n_o$ et $1 : n_e$. Cette formule exprime que la différence des carrés des vitesses ordinaires et extraordinaires est en raison inverse du carré du sinus de l'angle que fait le rayon extraordinaire avec l'axe; car u est la vitesse constante du rayon ordinaire, et u' la valeur, maximum ou minimum, de celle du rayon extraordinaire. Si $u' = u$, on a $v = u$; ce qui a lieu pour un corps homogène.

Si le rayon est dirigé suivant l'axe, on a $a = 0$, et $v^2 = u^2$. La vitesse est donc égale à celle du rayon ordinaire. Si $a = 90^\circ$, il vient $v^2 = u'^2$.

On voit aussi que, dans les cristaux négatifs, pour lesquels on a $n_o > n_e$, et par conséquent $u < u'$, le coefficient de $\sin^2 a$ étant négatif, v est plus petit que u ; c'est donc quand $a = 0$, c'est-à-dire quand le rayon est parallèle à l'axe optique, que sa vitesse est minimum. C'est l'inverse pour les cristaux positifs, comme la construction d'Iluyghens nous l'a déjà appris.

2939. ÉMERGENCE DU RAYON EXTRAORDINAIRE. — Nous n'avons considéré, jusqu'à présent, que les rayons qui pénètrent dans le milieu cristallisé. Voyons maintenant quelle marche ils suivront quand ils en sortiront pour passer dans un milieu homogène. Il n'y a à considérer que le rayon extraordinaire, car le rayon ordinaire se comportant comme s'il traversait un milieu homogène, on peut lui appliquer tout ce qui a été dit dans le cas de la réfraction simple (2479).

Rayon extraordinaire. — Ce rayon s'obtient au moyen de l'ellipsoïde d'Iluyghens, en faisant les constructions dans un autre ordre. Supposons que

eI (fig. 2036) soit un rayon extraordinaire se présentant à la face d'émergence MN. Après avoir construit l'ellipsoïde de révolution autour de la parallèle AA' à l'axe du cristal, on mènera par le point e où le rayon perce sa surface, un plan tangent qui coupera la face d'émergence MN suivant la droite xt . Menant par le point I un plan perpendiculaire à xt , on aura le plan d'émergence. Si maintenant on connaissait le point b , il serait facile d'obtenir le rayon émergent Is. Or, l'angle Ibt étant droit, et la longueur tb égale à l'unité, on décrira sur ti comme diamètre une demi-circonférence, on prendra la corde tb égale à l'unité; puis, menant par I une parallèle à tb , on aura le rayon émergent Is. Le plan tangent mené par xt à la sphère de rayon AI, donnerait le rayon ordinaire oI , que nous appellerons le *rayon correspondant* au rayon extraordinaire eI .

On voit que ces deux rayons correspondants sont caractérisés par la condition de ne donner qu'un seul rayon émergent. Il est cependant un cas où ils en donnent deux : c'est celui où ils sont réunis en un seul marchant suivant la perpendiculaire à l'axe du cristal, quand la face d'émergence est oblique à leur direction commune. Soit, en effet, EI (fig. 2035) le rayon, qui se présente au point I de la surface d'émergence ta . Pour appliquer la construction précédente, il faudra, par les points E et n , mener des tangentes à l'ellipse et à la circonférence. Ces deux tangentes, étant parallèles, donneront deux points, t , différents, et la construction du point b conduira à deux rayons émergents. Ce résultat n'a rien qui doive surprendre, les deux rayons qui marchent suivant EI rencontrant la surface d'émergence sous le même angle, et possédant des vitesses différentes qui sont entre elles comme IE : In.

Angle limite. — Si l'angle que fait le rayon sI avec la normale est droit, la distance It (fig. 2036) sera égale à l'unité, et le plan tangent mené par tx à l'ellipsoïde donnera la direction du dernier rayon, qui, arrivant de l'intérieur du cristal à la face MN, pourra émerger dans le plan sIt . Tout rayon qui s'écarterait davantage de la normale ne pourrait émerger. Il résulte de là que, si l'on décrit du point I comme centre, et dans le plan MN, une circonférence avec un rayon égal à 1, et, si l'on mène par toutes les tangentes à cette circonférence des plans tangents à l'ellipsoïde, la série des points de contact formera sur l'ellipsoïde, la directrice d'un cône ayant son sommet en I, et dans lequel seront compris tous les rayons pouvant émerger. — La même construction, appliquée au rayon ordinaire, donnerait évidemment un cône droit ayant pour axe la normale.

29.10. Passage des rayons d'un cristal dans un autre. — Quand les rayons qui ont traversé un cristal uniaxe émergent dans un autre cristal uniaxe, le rayon ordinaire se comporte, quant aux directions des rayons réfractés, comme un rayon qui viendrait d'un milieu homogène.

Le rayon extraordinaire se bifurque en deux rayons, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire. Mais l'expérience montre que ces rayons n'ont pas les directions qui correspondent au rayon extraordinaire qui se présente à l'émergence; ils ont les directions qui correspondent au *rayon ordinaire correspondant* à ce

dernier rayon, que l'on peut toujours construire, par le procédé indiqué ci-dessus (2939). — Ce qui précède s'applique aux rayons ordinaire ou extraordinaire, se réfléchissant à la surface d'émergence, en dedans du cristal. Chacun d'eux se comporte comme s'il venait du dehors, dans une direction symétrique au rayon intérieur incident. Il faudra donc, dans le cas du rayon extraordinaire, construire le rayon symétrique, puis le *rayon ordinaire correspondant* de ce dernier, et appliquer à ce dernier la construction d'Huyghens.

II. Micromètre à double image de Rochon.

2941. Double prisme de Rochon. — Rochon a fait une heureuse application de la double réfraction, à la mesure des diamètres apparents des objets éloignés, et par conséquent à l'évaluation de leur distance, quand on connaît leur grandeur absolue.

Considérons deux prismes rectangulaires égaux, en cristal de roche, soudés l'un à l'autre au moyen de térébenthine, de manière à former un parallépipède rectangle (*fig. 2038 bis*). La face AB de l'un de ces prismes, ACD, est perpendiculaire à l'axe du cristal; tandis que les arêtes de l'autre prisme, ABC, sont parallèles à cet axe. Un rayon *sm* entrant normalement à la face AB, ne sera ni dévié ni bifurqué, tant qu'il restera dans le prisme ABC; mais arrivé en I, il se bifurquera. Le rayon ordinaire continuera de marcher en ligne droite suivant *Io*, puisque l'indice de réfraction qui lui correspond reste le même; tandis que le rayon extraordinaire sera dévié suivant *Ine*, en se rapprochant de la normale à AC. L'angle *eco* ou *enn'* des deux rayons *Io*, *ne*, se nomme l'*angle de duplication*. Cherchons-en la valeur en fonction de l'angle $a = \angle ACD$, et des indices de réfraction ordinaire n_o , et extraordinaire n_e .

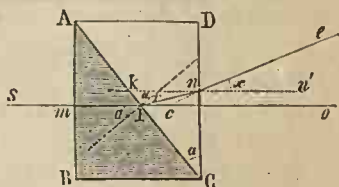


Fig. 2038 bis.

Calcul de l'angle de duplication. — Cet angle, x , est égal à l'angle d'émergence enn' , et l'on a $\sin x = n_e \sin knI$. Menons en I la normale à AC, nous aurons $knI = a - r$, et par conséquent, $\sin x = n_e \sin (a - r)$. Pour obtenir r , remarquons que le rayon *sl* se réfracte en I, en passant d'un milieu où son indice est n_o , dans le second prisme où son indice est n_e . On a donc $\sin a : \sin r = n_e : n_o$, d'où l'on tirera la valeur de r . La valeur de x augmente avec l'angle a , mais elle est toujours très-petite, n_o et n_e différant peu dans le cristal de roche (2932). Elle n'est que de $57' 40''$ pour $a = 60^\circ$, et de $19' 30''$ pour $a = 30^\circ$.

2942. Lunette de Rochon. — Le double prisme est installé dans l'intérieur d'une lunette astronomique, la face AB (*fig. 2038*) tournée du côté

de l'objectif o (*fig.* 2039), et perpendiculaire à l'axe de l'instrument, le long duquel le prisme peut se déplacer. Il se forme alors deux images focales d'un objet éloigné; l'image ordinaire ab , qui se construit comme si le prisme n'existait pas, et l'image extraordinaire bc . Ces images sont d'autant plus écartées l'une de l'autre, que le prisme est plus éloigné du lieu qu'elles occupent, puisque l'angle de duplication reste constant. De plus, elles peuvent être considérées comme égales, parce que cet angle est très-petit. On fait en sorte, en déplaçant le prisme le long de l'axe, que les deux images soient tangentes l'une à l'autre. Alors l'angle clb est égal à x , et le triangle clb donne $\text{tang } x = cb : lb = h : d$, en désignant par h la hauteur de l'image, et par d sa distance au prisme AB. Le triangle boa donne approximativement $\text{tang } \delta = h : oa = h : F$, en appelant F la distance focale principale de l'objectif. Remplaçant h par sa valeur tirée de $\text{tang } x = h : d$, il vient $\text{tang } \delta = \frac{\text{tang } x}{F} d$, formule qui montre que la tangente du diamètre apparent est proportionnelle à la distance d du prisme,

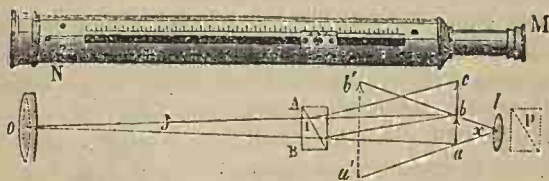


Fig. 2039.

au foyer principal de l'objectif; car $(\text{tang } x : F)$ est constant. L'oculaire au moyen duquel on observe la double image, ne change rien aux résultats, et il permet d'établir le contact des deux images avec une grande précision.

Soit H la hauteur absolue de l'objet éloigné, et D sa distance à l'objectif, on a $\text{tang } \delta = H : D$, valeur qui, égale à la précédente, donne

$$\text{tang } \delta = \frac{H}{D} = \frac{\text{tang } x}{F} d, \quad \text{ou} \quad \frac{H}{D} = kd; \quad [1]$$

en désignant par k la quantité constante $(\text{tang } x : F)$. Au lieu de calculer cette constante, on la détermine directement, en visant un objet dont la hauteur H et la distance D sont connues. La formule [1] donne ensuite la valeur de D quand on connaît H , ou celle de H quand on connaît D .

On voit en NM (*fig.* 2039) l'ensemble de l'instrument, nommé *micromètre à double image*, ou *lunette de Rochon*. On y distingue un bouton, au moyen duquel on fait glisser le prisme dans le tube. La tige qui réunit le bouton au prisme passe par une fente dont le bord divisé sert à mesurer la distance du prisme au foyer de l'objectif. Un vernier, qui se meut avec le bouton, est au zéro de cette division quand, le prisme étant au foyer, les deux images se

confondent. Pour éviter les calculs, les nombres inscrits auprès de la division n'expriment pas les distances d , mais les valeurs de kd ; de sorte qu'on a $\text{tang } \delta$ par une simple lecture; et en divisant par le nombre inscrit, la hauteur H , supposée connue, d'un objet, on a sa distance D . — Pour les usages de la guerre, on prend pour H la hauteur moyenne d'un fantassin, et l'on inscrit les valeurs de $H : kd$; de sorte qu'on a la distance approchée, par une simple lecture.

2943. Modification d'Arago. — Quand on veut appliquer la lunette de Rochon à la mesure du diamètre angulaire des astres, particulièrement du soleil ou de la lune, il est difficile d'établir exactement le contact entre les deux images, à cause des franges irisées qui bordent l'image extraordinaire dans le voisinage même du point de contact. Pour obvier à cet inconvénient, Arago emploie une lunette *polyalle* (2810), munie d'un oculaire à grossissement variable. Le double prisme se place alors en dehors, en P (fig. 2039), entre l'oculaire et l'œil, de manière que la dispersion soit insensible. Il n'y a plus qu'une seule image focale, ab , et les deux images virtuelles que l'on aperçoit à travers le prisme ne sont pas, en général, en contact; mais on les y amène en faisant varier le grossissement. Quand cette condition est remplie, le diamètre apparent x de l'image virtuelle $a'b'$ vue à travers l'oculaire, est égal à l'angle de duplication x , puisque le rayon qui passe par le bord inférieur de l'image supérieure $a'b'$, passe également par le bord supérieur de l'image virtuelle inférieure. Cela suppose l'œil placé au centre optique de la lentille l , ce qui est sensiblement vrai, l'angle x étant très-petit. Or, en appelant f la distance focale principale de l'oculaire, on a $\text{tang } x = ab : f$. On a aussi $\text{tang } \delta = ab : F$; d'où $F : f = \text{tang } x : \text{tang } \delta$. Or $F : f$ n'est autre chose que le grossissement G de la lunette (2805); on a donc $G \cdot \text{tang } \delta = \text{tang } x$. Le grossissement G , correspondant à chaque position du verre mobile, est mesuré d'avance et indiqué par une échelle gravée sur le côté du tube oculaire. Comme le déplacement de ce verre est peu étendu, on a plusieurs prismes correspondant à différentes valeurs de x , et l'on emploie celui qui donne la plus petite, quand on veut évaluer de grands diamètres apparents.

2944. Mesure du grossissement des lunettes. — Arago a appliqué le double prisme à la mesure du grossissement des lunettes. Il suffit, en effet, pour connaître ce grossissement, de viser un disque qu'on fait éloigner peu à peu jusqu'à ce que les deux images soient en contact. Connaissant la distance et la grandeur du disque, la formule $G \text{ tang } \delta = \text{tang } x$, ou $G \frac{H}{D} = \text{tang } x$, donne $G = \frac{D}{H} \text{ tang } x$. — Au lieu de calculer $\text{tang } x$, on l'évalue directement en regardant le disque à travers le prisme seul, et s'éloignant jusqu'à ce que les deux images paraissent en contact. On a alors $\text{tang } x = H : D$. Ce procédé de mesure du grossissement peut s'appliquer aux microscopes, en plaçant un micromètre sur le porte-objet.

§ 2. — CRISTAUX A DEUX AXES.

2945. Il n'y a pas de rayon ordinaire. — Les propriétés des cristaux dits à deux axes, ont été découvertes par Brewster. Ces cristaux ne présentent de symétrie, ni autour d'un point, ni autour d'un axe. Ils produisent la double réfraction ; mais, en général, aucun des deux rayons ne suit la loi de Descartes. On avait cru d'abord qu'il y avait un *rayon ordinaire*, mais Fresnel a prouvé qu'il n'en est pas ainsi¹, entre autres par le moyen suivant. Il sépara d'une topaze, plusieurs morceaux dans divers sens, les colla les uns aux autres par des faces planes, et tailla en prisme la masse ainsi obtenue. Une ligne droite vue à travers ce prisme donna deux images en lignes brisées ; l'une d'elles eût été rectiligne, si les rayons qui la produisaient eussent obéi à la loi des sinus.

Fresnel avait d'abord employé un moyen très-délicat, mais moins direct : il tirait d'une même topaze des lames minces dans différentes directions, et leur donnait la même épaisseur en les travaillant ensemble.



Fig. 2040.

Plaçant ensuite deux de ces lames, chacune sur l'une des fentes, dans l'expérience d'Young (2827), il obtenait toujours un déplacement des franges, allant quelquefois à 20 rangs ; d'où il concluait que la lumière traversait les deux lames, avec des vitesses différentes (2840). Or, la vitesse serait constante, si le rayon suivait les lois de Descartes.

Quand le cristal est épais et terminé par deux faces parallèles, il suffit de le poser sur un point marqué sur une feuille de papier, et de le faire tourner sur lui-même ; on voit les deux images se déplacer.

2946. Axes optiques. — Dans les cristaux non symétriques autour d'un axe, il y a deux directions suivant lesquelles le rayon incident passe sans se bifurquer. Ces directions se nomment *axes optiques* du cristal, et c'est pour cela qu'on a donné à ces sortes de cristaux le nom de *biaxes*, ou *cristaux à deux axes*. On ne connaît pas de cristaux à plus de deux axes.

On nomme *ligne moyenne* ou *intermédiaire* une droite qui partage l'angle aigu des deux axes en deux parties égales ; et *ligne supplémentaire*, celle qui divise de même l'angle obtus. Ces deux droites, perpendiculaires l'une à l'autre, sont dans le *plan des axes*. Si nous considérons, en outre, une droite perpendiculaire à ce dernier plan, nous aurons les trois lignes qui portent le nom d'*axes de cristallisation* ou d'*axes d'élasticité* du cristal. Remarquons que ces axes, ainsi que les *axes optiques*, sont des *directions*, et non des lignes uniques.

2947. Sections principales. — Si nous menons par les lignes *moyenne* et *supplémentaire*, des plans perpendiculaires au plan des axes optiques, nous

¹ *Annales de chimie et de physique*, t. XX, p. 337.

aurons les deux *sections principales* du cristal, nommées *section moyenne* et *section supplémentaire*. Voici quelques exemples de la position des axes et des sections principales.

Dans l'*aragonite*, carbonate de chaux cristallisé en prisme droit à base rhombe, pouvant se cliver parallèlement à la base, la ligne moyenne *ii* (*fig. 2040*) est parallèle aux arêtes latérales du prisme, et les axes sont situés dans le plan *ad* qui passe par les grandes diagonales des bases. Une des sections principales est un plan parallèle aux bases, et la seconde, un plan parallèle aux deux petites diagonales des bases.

Dans le *sulfate de chaux*, qui cristallise en prisme droit ayant pour base un parallélogramme dont l'angle aigu est de $66^{\circ} 52'$, et qui se clive parallèlement aux bases (*fig. 2041*), le plan des axes est parallèle à ces bases; et, si les côtés du parallélogramme sont dans le rapport de 36 à 13, la grande diagonale *ad* donne la direction de la ligne moyenne; elle fait un angle de $16^{\circ} 13'$ avec le plus grand côté. Les sections principales sont le plan diagonal *a'ad* et le plan perpendiculaire à *abcd*, passant par la ligne supplémentaire *ss*. J. Herschel a reconnu que la direction des axes change un peu avec la couleur des rayons lumineux; mais la ligne moyenne reste toujours la même. — Enfin, M. Soret a constaté que le plan des axes optiques est toujours disposé symétriquement par rapport aux faces du cristal primitif, et que les axes forment des angles égaux avec ces faces.

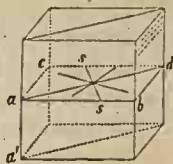


Fig. 2041.

Nous verrons plus tard comment on distingue, au moyen de la *polarisation chromatique*, les cristaux à un axe, des cristaux à deux axes, et comment on peut mesurer l'angle des axes de ces derniers.

2948. Marche des rayons dans les sections principales. — Quand le plan d'incidence se confond avec une des sections principales, les deux rayons réfractés restent dans ce plan, et l'un d'eux obéit à la loi des *sinus*. Celui des rayons qui suit cette loi dans la section moyenne, ne la suit pas dans la section supplémentaire, et *vice versa*. Il y a donc alors, pour chaque rayon, un indice de réfraction, comme pour le rayon extraordinaire des uniaxes. Il est à remarquer que toujours il y a bifurcation dans les sections principales, même quand le rayon est normal à la face d'incidence, si ce n'est quand le rayon passe parallèlement à l'un des axes; mais alors il y a deux rayons émergents quand la face d'émergence est oblique à cet axe.

2949. Forme de la surface de l'onde dans les cristaux à deux axes.

— La théorie d'Huyghens ne peut convenir aux cristaux à deux axes. On avait bien fait quelques essais pour y faire rentrer les phénomènes que produisent ces sortes de cristaux, mais on admettait alors qu'il y avait un rayon ordinaire. Fresnel est parvenu à établir une admirable théorie, dont nous parlerons plus tard (3042), qui comprend à la fois la double réfraction dans les cristaux biaxes et à un axe, et l'explication de la *polarisation* que ces cristaux impriment aux

rayons qui les traversent. Indiquons dès à présent la forme générale de la surface de l'onde, dans le cas des biaxes.

Il résulte de la théorie de Fresnel que la surface de l'onde propagée dans un cristal à deux axes, par un ébranlement arrivant au point d'incidence d'un rayon venant de l'extérieur, est une surface du 4^e degré à 2 nappes, qui correspondent chacune à un des rayons réfractés. Ces deux surfaces, ou nappes, qui ne sont ni des sphères ni des ellipsoïdes, se coupent suivant certaines courbes, par quatre points desquelles passent les axes optiques.

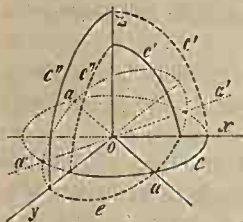


Fig. 2042.

Si xy , xz , yz (fig. 2042) sont trois plans rectangulaires passant par les axes d'élasticité du cristal, ces plans particuliers couperont la surface de l'onde suivant des ellipses et des circonférences. Dans la figure, les courbes pleines c , c' , c'' sont des arcs de cercle, et les courbes pointillées e , e' , e'' , des arcs d'ellipse. La droite aoa' , qui passe par les intersections des arcs e et e' , est un des axes optiques, et $a'oa'$ est l'autre axe; ox est la ligne moyenne, et, par conséquent, oy , la ligne supplémentaire. — Le plan xy est donc le plan des axes, et xz et yz , les deux sections principales.

Les vitesses v , v' des rayons sont données par les formules :

$$\begin{aligned} v^2 &= u^2 + (u'^2 - u^2) \sin^2 \frac{1}{2} (z' - a), \\ v'^2 &= u^2 + (u'^2 - u^2) \sin^2 \frac{1}{2} (a' + a). \end{aligned} \quad [1]$$

Dans lesquelles u et u' représentent l'unité divisée par les indices de réfraction des rayons dans les plans principaux, où ils suivent la loi de Descartes, et a , a' les angles que font ces rayons avec les axes. On déduit de là :

$$v'^2 - v^2 = (u'^2 - u^2) \sin a' \sin a.$$

La différence des carrés des vitesses des deux rayons est donc proportionnelle au produit des sinus des angles qu'ils font avec les deux axes.

Les formules [1] comprennent le cas des cristaux uniaxes, en y faisant $a = a'$, ce qui donne $v^2 = u^2$, et $v'^2 = u^2 + (u'^2 - u^2) \sin^2 a$. La première montre que la vitesse d'un des rayons est constante; la seconde, citée plus haut (2938), correspond au rayon extraordinaire. Alors, les deux nappes de la surface générale de l'onde deviennent, l'une une sphère, l'autre un ellipsoïde de révolution autour de l'axe du cristal. Les deux nappes ne se coupent plus, mais elles se touchent aux extrémités de l'axe (2936).

2950. Structure des biaxes. — La double réfraction dans les cristaux à deux axes est due, comme celle des cristaux à un axe, à l'inégale distance des molécules, et, par conséquent, à l'inégale densité de l'éther dans les différentes

directions. On a remarqué que les cristaux à deux axes se dilatent le plus dans le sens du plus petit axe d'élasticité, ou de la ligne moyenne; ce qui montre que les molécules sont plus rapprochées suivant cette ligne. — Fresnel a trouvé que la chaleur diminue la double réfraction, en tendant à égaliser les distances entre les molécules. Le sulfate de chaux présente à cet égard une particularité curieuse découverte par Brewster : on peut, en l'échauffant, faire que les deux axes se confondent, et former ainsi un cristal uniaxe. Si l'on élève davantage la température, les axes se séparent de nouveau, mais dans un plan perpendiculaire à celui dans lequel ils se trouvaient d'abord; les dilatations inégales dans des directions parallèles aux trois axes d'élasticité ont donc changé les rapports entre ces axes.

La structure des cristaux à deux axes peut être imitée en comprimant un prisme à base carrée, inégalement par les faces latérales opposées; la distance des molécules, constante dans la direction de chaque compression, est différente d'une direction à l'autre. La direction de la plus faible compression donne l'axe de moyenne élasticité, normale au plan des axes optiques, et celle de la plus grande compression donne l'axe de moindre élasticité, c'est-à-dire la ligne moyenne.

MM. Moigno et Soleil ont transformé par la compression, un cristal à un axe en un cristal à deux axes. Un cristal négatif *uniaxe* taillé en prisme droit à base carrée perpendiculaire à l'axe, ayant été comprimé par deux faces latérales opposées, présenta certains phénomènes de coloration propres aux biaxes, comme nous le verrons plus loin. Le plan des axes était perpendiculaire au sens de la compression, qui est celui de la moyenne élasticité; l'élasticité, qui était *maximum* suivant l'axe unique avant la compression, restant ordinairement *maximum* pendant qu'elle s'exerce. Si le cristal était positif, l'élasticité était *minimum* suivant l'axe. C'est donc dans le sens de la compression qu'elle devient *maximum*, et c'est, en effet, dans un plan normal à l'axe primitif que se trouvent alors les deux axes.

M. Pfaff a fait des expériences analogues et tout aussi concluantes sur le quartz et sur le spath d'Islande.

TABLE DES CRISTAUX A DEUX AXES

	Angle des axes.		Angle des axes.
Sulfate de nickel (certains échantillons).....	3° 00'	Hydrate de baryte.....	43 48
Sulfocarbonate de plomb.....	» »	Aragonite.....	48 48
Carbonate de strontiane.....	6 56	Cyanure de potassium.....	19 24
Carbonate de baryte.....	» »	Cymophane.....	27 51
Azotate de potasse.....	5 20	Anhydrite.....	28 7
Talc.....	7 24	Borax.....	28 42
Perle.....	11 28	Apophyllite.....	35 8
		Sulfate de magnésio.....	37 24

	Angle des axes.		Angle des axes.
Sulfate de baryte.....	37 42	Comptonite.....	56 6
Spermaceti..... (environ).	37 40	Sulfate de chaux.....	60 »
Borax natif.....	38 48	Azotate d'argent.....	62 46
Azotate de zinc.....	40 »	Iolithe.....	62 50
Stilbite.....	41 42	Feldspath.....	63 »
Sulfate de nickel.....	42 4	Sulfate de potasse.....	67 »
Carbonate d'ammoniaque.....	43 24	Carbonate de soude.....	70 1
Sulfate de zinc.....	44 28	Acétate de plomb.....	70 25
Anhydrite (Biot).....	44 41	Acide citrique.....	70 29
Lépidolithe.....	45 »	Tartrate de potasse.....	71 20
Benzoate d'ammoniaque.....	45 8	Acide tartrique.....	79 »
Sulfate de soude et magnésie....	46 49	Tartrate de potasse et soude....	80 »
Sulfate d'ammoniaque.....	45 8	Carbonate de potasse.....	80 30
Topaze..... 49 à 65 »		Cyanite.....	81 48
Sucré.....	50 »	Chlorate de potasse.....	82 »
Sulfate de strontiane.....	50 »	Épidote.....	84 19
Sulhydrochlorate de magnésie et fer.....	51 46	Chlorure de cuivre.....	84 30
Sulfate de magnésie et ammonia- que.....	51 22	Péridot.....	87 56
Phosphate de soude.....	55 20	Acide succinique.....	90 »
		Sulfate de fer.....	90 »
		Mica.....	de 0 à 76 »

On voit que la *topaze*, et surtout le *mica*, présentent des angles très-différents suivant les échantillons. De Sénarmont a expliqué cette anomalie, en considérant ces substances comme des mélanges de deux substances *isomorphes* ayant le plan des axes dirigé perpendiculairement, dans les cristaux des deux substances. Il a reconnu, en effet, comme nous le verrons plus tard, que le cristal donné par un mélange a, suivant les proportions, ses axes plus ou moins écartés, ou placés dans des plans tournés de 90°, d'un mélange à un autre.

Pour que l'explication s'appliquât au *mica* il faudrait donc qu'il présentât des échantillons dont le plan des axes serait dirigé différemment. Or, c'est ce qui a lieu, comme il résulte d'un long et beau travail de de Sénarmont¹ : après avoir prouvé que le *mica* est cristallisé en prisme droit à base rhombe, il a constaté que le plan des axes est parallèle, tantôt à la grande, tantôt à la petite diagonale de la base; ce que M. B. Silliman junior avait, de son côté, constaté sur quelques échantillons.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXVI, p. 171.

CHAPITRE XII

POLARISATION RECTILIGNE, ET THÉORIE DE LA DOUBLE RÉFRACTION

Le mouvement de la lumière dans un milieu homogène où elle est engendrée, se propage par des pulsations ou ondulations qui sont perpendiculaires à la direction des rayons.

(R. HOOKE, *Hist. de la Société royale de Londres*, par BINCH, t. III, p. 12.)

§ 1. — CARACTÈRES PRINCIPAUX DE LA LUMIÈRE POLARISÉE
ET EXPLICATION DE LA POLARISATION

I. Définition de la polarisation. — Polariscopes divers.

2951. Définition de la polarisation. — Quand un faisceau de lumière émanant du soleil, d'une flamme, traverse un milieu homogène sans rencontrer d'obstacle, il présente de tous les côtés les mêmes propriétés; si on le suppose vertical, on ne trouvera aucune différence dans ses propriétés, du côté du nord, du sud, de l'est, etc. La lumière qui forme un pareil faisceau est dite *lumière naturelle* ou *neutre*. Mais quand ce faisceau a rencontré des obstacles, s'est réfléchi ou réfracté, a traversé des milieux cristallisés, il présente ensuite, le plus souvent, des propriétés différentes sur ses divers côtés. Par exemple, si on le fait tomber obliquement sur un miroir de verre, et si l'on fait tourner ce miroir autour du rayon sans faire varier l'angle d'incidence, l'intensité du faisceau réfléchi change en même temps que le côté auquel se présente la surface du miroir. Du reste, les propriétés des rayons polarisés ne se manifestent pas par des changements de direction, mais par des changements d'intensité ou des modifications de couleur. Les phénomènes où il y a coloration seront étudiés dans un chapitre à part.

Les appareils avec lesquels on reconnaît que la lumière est polarisée se nomment *polariscopes* ou *analyseurs*. Nous allons en décrire plusieurs, en faisant connaître les caractères principaux de la lumière polarisée.

2952. Polariscope réflecteur. — Ce polariscope, dû à Malus, consiste en un miroir *non métallique*, en verre noir; par exemple, ou en obsidienne, *mn* (fig. 2043), soutenu par un anneau *a*, qu'on ajuste à un tube muni de

diaphragmes, à travers lequel arrive le faisceau *polarisé s*. Le miroir étant incliné par rapport à ce faisceau, on fait tourner l'anneau sur lui-même, et l'on voit les rayons réfléchis *r* changer d'intensité avec la position du miroir. Parmi ces positions, il faut en remarquer deux pour lesquelles l'intensité des rayons réfléchis est *maximum*. Ces deux positions diffèrent de 180° , de sorte que le plan de réflexion est le même pour l'une et l'autre. Si l'on fait tourner l'anneau, de 90° dans un sens ou dans l'autre en partant de la position qui correspond à l'un des deux *maximum*, on obtient deux autres positions pour lesquelles l'intensité des rayons réfléchis est *minimum*. Entre le *maximum* et le *minimum*, l'intensité change graduellement et est toujours la même pour deux positions différant de 180° ; d'où l'on conclut que les propriétés du faisceau polarisé sont les mêmes sur deux arêtes diamétralement opposées.

La différence entre le *maximum* et le *minimum* dépend de la substance du miroir, et, pour un même miroir, de l'angle d'incidence. Avec un miroir de verre, cette différence est la plus prononcée quand le rayon fait un angle de $35^\circ 25'$ avec la surface ou quand l'angle d'incidence est de $54^\circ 35'$. Si le rayon réfléchi disparaît alors complètement dans les positions du *minimum*, on dit que le rayon incident est *entièrement polarisé*; dans le cas contraire, il n'est que *partiellement polarisé*.

Plan de polarisation. — Le plan d'incidence, quand l'intensité du rayon réfléchi est *maximum*, se nomme *plan de polarisation* du rayon. On dit donc que le rayon est *polarisé dans le plan d'incidence*, quand l'éclat du rayon réfléchi est *maximum*, et perpendiculairement au plan d'incidence, quand l'éclat de ce rayon est *minimum*.

Analyseur de Delezenne. — Le rayon réfléchi décrivant un cône autour du rayon incident, l'observateur doit tourner avec ce rayon réfléchi pour en observer l'intensité, ce qui est incommode. Cet inconvénient n'existe pas dans l'analyseur de Delezenne (fig. 2044). Le miroir de verre noir est fixé en *m*, où il forme un angle de $35^\circ 25'$ avec l'axe du tube AB. Le rayon polarisé est réfléchi en *m*, entre perpendiculairement dans un prisme de verre, P, à réflexion totale, et sort perpendiculairement par une autre face, où l'œil peut le recevoir sans déplacement incommode, pendant qu'on fait tourner le tube sur lui-même.

2953. Pile de glaces. — Cet instrument, nommé aussi *polariscope de réfraction*, est formé d'un grand nombre de glaces très-minces à faces bien parallèles, empilées les unes sur les autres dans un cadre métallique, et inclinées de $35^\circ 25'$ sur le rayon polarisé, autour duquel la pile peut tourner. Le rayon transmis à travers cette pile, change d'intensité quand on la fait tourner, et l'on trouve que le *maximum* d'éclat se montre quand le plan d'incidence sur la pile est *perpendiculaire* au *plan de polarisation* défini comme nous l'avons fait au moyen du polariscope par réflexion (2952).

Le rayon est donc polarisé *perpendiculairement* au plan d'incidence quand il y a *maximum d'intensité* dans le rayon transmis. On voit (fig. 2043) la disposition qu'on donne à l'instrument; *mn* est alors la pile de glaces.

2954. Polariscopes bi-réfringents. — Un cristal de spath d'Islande constitue un polariscope ; car si l'on fait passer un rayon *polarisé* à travers ce cristal, qu'on fait tourner sur lui-même, on voit le *rayon ordinaire* s'affaiblir graduellement, pendant que l'autre augmente d'intensité ; tandis qu'ils sont sensiblement égaux quand le rayon est naturel. Le *maximum* a lieu, pour le *rayon ordinaire*, quand le plan de polarisation passe par la section principale du cristal ; alors a lieu le *minimum* du *rayon extraordinaire*, et *vice versa*.

Prisme bi-réfringent. — La bifurcation du rayon dans le cristal bi-réfringent est très-incommode, à cause de la nécessité de distinguer le rayon ordinaire du rayon extraordinaire, pour déterminer la position du plan de polarisation. On peut employer alors un prisme bi-réfringent achromatisé, ayant ses arêtes parallèles à l'axe du cristal. Les deux rayons sont assez écartés l'un de l'autre pour que l'un d'eux soit intercepté par le contour d'un tube dans lequel le prisme est enclassé.

Prismes de Nicol, de Foucault. — Nicol se débarrasse d'un des rayons, par un artifice ingénieux. Il prend un rhomboïdre de spath d'Islande, de 27^{mm}



Fig. 2043.



Fig. 2044.

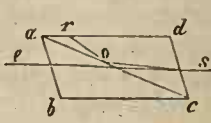


Fig. 2045.



Fig. 2046.

de longueur, et de 9^{mm} de largeur et d'épaisseur, *abcd* (fig. 2045), le scie en deux suivant les deux grandes diagonales, et replace les deux fragments dans leur première position, en les collant au moyen de *baume de Canada*, dont l'indice de réfraction, 1,549, est compris entre les indices des rayons ordinaire et extraordinaire. Si l'on fait arriver un rayon *s* dans le sens de la longueur du prisme, le rayon ordinaire éprouve la réflexion totale en *o*, à la surface *ac* du baume de Canada, et il ne passe que le rayon *extraordinaire* *e*. La position du plan de polarisation est alors celle que prend la section principale quand ce rayon présente son *minimum* d'intensité ; le rayon incident est donc polarisé dans la section principale ainsi placée.

L. Foucault, en remplaçant le baume de Canada par une simple couche d'air, donne une moindre longueur au prisme analyseur.

Propriétés de la tourmaline. — La tourmaline est un cristal à un axe, présentant ordinairement la forme d'un prisme à six pans. Elle possède la singulière propriété d'absorber fortement le rayon ordinaire ; de sorte que, sous une certaine épaisseur, elle ne laisse passer que le rayon *extraordinaire*. Pour mettre en évidence cette propriété, découverte par Biot en 1815, on taille une tourmaline en forme de prisme à angle très-aigu et ayant ses arêtes parallèles à l'axe. Si l'on regarde un objet à travers la partie la plus mince, on aperçoit

deux images; mais si l'on regarde à une certaine distance du sommet, on ne voit plus que l'image *extraordinaire*. Une plaque de tourmaline taillée parallèlement à l'axe, T, (fig. 2046), peut donc remplacer le prisme de Nicol; et, comme dans ce dernier, le rayon est polarisé dans le plan principal, ou parallèlement à l'axe, quand la lumière passe avec le moins d'éclat.

Les tourmalines sont vertes ou brunes, ce qui est un inconvénient quand on veut observer des phénomènes de coloration. M. Hérapath a découvert un sel de quinine à peu près incolore, nommé *hérapathite*, dont les plaques cristallisées peuvent remplacer la tourmaline, et interceptent le rayon *ordinaire* même sous une très-petite épaisseur. Ces cristaux sont composés de 1 équivalent de quinine, 1 d'acide sulfurique, 1 d'iode et 6 d'eau.

Nous verrons que les *polariscope simples* qui précèdent peuvent servir de *polarisateurs*, c'est-à-dire qu'ils impriment à la lumière naturelle qui les frappe ou les traverse, toutes les propriétés de la lumière polarisée. — Nous verrons aussi que les *rayons de chaleur* se polarisent, et par les mêmes moyens que les rayons lumineux.

2955. Polariscope d'Arago ou à lunules. — Quand la lumière est faiblement polarisée, les variations d'intensité cherchées avec les polariscope simples peuvent n'être pas sensibles. On emploie souvent alors le *polariscope d'Arago*, composé d'un tube à diaphragme dont une extrémité est fermée par une lame de *crystal de roche* de 5^{mm} environ d'épaisseur prise perpendiculairement à l'axe, et l'autre, à laquelle on applique l'œil, par un prisme bi réfringent. Quand la lumière reçue dans l'instrument est *naturelle*, on aperçoit deux images *blanches* de l'ouverture du diaphragme; mais pour peu que cette lumière soit polarisée, les images présentent des couleurs complémentaires, que nous expliquerons plus tard, et qui changent quand on fait tourner l'appareil sur lui-même.

Nous aurons occasion de décrire d'autres *polariscope* très-sensibles. Ceux qui précèdent suffisent pour que nous puissions commencer immédiatement l'étude de la lumière polarisée.

2956. Historique. — Les premiers phénomènes de polarisation ont été observés par Huyghens, dans les rayons biréfractés par le spath d'Islande. Il reconnut que, si l'on reçoit l'un de ces rayons sur un second spath, il se bifurque; et, si l'on fait tourner le cristal sur lui-même, les faisceaux ordinaire et extraordinaire changent graduellement d'intensité, le premier prenant un *maximum* d'éclat quand le second disparaît, et réciproquement. Ces faits, que nous étudierons à part (3007), prouvent que les faisceaux qui ont traversé le premier spath ont contracté des propriétés nouvelles qui les rendent plus ou moins transmissibles à travers le second, suivant la manière dont la section principale de ce dernier est orientée par rapport à deux arêtes opposées du faisceau. Pour expliquer ce phénomène, Newton supposa aux particules lumineuses, des *pôles* opposés jouissant de propriétés différentes. Ces pôles, tournés de toutes les manières dans les particules d'un rayon de lumière naturelle, auraient le même

pôle tourné du même côté, dans une direction perpendiculaire au rayon, quand la lumière est *polarisée*.

Le fait de la polarisation dans la double réfraction n'offrait qu'un faible intérêt, parce qu'il était isolé, lorsque, en 1808, Malus découvrit que la réflexion imprime aux rayons lumineux toutes les propriétés de la lumière polarisée. Ayant regardé par hasard à travers un spath d'Islande, l'image du soleil couchant réfléchie par les vitres du palais du Luxembourg, il remarqua qu'en faisant tourner le prisme, ces images changeaient d'intensité; l'une s'affaiblissant pendant que l'autre augmentait d'éclat. Les rayons réfléchis étaient donc polarisés. Plus tard, Malus, Biot, Brewster..., chacun de leur côté, découvrirent que la réfraction simple peut aussi polariser la lumière. Malus expliqua ces phénomènes, au moyen de l'hypothèse de Newton, et créa le mot de *polarisation*, qui découle de l'explication qu'il adoptait. On reconnut alors que la polarisation est un phénomène général, que la lumière polarisée est beaucoup plus commune que celle qui ne l'est pas, et, à partir de cette époque mémorable, les découvertes se succédèrent avec rapidité entre les mains des Arago, des Biot, des Brewster... Une nouvelle branche d'optique fut créée, et Fresnel put établir sur des bases solides cette magnifique théorie de la polarisation et de la double réfraction, à laquelle les géomètres ont apporté le secours de leurs savants calculs, et que n'ont fait que confirmer les découvertes nombreuses dont l'optique s'est enrichie depuis.

II. Explication de la polarisation dans le système des ondulations.

2957. — L'existence de rayons possédant des propriétés différentes sur leurs divers côtés, paraissait à Newton une objection décisive contre le système des ondulations, « car, disait-il, des pressions ou des mouvements propagés d'un corps lumineux, doivent être égaux de tous côtés : au lieu qu'il paraît, par les expériences faites sur deux cristaux, que les différents côtés des rayons de lumière n'ont pas les mêmes propriétés »; et Huyghens fut forcé de convenir de l'impuissance où il était de rendre compte de ce fait dans le système des ondulations. C'est qu'alors on ne concevait pas d'autre mode de vibration que celui dans lequel les mouvements se font suivant la ligne de propagation; mais depuis, des expériences nombreuses et les progrès de la mécanique analytique ont conduit à admettre des mouvements vibratoires perpendiculaires à cette ligne, comme cela a lieu pour les ondes formées sur l'eau, dont les molécules superficielles oscillent perpendiculairement à la direction de la propagation, en montant et descendant alternativement. Alors tout devient simple, et la polarisation découle naturellement de l'existence de ce mode de vibration : Un *rayon naturel* ou *neutre* est celui dans lequel les mouvements vibratoires se font, dans la surface de l'onde, successivement suivant toutes les directions; et un *rayon polarisé*, celui dans lequel ces vibrations se succèdent toutes dans un seul et même plan, dont dépend la position du *plan de polarisation*. Tel est le point de départ de la théorie de Fresnel.

On voit qu'il faut commencer par prouver que les vibrations de l'éther se font parallèlement à la surface de l'onde. Déjà, dès 1672, R. Hooke énonçait ce résultat comme une simple hypothèse, et sans le déduire des phénomènes de la polarisation. Fresnel y a été conduit, en étudiant le passage d'un rayon polarisé à travers un cristal à un axe : Il résulte d'une loi de Malus, que nous exposerons plus loin, que les vitesses de vibration des particules d'éther dans le rayon ordinaire, sont proportionnelles à $\cos \alpha$, et, dans le rayon extraordinaire, à $\sin \alpha$; α étant l'angle du plan de polarisation avec la section principale du cristal. La vitesse de vibration du rayon incident polarisé semble donc se décomposer en deux autres, suivant la règle du parallélogramme, comme si chaque vitesse d'oscillation, supposée perpendiculaire au rayon, se décomposait en deux autres, l'une dans la section principale, l'autre perpendiculaire à ce plan; il semble donc que les mouvements oscillatoires se font transversalement au rayon. Voici les expériences par lesquelles Fresnel et Arago ont cherché à prouver qu'il en est ainsi.

2958. Les vibrations de l'éther sont transversales au rayon. — Si les vibrations de l'éther s'accomplissaient longitudinalement, comme celles de l'air dans la transmission du son, les interférences devraient avoir lieu, quelles que fussent les lames minces interposées dans le trajet des rayons qui interfèrent. Si, au contraire, les vibrations sont perpendiculaires au rayon, et si les lames interposées dirigent dans le même plan toutes celles d'un même rayon, il faudra, pour qu'il y ait destruction des mouvements ondulatoires, que ces mouvements aient lieu dans le même plan pour les deux rayons; car, s'ils s'accomplissaient dans des plans inclinés l'un sur l'autre, ils produiraient en chaque point de rencontre des deux rayons, une résultante, donnée par la règle du parallélogramme des vitesses, et qui ne pourrait jamais être nulle. Deux rayons polarisés dans des plans différents ne devront donc pas donner d'obscurité complète par interférence; et quand ces plans seront perpendiculaires l'un à l'autre, ils ne devront pas même donner ces inégalités d'intensité qui forment les franges d'interférence; et c'est, en effet, ce qu'ont constaté Fresnel et Arago.

Lors de ses essais sur les mesures des indices par les interférences (2847), Arago eut l'idée de chercher l'influence que pourrait avoir sur les résultats, l'état de polarisation des rayons, et il se mit aussitôt à l'œuvre avec Fresnel. Ils reconnurent d'abord facilement, que l'expérience des franges dans l'ombre d'un corps étroit, réussit très-bien avec la lumière polarisée. Ils essayèrent ensuite les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire sortant d'un spath d'Islande placé devant le focus fourni par une lentille. L'expérience prouve que ces deux faisceaux sont polarisés dans des plans perpendiculaires entre eux. Les ayant séparés par l'écran étroit, ils n'obtinrent aucune frange dans l'ombre géométrique. Comme on pouvait attribuer ce résultat négatif à l'inégalité de vitesse des deux faisceaux dans le spath, d'autres méthodes furent employées, parmi lesquelles nous citerons les suivantes¹ :

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. X, p. 290.

1° On répète l'expérience d'Young (2827), au moyen de la lumière polarisée. Si les deux faisceaux qui passent par les fentes sont polarisés dans le même plan, il se forme des franges comme avec la lumière naturelle; s'ils sont polarisés à angle droit, les franges disparaissent. Pour obtenir des rayons polarisés, on couvre les fentes, de deux fragments d'une même lame de tourmaline parallèle à l'axe, lame qui polarise la lumière dans un plan perpendiculaire à cet axe. Si les fragments ont leurs axes parallèles, il y a interférence; et si ces axes sont perpendiculaires, les franges disparaissent. Pour les positions intermédiaires, on voit des franges, mais d'autant moins distinctes que les plans de polarisation sont plus éloignés du parallélisme.

Au lieu de tourmalines, on peut employer deux petites piles de glaces égales (2953), formées de feuilles de mica. Si on les incline suffisamment au-dessus des fentes, la lumière qui les traverse est polarisée dans un plan normal au plan d'incidence; et les franges disparaissent quand les deux plans d'incidence sont perpendiculaires entre eux.

2° On applique sur les deux fentes, deux fragments d'une même lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche parallèle à l'axe. Chaque lame donne un rayon ordinaire et un rayon extraordinaire, polarisés dans des plans perpendiculaires. Si les axes des deux fragments sont parallèles, les rayons ordinaires des deux lames donnent des franges, comme la lumière naturelle; il en est de même des rayons extraordinaires, et ces deux systèmes de franges se superposent. Si l'on fait tourner peu à peu l'une des lames, on voit ces franges s'affaiblir et disparaître, pour être remplacées par de la lumière uniforme quand les axes sont perpendiculaires. En même temps, on voit apparaître latéralement d'autres systèmes de franges, qui sont le résultat de la combinaison des rayons ordinaires venant d'une des fentes, avec les rayons extraordinaires venant de l'autre, et elles sont transportées latéralement, à cause de la différence de vitesse de ces rayons dans le cristal (2844). Tant que les axes des deux lames sont parallèles, les plans de polarisation des rayons, ordinaire de l'une et extraordinaire de l'autre, étant perpendiculaires l'un à l'autre, les franges latérales ne se forment pas. Mais si l'on incline l'axe d'une de ces lames, ces franges apparaissent de plus en plus brillantes, et prennent leur *maximum* d'éclat quand les axes sont perpendiculaires. — Le sulfate de chaux et le cristal de roche étant positifs, le rayon extraordinaire possède la vitesse la plus petite; les franges d'un côté sont donc produites par le rayon extraordinaire de la lame qui est du même côté, interférant avec le rayon ordinaire venant de la lame opposée.

3° On partage en deux une plaque de spath d'Islande, et l'on pose les deux fragments l'un sur l'autre, de manière que les rayons les traversent successivement. La première plaque donne deux faisceaux qui, en général, se bifurquent dans la seconde, en formant ainsi quatre faisceaux. Mais si les deux plaques ont leur section principale perpendiculaire l'une à l'autre, il n'y a plus que deux faisceaux : le faisceau ordinaire produit par l'extraordinaire de la première

plaque, et le faisceau extraordinaire provenant de son faisceau *ordinaire*. Ces rayons, en sortant des deux plaques, auront donc éprouvé les mêmes changements de vitesse, et se trouveront dans le même cas que s'ils avaient traversé une même plaque homogène; ils devraient donc former des franges, si les vibrations de l'éther étaient longitudinales. Or, on n'obtient pas de franges, ces deux faisceaux étant polarisés à angle droit.

Dans l'expérience des interférences (2826), les rayons étant fournis par une même source, ont à chaque instant leurs vibrations transversales parallèles, de manière à pouvoir interférer; et s'ils sont polarisés, dans certains appareils par réflexion ou par réfraction, ils le sont tous dans le même plan.

2959. Rayon naturel. — Un rayon *naturel* ou *neutre* est celui dans lequel les vibrations parallèles à la surface de l'onde s'accomplissent successivement dans toutes les directions. On peut donc le regarder comme un rayon polarisé dont le plan de polarisation changerait à chaque instant; et on peut le montrer par l'expérience suivante. Un rayon *ss'* (fig. 2047), est polarisé en traversant un prisme de Nicol (2954) enchâssé dans un tube qui peut recevoir, d'une roue dentée *r*, un mouvement rapide de rotation sur lui-même. Pendant ce mouvement, ce rayon, reçu dans un polariscope, ne donne aucun signe de polarisation, le plan dans lequel il est polarisé changeant à chaque instant.



Fig. 2047.

Si la lumière est donnée par une étincelle électrique, elle se montre polarisée, le prisme, et par conséquent le plan de polarisation, ne se déplaçant pas sensiblement pendant la durée de l'étincelle.

2960. Les mouvements vibratoires sont perpendiculaires au plan de polarisation. — Il résulte des expériences qui précèdent que les vibrations de l'éther sont parallèles à la surface de l'onde, et que, dans un rayon polarisé, elles s'accomplissent pour la plupart dans un même plan passant par ce rayon. Ce plan, nommé *plan du rayon*, doit évidemment avoir une position déterminée par rapport au *plan de polarisation*. Fresnel a admis que les vibrations transversales, dans un rayon polarisé, sont *perpendiculaires* au plan de polarisation. Voici les arguments concluants sur lesquels il s'est principalement appuyé :

1° L'expérience prouve que le rayon *ordinaire* sortant d'un cristal à un axe, est polarisé *dans la section principale*. Or, ce rayon ayant une vitesse constante dans toutes les directions, puisqu'il suit les *lois de Descartes*, les vibrations de l'éther doivent y avoir une direction constante par rapport à l'axe du cristal; et comme elles sont perpendiculaires au rayon, quelle qu'en soit la direction, elles ne pourront rester toujours également inclinées sur cet axe qu'autant qu'elles lui seront perpendiculaires. Les vibrations sont donc perpendiculaires à la fois au rayon et à l'axe, et par conséquent à la section principale, qui se confond ici avec le plan de polarisation. Comme tous les rayons polarisés, quelle

que soit la cause qui les ait polarisés, sont dans le même cas, on voit que les vibrations de l'éther sont toujours ainsi dirigées.

2^o Nous avons vu qu'une lame de tourmaline parallèle à l'axe intercepte le rayon ordinaire (2954) et Haüy a découvert qu'une lame de tourmaline *perpendiculaire à l'axe*, arrête toute la lumière incidente normale; d'où l'on conclut que les vibrations perpendiculaires à l'axe sont anéanties. Quand le rayon traverse une lame *parallèle à l'axe*, le rayon ordinaire, qui est polarisé dans la section principale, est seul intercepté; il faut donc que ses vibrations soient encore perpendiculaires à l'axe, et, par conséquent, à la section principale, dans laquelle il est polarisé.

M. Lallemand a confirmé cette manière de voir au moyen des expériences remarquables qui suivent¹. On fait passer un pinceau de lumière solaire dans un tube de verre horizontal fermé par des glaces et rempli d'un liquide très-pur. Ce tube, vu par le côté, paraît illuminé. On ne peut attribuer cette lumière émise transversalement à la présence de particules en suspension, car les liquides organiques (acétone, alcools et hydrocarbures divers, sulfure de carbone.....), dans lesquels les particules organiques se dessèchent et se déposent facilement, et enfin l'acide sulfurique pur et concentré, donnent cette illumination transversale. Si l'on dirige un polariscope suivant un diamètre quelconque d'une section droite du tube, on voit que cette lumière est entièrement polarisée dans un plan passant par l'axe du tube, et si l'on vise obliquement à cet axe, on trouve la lumière d'autant moins polarisée que l'obliquité est plus prononcée.

Cela posé, introduisons dans le tube un rayon *polarisé*, dont le plan de polarisation ne change pas en traversant le liquide. Alors, la lumière diffusée transversalement, observée à travers un simple tube noirci, présente deux *maximum* opposés, quand on vise *parallèlement* au plan de polarisation, et deux *minimum* quand on vise *perpendiculairement*. Or, c'est quand les vibrations sont longitudinales ou se font dans la direction des rayons qui vont à l'œil, que celui-ci n'est pas impressionné (2961); les vibrations du rayon polarisé traversant le tube s'accomplissent donc dans le plan suivant lequel la lumière est *minimum*, c'est-à-dire perpendiculairement au plan de polarisation.

Il résulte de cette direction des mouvements vibratoires et de ce que nous vu plus haut (2952), qu'un rayon polarisé se réfléchit le plus facilement quand ses vibrations sont parallèles à la surface réfléchissante; il pénètre, au contraire, plus facilement à travers une pile de glaces, quand les mouvements s'accomplissent dans le plan d'incidence, et il traverse le plus complètement une tourmaline parallèle à l'axe, quand les vibrations sont parallèles à cet axe. La tourmaline se comporte ici comme un grillage qui livrerait passage à une verge vibrant parallèlement aux barreaux, et qui l'arrêterait si elle vibrerait transversalement.

Remarque. — Fresnel a établi, en s'appuyant sur la direction des vibrations,

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. XXII, p. 200.

perpendiculaires au plan de polarisation, une théorie mécanique de la réflexion et de la réfraction, sur laquelle nous reviendrons (2978). Des doutes s'étant élevés, à cette occasion, sur cette direction des vibrations, malgré la solidité des arguments invoqués par Fresnel, M. Stokes, en 1850, a cherché à décider la question, au moyen de la *diffraction* par les réseaux, de la lumière *polarisée*. Il remarque que, si les vibrations sont parallèles à la surface de l'onde, avant qu'elle ne rencontre l'écran strié, il n'en est plus de même dans un rayon diffracté oblique partant de cette surface, puisque les vibrations sont perpendiculaires à ce rayon, et il en résulte que, si le plan de polarisation est oblique aux traits du réseau, ce plan est déplacé, et le rayon diffracté n'est pas polarisé dans le même plan que les rayons incidents¹. M. Stokes, en partant des lois de l'élasticité de l'éther, a calculé la quantité dont doit tourner le plan de polarisation : 1° quand les vibrations sont supposées perpendiculaires au plan de polarisation ; 2° quand elles sont supposées lui être parallèles, et il a cherché à comparer les résultats du calcul à ceux que donne l'expérience. Il se servait d'un réseau gravé sur verre, présentant 50 traits par millimètre. Malgré la grande déviation des rayons diffractés considérés, les résultats furent peu réguliers ; ce qui devait tenir en partie à la réfraction dans les espaces transparents du réseau. Néanmoins, l'ensemble des expériences a été favorable aux idées de Fresnel.

M. Holtzmann, au moyen d'un réseau formé de noir de fumée déposé sur une lame de verre et finement rayé, est arrivé, mais au moyen de résultats tout aussi indécis, à une conclusion opposée. Dans ces diverses recherches, on avait négligé les composantes *longitudinales* des vibrations ; M. Eisenlohr en a tenu compte, et a conclu comme Fresnel². Enfin, M. Mascart, au moyen de réseaux d'une perfection remarquable, a fait des expériences analogues qui lui ont donné des résultats assez concordants, confirmant encore le principe de Fresnel³. Ce principe reste donc debout, malgré quelques expériences dissidentes, mais peu claires. — Nous aurons à revenir plus loin sur cette question (2983), sans toutefois qu'il y ait à modifier ces conclusions.

2961. Origine et propagation des vibrations transversales. — Quand une molécule d'éther est déplacée dans une direction quelconque, cette direction est, en général, oblique à la ligne qui la joint à la molécule la plus voisine ; et la vitesse de ce mouvement peut se décomposer en trois composantes rectangulaires, l'une suivant la plus courte distance à la molécule voisine, et dirigée dans le sens de la propagation, les deux autres perpendiculaires à la première. Les vitesses longitudinales se propagent par des condensations et des dilatations ; ce sont celles qui engendrent le son, quand il s'agit des milieux pondérables.

¹ Il résulte de là que la lumière naturelle doit se polariser en partie, en traversant un réseau ; c'est, en effet, ce qui a lieu.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LV, pp. 491 à 504.

³ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXIII, p. 1005.

Les deux autres se propagent sans condensation ni dilatation ; elles n'agissent pas sur l'oreille, les molécules de l'air vibrant parallèlement à la membrane du tympan. La rétine, au contraire, n'est sensible qu'aux vibrations transversales de l'éther ; probablement parce que sa surface est hérissée de filaments nerveux, faciles à agiter latéralement et que les vibrations longitudinales ne peuvent ébranler. On peut se représenter les vibrations dans le sens de la propagation par ce qui se passe dans une corde tendue vibrant *longitudinalement*, et les vibrations transversales par celles qui animent la corde quand elle vibre *transversalement*.

L'analyse mathématique a conduit à ces résultats ; les équations aux différences partielles par lesquelles on représente les petits mouvements des particules d'un milieu élastique, indiquent deux espèces de vibrations, les unes dans le sens de la propagation, les autres perpendiculaires. Les mouvements longitudinaux se propagent deux fois moins vite que les autres. Nous avons vu, dans l'acoustique, comment Wertheim a reconnu l'existence des deux systèmes d'ondes, dans certains milieux pondérables (I, 788).

Pour nous rendre compte du mode de transmission des vibrations transversales à la direction de la propagation, considérons plusieurs files indéfinies de molécules d'éther en équilibre, perpendiculaires au sens de la propagation. Dans les milieux homogènes, ces molécules sont équidistantes et distribuées régulièrement. Si la première file est déplacée très-peu dans le sens de sa longueur, les distances des molécules qui la composent à celles de la file voisine sont modifiées. Ces dernières vont donc se déplacer dans le même sens pour rétablir l'égalité de distance, et celles de la troisième file vont obéir aux mêmes influences et se déplacer à leur tour, et ainsi de suite. Pendant ce temps-là, les molécules de la première file sont ramenées à leur position d'équilibre, par la cause qui excite leurs vibrations. Elles tendraient à dépasser cette position, mais les molécules déplacées de la file suivante réagissent et détruisent la vitesse acquise ; puis elles obéissent à leur tour à l'action des molécules de la première file, reviennent à la position d'équilibre, à laquelle la troisième les arrête, et ainsi de suite.

On voit que les mouvements peuvent s'accomplir sans changement de densité, et tout rentrera à l'état de repos, à moins que de nouvelles oscillations ne soient imprimées à la première file. Les diverses molécules situées sur une droite parallèle à la direction de la propagation seront alors dans différents états de déplacement par rapport à cette droite, ou dans différentes phases de leur oscillation complète.

On peut représenter ces déplacements latéraux par des ordonnées, comme en acoustique ; seulement, ici, ces ordonnées représentent les déplacements réels, et non plus des condensations ou dilatations.

§ 2. — POLARISATION PAR RÉFLEXION, ET RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE

I. Lois de la polarisation par réflexion.

2962. Mode d'observation. — Quand un faisceau de lumière se réfléchit obliquement sur un corps poli non métallique et non cristallisé, verre, marbre, obsidienne, bois verni, etc., etc., ce rayon se polarise dans le plan d'incidence, comme on peut le constater au moyen d'un polariscope. Les mouvements vibratoires qui, dans le rayon incident, s'accomplissaient successivement suivant toutes les directions perpendiculaires au rayon, s'exécutent donc, pour le plus grand nombre, dans le rayon réfléchi, perpendiculairement au plan de réflexion (2960).

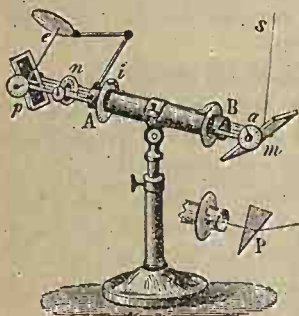


Fig. 2048.

Appareil de Biot. — Les expériences se font ordinairement au moyen de l'appareil de Biot (fig. 2048). AB est un tuyau noirci en dedans, et contenant des diaphragmes qui ne laissent passer que des rayons sensiblement parallèles. En *m*, est un cadre dans lequel on fixe la lame polie destinée à polariser la lumière par réflexion. On peut incliner plus ou moins la lame par rapport à l'axe du tube, et mesurer l'angle qu'elle forme avec cet axe, au moyen du cercle divisé *a*. En *A*, s'ajuste le polariscope *p*, qui peut tourner,

autour de l'axe du tube, de quantités mesurées au moyen d'un cercle divisé *A* et d'un index fixe *i*. Dans la figure, *p* est un polariscope de réflexion. En *n*, est un anneau destiné à recevoir des lames transparentes, pour certaines expériences dont nous parlerons plus tard.

Quand on reçoit sur le polariscope *p*, la lumière des nues ou d'une lampe, réfléchi par la plaque *m*, on trouve qu'il y a *maximum* d'éclat quand les plans de réflexion en *m* et *p* coïncident, ce qui a lieu dans deux positions opposées du miroir *p*. Quand ce dernier est tourné de manière que les deux plans de réflexion soient perpendiculaires, on a le *minimum* d'éclat. On peut aussi opérer avec l'appareil (fig. 1742) qui sert à vérifier les lois de la réfraction. Après avoir enlevé le vase cylindrique, on agrafe une règle verticale portant le miroir, et l'on dispose un polariscope à l'extrémité de l'alidade qui reçoit le rayon réfléchi (2482).

M. Guérard montre d'un seul coup d'œil les différentes intensités du faisceau polarisé réfléchi dans différents azimuts, en le recevant sur le sommet d'un cône de verre noir, et parallèlement à l'axe de ce cône. La lumière réfléchi sur

toutes les arêtes du cône, dont l'angle au sommet est égal à deux fois $35^{\circ} 25'$, forme sur un écran parallèle à sa base, un cercle lumineux présentant deux *maximum* opposés qui indiquent le plan de polarisation du faisceau incident, et deux *minimum* situés à 90° des *maximum*, et entre lesquels l'éclat varie graduellement.

Avec une tourmaline ou un prisme de Nicol, le *minimum* du rayon polarisé par réflexion se montre quand les sections principales de ces polariscope sont parallèles au plan de réflexion en m ; c'est donc bien dans ce plan que la lumière est polarisée par la réflexion (2954).

2963. Angle de polarisation. — Quand le polariscope est tourné de manière que le rayon polarisé par réflexion présente son *minimum* d'intensité, on remarque que ce *minimum* change de valeur avec l'angle d'incidence sur la surface réfléchissante m (fig. 2048). Quand cet angle est tel que l'éclat est le plus petit possible, on le nomme l'*angle de polarisation* de la substance du miroir¹. Quand le rayon réfléchi peut être totalement éteint par le polariscope, on dit qu'il est *complètement polarisé*. Cela n'a jamais lieu que sous l'angle de polarisation, et quand la lumière n'est pas trop vive. Ainsi, quand on reçoit les rayons solaires sur le miroir m , qui les polarise, il passe toujours un peu de lumière dans le polariscope donnant le *minimum*, même quand l'incidence en m est l'angle de polarisation.

Il est à remarquer aussi que l'angle d'incidence sur le miroir d'un polariscope de Malus, doit être égal à l'angle de polarisation de la matière dont il est formé, quand on veut obtenir la plus grande différence entre le *maximum* et le *minimum* d'intensité du rayon polarisé qu'il sert à étudier. Dans ce cas, on peut recevoir sur un écran e qui tourne avec le polariscope de réflexion, le faisceau qu'il réfléchit; ce qui dispense de déplacer l'œil.

L'angle de polarisation n'est pas le même pour toutes les substances; on peut le montrer au moyen d'une expérience curieuse de Brewster: on place une plaque de verre noir en m (fig. 2048), de manière à voir disparaître toute lumière dans le polariscope quelconque placé en p . Si l'on souffle ensuite son haleine sur la plaque, la lumière apparaît; la réflexion se faisant alors sur de l'eau, dont l'angle de polarisation est moindre que celui du verre.

2964. Mesure de l'angle de polarisation. — Dans le cas des corps solides, on en forme une plaque qu'on ajuste dans le cadre mc (fig. 2048), on place le polariscope p de manière à avoir le plus faible éclat, et l'on incline peu à peu le cadre m , jusqu'à ce que l'image présente son *minimum* d'éclat. L'angle de polarisation est alors donné par le cercle divisé a . L'appareil pour les lois de la réfraction (2962), peut aussi être employé et s'applique facilement aux liquides. Dans ce dernier cas, on peut aussi se contenter de mouiller la surface d'une plaque de verre noir.

¹ Certains physiciens prennent pour angle de polarisation l'angle formé par le rayon avec la surface, supposée plane. Nous considérerons toujours l'angle formé avec la normale.

Biot a employé le moyen suivant : le liquide est placé dans une petite coupe *m* (fig. 2049) mobile sur une règle horizontale divisée *ab*. Une autre règle divisée *cd*, perpendiculaire à la première, est fixée à un curseur *c*, qui peut glisser sur la règle *ab*. Elle porte un écran mobile *d*, percé d'un trou par lequel passe un pinceau de rayons lumineux fournis par une bougie *s*. Ce pinceau est réfléchi par la surface du liquide *m*, et reçu dans un polariscope *p*. On fait varier l'angle d'incidence, en déplaçant le vase, jusqu'à ce que le rayon réfléchi soit le plus complètement polarisé. Le triangle *dc'm* donne alors $\text{tang } dmc' = dc' : mc' = \cot p$,

en désignant par *p* l'angle de polarisation. Voici quelques résultats trouvés par divers physiciens, principalement par Arago et Biot :

NOMS des SUBSTANCES	ANGLE de polarisation.	ANGLE avec la surface.	NOMS des SUBSTANCES	ANGLE de polarisation.	ANGLE avec la surface.
Spath fluor.....	54° 50'	40° 0'	Topaze.....	58° 40'	31° 20'
Eau.....	52 45	37 15	Spath d'Islande....	58 23	31 37
Verre.....	54 35	35 25	Rubis spinelle.....	*60 46	29 44
Obsidienne.....	56 03	33 57	Zircon.....	*63 08	26 52
Sulfate de chaux....	56 28	33 32	Soufre natif.....	*64 40	25 50
Ambre.....	56 35	33 25	Verre d'antimoine..	*64 45	55 45
Cristal de roche....	57 22	32 38	Chromate de plomb	*67 42	22 48
Sulfate de baryte...	58 0	32 0	Diamant.....	*68 02	24 58

2965. Loi de Brewster. — Malus avait cherché en vain une relation entre l'angle de polarisation et l'indice de réfraction, lorsque Brewster, en 1814, découvrit cette loi simple et élégante : *la tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction de la substance réfléchissante*. Cet énoncé peut être remplacé par la formule géométrique suivante : *Lorsqu'un rayon se réfléchit sous l'angle de polarisation, *p*, le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté*. En effet, on a, d'après le premier énoncé, $\text{tang } p = n = \frac{\sin p}{\cos p}$; or,

on a aussi $n = \frac{\sin p}{\sin r}$. Il faut donc (fig. 2050) que $\sin r = \cos p$, c'est-à-dire que l'angle *r* soit complémentaire de *p*, et par suite que l'angle *r*1E soit droit.

Parmi les nombreuses expériences entreprises pour contrôler la loi de Brewster,

nous citerons celles qui ont été faites par Seebeck, en 1830, au moyen de l'appareil (fig. 2051). Cet appareil, très-commode, consiste en un cercle gradué fixe portant un collimateur *c*, à travers lequel passe un pinceau de rayons lumineux. Ce pinceau se réfléchit sur la surface polarisante *o*, fixée, au centre, à une alidade *aa*, de manière à être parallèle à l'alidade et perpendiculaire au plan du limbe. Le rayon réfléchi est reçu dans un polariscope *p*, fixé à un arc denté *dd* que porte une seconde alidade *pn*. Un pignon denté *v*, fixé à l'alidade *aa*, et engagé dans les dents du cercle fixe, fait mouvoir cette alidade, et agit en même temps sur l'arc *dd*, auquel est fixé le polariscope *p*. Il résulte de cette disposition que, si l'alidade *aa* se rapproche de la direction du rayon incident *co*, d'une quantité correspondant à *n* dents, l'alidade *pn* se rapprochera aussi de *aa*, de cette même quantité; de manière que le rayon réfléchi passera toujours par le polariscope *p*.

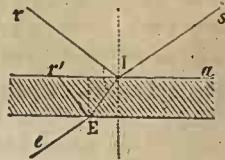


Fig. 2050.

Seebeck trouva d'abord des résultats peu d'accord avec la loi de Brewster; ce qui tenait à ce que les surfaces polies sont rapidement ternies par ce dépôt de matières grasses qui nous a servi à expliquer les images de Moser (2681). Seebeck trouva plus tard un accord satisfaisant, en opérant sur des surfaces récemment polies. Brewster avait aussi, antérieurement, constaté des anomalies singulières avec le verre, et les avait attribuées à la même cause.

2966. Remarques. — 1° Il y a très-peu de corps capables de polariser entièrement la lumière par réflexion, et si l'on a cru longtemps le contraire, c'est qu'on opérerait sur des rayons peu intenses. Ce sont les corps qui ont un grand indice de réfraction qui polarisent le moins. Suivant Brewster, il faudrait que l'indice fût moindre que 1,7 pour qu'il y eût polarisation complète. On a marqué d'un astérisque, dans le tableau ci-dessus, les substances qui ne sont pas dans ce cas. Mais même au-dessous de l'indice 1,7, la polarisation ne peut être complète, quand les rayons sont intenses. En général, les corps qui réfléchissent peu de lumière en polarisent une grande proportion. Les métaux à surface polie et nette polarisent à peine; ce qui permet de reconnaître facilement, au moyen d'un polariscope, la présence d'un vernis à leur surface. Dans tous les cas, la loi de Brewster s'applique à l'incidence sous laquelle le faisceau réfléchi contient la plus grande proportion de lumière polarisée.

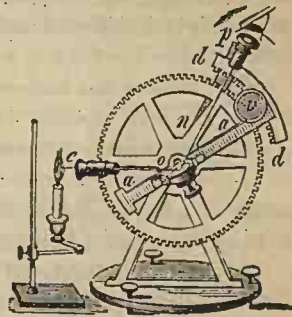


Fig. 2051.

2° Les indices de réfraction des divers rayons colorés étant différents, l'angle de polarisation de ces rayons ne doit pas être le même. On devrait donc, avec

la lumière blanche, obtenir successivement les couleurs du spectre, en inclinant légèrement le miroir dans le voisinage de l'angle de polarisation. C'est, en effet, ce qui a lieu d'une manière sensible avec les corps qui ont un grand pouvoir dispersif, comme l'huile de cassia, le diamant, le chromate de plomb, le fer spéculaire, mais non avec l'eau et le verre, dont les angles de polarisation des rayons extrêmes du spectre ne diffèrent que de 15' et 20'. Cependant, J. Herschel rend les couleurs sensibles, avec le verre, en plaçant en *m* et *p* (fig. 2048) des lames de verre sur lesquelles il fait réfléchir les rayons solaires. L'angle d'incidence sur le premier miroir étant successivement un peu inférieur, égal, et un peu supérieur à l'angle de polarisation, il reçoit les rayons réfléchis, sur le second miroir *p*, sous une incidence successivement inférieure, égale et supérieure à ce même angle, et obtient dans les neuf cas différents, diverses nuances bien distinctes. Quand on fait réfléchir la lumière blanche sur un seul miroir, l'angle de polarisation correspond aux rayons jaunes, qui sont les plus brillants, et les teintes rouges et violettes qui tendraient à apparaître forment, par leur mélange, de la lumière blanche. Il résulte de ces faits qu'il ne devrait jamais y avoir extinction complète du rayon réfléchi; c'est ce qui a lieu avec les rayons solaires. Mais la lumière des nuées semble disparaître complètement, la portion qui se réfléchit étant très-faible. La grande dispersion des corps très-réfringents explique en partie pourquoi ils ne polarisent jamais entièrement.

3^o Dans le tableau précédent figurent des corps biréfringents. On doit se demander auquel des indices, ordinaire ou extraordinaire, s'applique la loi. Brewster a trouvé que l'angle de polarisation est différent sur les diverses faces du cristal biréfringent, et dans différentes directions sur une même face; mais qu'il y a toujours une direction où la polarisation n'est pas modifiée par la force qui produit la double réfraction, et où la tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction ordinaire¹.

2967. Mesure des indices de réfraction. — La loi de Brewster nous fournit un moyen précieux de mesurer l'indice de réfraction des substances qu'on n'a qu'en petits fragments; il suffit d'y former une surface plane bien polie, et de mesurer l'angle de polarisation. Cette méthode offre, en outre, la possibilité d'obtenir l'indice des corps opaques. Par exemple, les angles de polarisation sur l'acier et le mercure sont 71° et 76° 30', d'où l'on déduit, pour les indices de ces métaux, 4,16 et 2,85.

2968. Polarisation par réflexion à la seconde surface. — Malus a reconnu qu'un rayon tel que IE (fig. 2050), qui se réfléchit en E dans l'intérieur d'un milieu transparent, se polarise dans le plan d'incidence. Si sI forme avec la normale l'angle de polarisation, et si les faces du corps transparent sont parallèles, le rayon réfracté forme aussi avec la normale en E l'angle qui correspond à la polarisation *maximum*. Or, le rayon émergent Ee étant parallèle à sI, il est facile de voir que l'angle r'Ee est droit, comme l'angle EIr; ce qui

¹ Brewster, *Manuel d'optique* (traduction française), t. I, p. 228.

montre que la loi de Brewster s'applique à la réflexion intérieure. Pour exprimer cette loi algébriquement, on écrira $\tan p' = 1 : n$; n étant l'indice, ou $\cot p' = n$. On voit aussi que p' n'est autre chose que l'angle de réfraction en I; on a donc $\sin p = n \sin p'$, relation entre les angles de polarisation par réflexion à l'extérieur et à l'intérieur du corps.

On pourrait attribuer une partie de la polarisation du rayon réfléchi en dedans et émergent en r' , à une action produite, soit à l'entrée du rayon en I, soit à sa sortie en r' . Pour éviter cette objection, Malus a d'abord constaté qu'un rayon incident normal, ne se polarise ni par réflexion ni par réfraction, et qu'un rayon qui traverse un milieu, en entrant et sortant normalement, n'éprouve pas de modification dans sa polarisation. Ayant ensuite taillé un prisme ABC (fig. 2052), dont les angles A et B étaient égaux à l'angle p' calculé au moyen de la formule $\cot p' = n$; il fit tomber un rayon sE perpendiculairement à la face CA, et obtint un rayon réfléchi Er perpendiculaire à la face de sortie BC, et formant l'angle NEr égal à A ou à p' . Ce rayon était polarisé dans le plan de réflexion.

Il n'y a pas de polarisation rectiligne dans la réflexion totale, c'est-à-dire quand le rayon arrive en E en faisant avec la normale un angle égal ou supérieur à l'angle limite; mais il se produit dans ce cas des phénomènes particuliers, sur lesquels nous aurons à revenir.

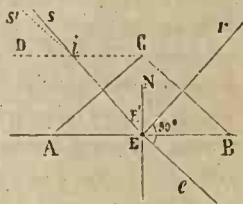


Fig. 2052.

2969. Polarisation par réflexion diffuse. — La lumière réfléchie d'une manière diffuse par les surfaces imparfaitement polies est, en général, polarisée partiellement. Il suffit, pour le constater, de regarder obliquement à travers un polariscope, en se plaçant en dehors du plan de la réflexion spéculaire, une surface vivement éclairée, et de faire tourner le polariscope sur lui-même. On reconnaît facilement deux *maximum* et deux *minimum* à chaque tour. Arago a reconnu que la lumière diffusée par les surfaces polies est polarisée perpendiculairement au plan de réflexion considéré. Mais si, au lieu de surfaces polies, on opère sur des surfaces mates, les résultats sont tout autres. MM. de la Prévostaye et P. Desains ont reconnu que la polarisation a lieu alors dans le plan normal passant par l'œil ¹. Quand la lumière tombe normalement à une plaque de verre dépoli, de platine platiné ou recouvert de noir de fumée, la lumière diffusée dans tous les sens est polarisée dans le plan normal passant par l'œil, et d'autant plus que les rayons réfléchis considérés sont plus écartés de la normale. Mais la céruse, le cinabre, le soufre lavé, ne paraissent imprimer aucune trace de polarisation à la lumière diffusée provenant d'un faisceau normal; il faut, pour qu'il y ait polarisation, que le faisceau incident forme un angle de plus de 30° avec la normale. Sous l'incidence de 70°, toutes les substances examinées

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIV, p. 215.

ont donné, dans la direction de la réflexion spéculaire, de la lumière polarisée dans le plan d'incidence. Si, l'incidence étant toujours de 70° , on explore les rayons diffus dans des directions différentes de celle de la réflexion spéculaire, mais *en restant dans le plan d'incidence*, on trouve que, pour le *soufre*, le *cinabre* et la *céruse*, les rayons diffus compris dans l'angle droit du côté du faisceau incident, ne sont pas polarisés. Si l'on part de la normale, dans l'angle droit opposé, la polarisation se montre bientôt et paraît atteindre un *maximum* dans la direction de la réflexion spéculaire. Avec le *platine platiné*, la polarisation existe dans les deux angles droits, mais elle est très-faible dans celui qui contient le faisceau incident, et elle semble changer de plan quand les rayons diffusés sont très-rapprochés de la surface.

MM. de la Provostaye et P. Desains ont vérifié la polarisation dans un plan *perpendiculaire* au plan de réflexion des rayons diffus réfléchis par les surfaces *polies*. Ils ont reconnu que, pour constater ce fait, il faut se placer à une certaine distance angulaire de la direction des rayons réfléchis spéculairement. En se rapprochant ensuite de celle-ci, on trouve, d'un côté comme de l'autre, une direction pour laquelle il n'y a pas de polarisation; entre ces deux directions neutres, le plan de polarisation se confond avec le plan de diffusion. Les rayons neutres s'écartent à mesure que la surface est moins polie, de manière que l'on passe par degrés à ce qui a lieu pour les surfaces mates. Il est à remarquer que le poli n'est pas seul à avoir de l'influence sur ces phénomènes; car certains corps bien polis peuvent se comporter à peu près comme les corps mats.

2070. Polarisation partielle par réflexion spéculaire. — Quand la lumière naturelle se réfléchit sous un angle différent de l'angle de polarisation, ou même sous cet angle, pour la plupart des substances, le faisceau réfléchi ne peut être éteint par les différents polariscope : et il est dit *partiellement polarisé*. Malus, Arago et la plupart des physiciens considèrent un semblable faisceau comme composé de rayons naturels et de rayons totalement polarisés. De sorte que la polarisation n'admettrait pas de degrés; un rayon élémentaire serait totalement ou nullement polarisé. Un polariscope peut l'arrêter dans le premier cas, et le laisse passer dans le second. — Nous verrons plus loin que Brewster considère la lumière partiellement polarisée, sous un tout autre point de vue (2990).

Arago a reconnu par l'expérience, qu'à des distances angulaires égales, en-deçà ou au-delà de l'angle de polarisation, la *proportion* de lumière polarisée dans le faisceau réfléchi est à très-peu près la même. Par exemple, le verre de Saint-Gobain a donné la même proportion de lumière polarisée sous les angles de $65^\circ 42'$ et $7^\circ 12'$; $63^\circ 54'$ et $7^\circ 55'$; $60^\circ 18'$ et $11^\circ 40'$, comptés à partir de la surface. Les moyennes entre ces couples d'angles sont $36^\circ 27'$, $35^\circ 55'$, $35^\circ 59'$, qui diffèrent peu de l'angle de polarisation de ce verre, angle qui est d'environ 35° . L'eau a donné des résultats analogues. Pour ces sortes d'expériences, on se sert de *polarimètres*, décrits plus loin (3021), qui font connaître la proportion de lumière polarisée que contient un faisceau.

On tire parti de la loi empirique d'Arago, pour trouver l'angle de polarisation *maximum* des substances qui polarisent faiblement : on cherche deux angles pour lesquels la polarisation soit la même, et l'on en prend la moyenne; ce qui est plus exact que de chercher le *minimum*, les variations d'intensité étant très-faibles quand on en approche.

2971. Polarisation par réflexions successives. — Brewster a reconnu qu'on peut polariser entièrement un faisceau, au moyen de plusieurs réflexions dans un même plan, sur des miroirs formés d'une matière incapable de polariser totalement sous aucun angle. Ces réflexions peuvent avoir lieu sous d'autres angles que celui de polarisation *maximum*; mais il faut alors un plus grand nombre de réflexions, résultats que la théorie nous expliquera.

Remarque. — Il ne faut pas confondre la *quantité absolue* de lumière polarisée, avec la *proportion* de cette lumière que contient un faisceau réfléchi. Par exemple, le verre réfléchit, sous l'angle de polarisation, 0,07 à 0,08 de la lumière incidente, et le faisceau réfléchi est entièrement polarisé. Si l'angle d'incidence augmente, la proportion de lumière réfléchie augmente aussi (2430), le faisceau réfléchi n'est plus totalement polarisé, et cependant il renferme une quantité de lumière polarisée plus grande que 0,08 de la lumière incidente. Il peut arriver, de même, que certaines substances douées d'un grand *pouvoir réflecteur* et ne polarisant qu'une faible proportion de lumière réfléchie, renvoient cependant plus de lumière polarisée que d'autres qui polarisent totalement, mais qui n'ont qu'un faible pouvoir réflecteur.

2972. Application de la polarisation par réflexion. — La polarisation que produit la réflexion, peut servir à reconnaître si les rayons qui partent d'un corps ont été réfléchis à sa surface. C'est ainsi qu'Arago a constaté que la lumière de la lune est polarisée par réflexion, quand elle est en croissant de manière à nous renvoyer des rayons obliques. C'est principalement dans les parties obscures, connues sous le nom de *mers*, que les signes de polarisation sont prononcés. — M. P. Blaserna a constaté, à Augusta, lors de l'éclipse totale de 1870, que la lumière de la couronne solaire est fortement polarisée par réflexion, d'où il a conclu qu'elle n'est pas lumineuse par elle-même là où il n'y a pas de protubérances. — M. W. Wright, au moyen d'un polariscope extrêmement sensible, a reconnu que la *lumière zodiacale* contient environ 15 à 20 pour 100 de lumière polarisée dans un plan passant par le soleil, ce qui confirme que cette lumière, dont le spectre paraît composé comme celui du soleil, est réfléchie sur d'innombrables petits corps tournant autour du soleil. La lumière des comètes est aussi en partie polarisée par réflexion; d'où l'on doit conclure qu'elle est, au moins en partie, empruntée au soleil et réfléchie; ce qui est d'accord avec les données du spectroscope (2652). La lumière de l'arc-en-ciel est polarisée dans le plan diamétral, ce qui montre qu'elle est réfléchie.

La polarisation a servi à Arago à reconnaître la nature de certaines pierres que l'on pensait être des diamants : il y tailla une petite facette, et constata que la polarisation était incomplète, comme pour le diamant, et que l'angle de polarisation était le même.

2973. Polarisation de la chaleur. — Les rayons de chaleur se *polarisent* comme les rayons lumineux, et dans les mêmes circonstances. Bérard, en 1821, obtint, le premier, de la chaleur polarisée par la réflexion sur un miroir de verre; une seconde réflexion servait à reconnaître l'état de polarisation, par les variations d'intensité des rayons réfléchis, avec l'angle des deux plans de réflexion. Un petit miroir métallique concave recevait les rayons après leur seconde réflexion, et les concentrait sur la boule d'un thermoscope de Rumford. Ces expériences ont été faites sous les yeux de Berthollet et Dulong, puis confirmées par Erman.

2974. Polarisation de l'atmosphère. — Arago a découvert, en 1809, que la lumière que nous renvoie l'atmosphère par un temps serein, est notablement polarisée. Cela se voit facilement avec le polariscope à lunules. Quand on s'écarte du soleil dans un plan vertical qui passe par cet astre et par l'œil, on constate bientôt des signes de polarisation, qui vont en augmentant jusqu'à 90° environ du soleil, puis diminuent, pour disparaître vers 150°. Le point où la polarisation est nulle se nomme *point neutre d'Arago*. Jusque-là le plan de polarisation est dans le plan qui contient l'astre; ce qui montre que la lumière atmosphérique est réfléchie. Au-delà du point neutre, la lumière se montre de nouveau partiellement polarisée, mais dans un plan horizontal. — En dehors du plan vertical, la lumière est polarisée dans le plan qui passe par le point visé et par l'œil et le centre du soleil, plan que M. H. Becquerel appelle *plan du soleil*.

Arago, Biot, Forbes ont attribué la lumière polarisée au-delà de 150°, à une double réflexion subie par des rayons solaires. En effet, la lumière atmosphérique provenant d'une seule réflexion émane d'une sorte de calotte illuminée qui envoie des rayons vers une molécule d'air considérée à part, et cette molécule les réfléchit en les polarisant. C'est surtout des parties de l'atmosphère voisines de l'horizon, que viennent les rayons qui, après une seconde réflexion, passent par l'œil de l'observateur. On peut donc regarder ces rayons comme partant d'un anneau horizontal, de manière que le plan de polarisation à la seconde réflexion sera à peu près horizontal. Près de l'horizon et à l'opposé du soleil, les rayons polarisés horizontalement l'emportent sur ceux qui sont polarisés verticalement après une seule réflexion. Au point neutre, ces deux sortes de rayons sont égaux, puis les derniers l'emportent quand on se rapproche du soleil.

Babinet a reconnu un second point neutre à 17° environ du soleil, et au-dessous duquel le plan de polarisation est horizontal; et Brewster, un troisième point, au-dessous de l'astre, vers 8° 36', très-difficile à saisir, au-dessous duquel le plan de polarisation est vertical, tandis qu'il est horizontal au-dessous. Ces deux points neutres semblent devoir être expliqués par les rayons qui, traversant directement l'atmosphère, sont polarisés *par réfraction* dans un plan horizontal, et neutralisent ceux qui sont polarisés par réflexion. Entre les deux points neutres de Babinet et de Brewster, on devrait donc trouver la lumière polarisée par réfraction, si l'éclat de l'astre ne rendait les observations impossibles.

La présence de quelques nuages suffit pour déplacer les points neutres et modifier la polarisation de l'air. Il n'y a pas de traces de lumière polarisée quand le ciel est entièrement couvert. Ajoutons enfin que Delezenne a constaté que l'atmosphère éclairée par la lune donne des signes de polarisation.

On a fait beaucoup d'expériences sur la polarisation atmosphérique, afin d'apporter quelque précision dans la description d'un phénomène essentiellement vague à cause des changements continuels qu'éprouve l'air dans sa pureté, son état d'humidité et de température. Parmi les recherches les plus étendues et les plus récentes, nous citerons celles de M. Henri Becquerel¹ faites au moyen d'appareils spéciaux permettant d'évaluer l'angle du plan de polarisation avec le plan du soleil. Le polariscope employé était celui que nous décrirons plus tard sous le nom de *polariscope de Savart*. Des nombreux résultats qu'il a recueillis, M. H. Becquerel a déduit que le plan de polarisation ne coïncide pas, en général, avec le plan du soleil; l'angle que ces plans font entre eux varie avec le point visé; et, pour un même point, avec la distance du soleil à l'horizon, et il peut prendre dans une même journée deux *maximum*. Le phénomène paraît lié aux conditions variables d'illumination secondaire de l'air, et peut être notablement modifié dans sa marche générale par les changements que peut éprouver cette illumination suivant l'état de l'atmosphère.

2975. De l'explication de la polarisation atmosphérique. — On voit, d'après ce qui précède, que la polarisation de l'atmosphère est attribuée, en général, à la réflexion de la lumière solaire sur les molécules d'air, ou sur les particules aqueuses ou autres qu'elle tient en suspension. M. Clausius a publié une savante théorie, dans laquelle il admet que la lumière solaire est réfléchi dans la mince pellicule d'eau qui forme les globules creux de la *vapeur vésiculaire*, pellicule dans laquelle cette lumière se colore, par interférence, en bleu, qui est la première teinte des anneaux de Newton. Mais nous avons vu (II, 1461) combien est peu soutenable l'hypothèse de la vapeur vésiculaire.

M. Lallemand² regarde la polarisation de l'atmosphère comme un cas particulier de l'illumination transversale des milieux transparents (2960). C'est dans la direction perpendiculaire aux rayons neutres que la polarisation est *maximum*, et c'est aussi à 90° du soleil que l'air est le plus fortement polarisé. Il résulte de là que la polarisation devrait être la même sur un cône ayant son sommet à l'œil de l'observateur et dont l'axe passerait par le centre du soleil; mais l'état de l'atmosphère est trop différent au-dessus et au-dessous de cet axe, pour que cette conséquence puisse se vérifier. M. Lallemand attribue, en même temps, le bleu du ciel à un effet de fluorescence quinique (2691), c'est-à-dire avec changement de réfrangibilité, due à une absorption partielle des rayons ultraviolets.

Une théorie qui se rapproche de la précédente a été aussi imaginée par

¹ *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. XIX, p. 90.

² *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. LXV, p. 707.

M. Tyndall¹, en prenant pour point de départ une sorte de nuage bleu qui se produit dans un long tube de Geisler contenant une vapeur très-raréfiée, et dont la faible lumière est complètement polarisée dans un plan passant par l'axe du tube. Ici, c'est l'électricité qui fournit la lumière polarisée.

2976. Applications. — Wheatstone a imaginé de déterminer l'heure, quand le ciel est pur, au moyen de la position du plan de polarisation de l'atmosphère. L'instrument qu'il emploie et qu'il nomme *horloge polaire*, se compose d'un tube mobile sur un pied, et qu'on dirige vers le pôle céleste. Ce tube est muni d'un polariscope très-sensible, pouvant tourner sur lui-même et au moyen duquel on cherche la position du plan de polarisation de l'air. Ce plan, passant à peu près par le soleil, coïncide avec le plan horaire. Un cercle, sur la moitié supérieure duquel sont marquées les heures, fait alors connaître l'heure approchée.

Les objets sombres vus au loin, à l'horizon, sont souvent voilés par une sorte de brouillard bleuâtre dû à l'air interposé (2699). M. Hagenbach, après avoir constaté que cette lumière bleuâtre est polarisée dans les mêmes conditions que celle qui vient du ciel pur, a imaginé de s'en débarrasser pour voir plus nettement les objets éloignés. Pour cela il arme l'oculaire d'une longue-vue d'un prisme de Nicol, qu'il tourne de manière à faire disparaître la lumière polarisée de l'atmosphère.

2977. Polarisation de la chaleur atmosphérique. — M. E. Wartmann a constaté que la chaleur réfléchie par l'atmosphère est polarisée dans le même plan que la lumière qu'elle nous renvoie² : les rayons calorifiques traversaient une pile de mica, ou un gros prisme de Nicol, faisant fonction d'analyseur, et placé dans un tube de carton dirigé vers la région atmosphérique à explorer. La pile thermo-électrique, destinée à faire connaître les variations d'intensité de ces rayons pendant que le prisme tournait, était renfermée dans une grande caisse de bois, et entourée de coton cardé, pour intercepter la chaleur extérieure. L'analyseur recevait son mouvement de rotation, par l'intermédiaire d'une longue tige à manche de bois. La caisse pouvait tourner autour d'un axe horizontal, de quantités mesurées par un arc divisé. M. Wartmann a reconnu, au moyen de cet appareil, que le plan de polarisation de la chaleur atmosphérique coïncide avec celui de la lumière, et qu'il y a aussi coïncidence des points neutres et des points de polarisation *maximum*.

II. Réflexion de la lumière polarisée et théorie mécanique de la réflexion.

2978. Lois expérimentales de la réflexion de la lumière polarisée.

— Tout ce que nous allons dire sur la réflexion de la lumière polarisée est vrai, quel que soit le moyen par lequel cette lumière a été polarisée.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XVI, p. 491.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIV, p. 341.

Le premier fait à constater est le changement d'intensité du rayon réfléchi quand on fait varier l'angle que le plan de polarisation fait avec le plan d'incidence, angle que l'on appelle l'*azimut* du plan de polarisation. Le *maximum* d'éclat a lieu quand le rayon est polarisé dans le plan d'incidence, ou dans le *premier azimut*; et le *minimum*, quand il est polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, ou dans le *second azimut*. C'est sur cette propriété que sont fondés les *polariscopes de réflexion* (2952). Il est à remarquer que les plus grandes *différences* d'éclat du rayon réfléchi se produisent, quand l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation de la substance réfléchissante; et, comme le rayon qui entre sous l'angle de polarisation à la première face d'une plaque, rencontre aussi la seconde sous l'angle de polarisation qui lui correspond (2968), on voit que, s'il échappe à la réflexion à la première face, il fera de même à la seconde, et émergera entièrement (en négligeant la partie absorbée); car ce qui n'est pas réfléchi est transmis intégralement. Un miroir qui est incapable de polariser complètement un faisceau, est aussi incapable d'éteindre complètement un faisceau polarisé de même intensité. Enfin, les corps qui polarisent à peine par réflexion, comme les métaux, ne donnent que des différences d'éclat très-faibles, quand on les emploie comme polariscopes. La réflexion totale, qui ne polarise pas du tout, ne peut non plus servir à reconnaître la lumière polarisée. Il y a donc réciprocité complète entre les polarisateurs et les polariscopes par réflexion.

Quand l'angle d'incidence restant constant, le miroir tourne autour du rayon polarisé incident, l'intensité du rayon réfléchi diminue, du premier azimut au second. Malus a admis que, *dans le cas de l'incidence sous l'angle de polarisation*, cette intensité est proportionnelle à $\cos^2\alpha$; α étant l'azimut du plan de polarisation. Si donc 1 est l'intensité du rayon réfléchi dans le premier azimut, cette intensité est nulle dans le second, et $\frac{1}{2}$, dans l'azimut de 45° . Cette loi suppose que la substance est capable de polariser complètement; elle a été vérifiée par Arago (3017), et nous verrons qu'elle se déduit de la théorie (2983).

Quant aux variations d'intensité du faisceau réfléchi, dans chaque azimut quand on s'écarte de l'angle de polarisation, elles sont représentées par des formules assez compliquées (2983), établies par la théorie et confirmées par l'expérience.

2979. Changement du plan de polarisation dans la réflexion. —

En même temps qu'un rayon polarisé se réfléchit, son plan de polarisation tourne en se rapprochant du plan de réflexion; et la *tangente du nouvel azimut est, pour chaque incidence, proportionnelle à la tangente du premier*. Il résulte de là que l'on pourra, par un certain nombre de réflexions successives dans des plans d'incidence parallèles entre eux, amener le plan de polarisation à être assez près du plan de réflexion pour qu'on puisse le regarder comme se confondant avec lui. Nous allons voir comment la théorie rend compte de ces divers résultats.

2980. Principes de Fresnel¹. —

Jamais on n'aurait soupçonné, avant

¹ Ann. de chim. et de phys., 2^e série, t. XLVI, p. 225.

Fresnel, qu'il fût possible de représenter par des formules, la proportion de lumière réfléchie par un miroir, en fonction de l'indice de sa substance et de l'angle d'incidence. Il est vrai que Fresnel a dû, pour obtenir ce résultat, partir de certains principes mécaniques relatifs aux mouvements vibratoires, qui n'avaient pas été démontrés de son temps et qu'il devina par un effort de génie. Mais, outre que ces principes sont très-probables *a priori*, les formules auxquelles ils ont conduit ont été vérifiées si complètement par l'expérience, qu'on pouvait les regarder comme prouvés *a posteriori*. Du reste, ils ont été démontrés depuis par Cauchy. Voici en quoi ils consistent :

1^o De part et d'autre de la surface de séparation de deux milieux, l'éther possède la même élasticité; mais sa densité est différente, étant la plus grande dans le milieu le plus réfringent.

2^o Quand une onde arrive à la surface de séparation de deux milieux, la force vive qu'elle apporte est égale à la somme des forces vives de l'éther ébranlé dans l'onde réfléchie et dans l'onde réfractée. C'est-à-dire que le produit par le carré de la vitesse de vibration, d'une masse d'éther prise dans le faisceau incident et ayant une épaisseur égale à une longueur d'ondulation, est égal à la somme des produits correspondants relatifs aux ondes réfléchie et réfractée. Ce principe, qui nous a déjà servi dans l'étude du choc des corps élastiques, est général en mécanique, pour des points dont les vitesses ne changent qu'en vertu de leur liaison mutuelle.

3^o Les couches de molécules d'éther des deux milieux, très-voisines de la surface de séparation, oscillent de la même manière; les mouvements qui correspondent à l'onde incidente et à l'onde réfléchie se communiquent à l'onde réfractée, de manière que la composante parallèle à la surface de séparation, de la vitesse de l'éther dans cette dernière onde, est égale à la somme des composantes des vitesses de l'éther dans les ondes incidente et réfléchie. Cela tient à la solidarité des molécules contiguës, qui sont liées entre elles par les forces dont dépend l'élasticité de l'éther. Mais ce principe n'est pas aussi évident que le précédent, et il a fallu l'accord remarquable entre les résultats auxquels il a conduit et ceux de l'expérience, pour qu'on ait pu l'admettre, avant que Cauchy ne l'eût démontré par l'analyse.

Remarque. — Fresnel admet encore, et sans cela les formules ne représenteraient plus les phénomènes, que, dans l'acte de la réflexion, les vibrations n'éprouvent pas de changement de phases; en d'autres termes, que « les périodes de vibration des ondes incidente et réfléchie coïncident, à la surface de séparation des deux milieux. » Or, il n'en est ainsi que pour quelques rares substances, comme l'alun et la ménilite, et à fort peu près pour le verre. Pour les autres corps, particulièrement pour ceux qui ont un grand indice de réfraction, le rayon réfléchi n'est pas polarisé dans un plan, mais éprouve la *polarisation elliptique*. Si donc les expériences de Seebeck et de Brewster sur les corps les plus réfringents, ont donné des résultats d'accord avec les formules, il faut l'attribuer aux procédés de mesure, trop peu précis pour permettre d'apprécier de très-

petites différences. Nous allons considérer ici le cas où il n'y a pas de différence de phase; nous nous occuperons du cas général en traitant de la polarisation elliptique.

2981. Réflexion de la lumière polarisée dans le plan d'incidence.

— Dans ce cas, les mouvements vibratoires de l'éther, perpendiculaires au plan de polarisation, le sont aussi au plan d'incidence (2960). Concevons deux tranches, dm , nc (fig. 2053), l'une dans le faisceau incident, l'autre dans le faisceau réfracté, et ayant pour épaisseurs les longueurs d'ondulation λ et λ' . Les masses d'éther contenues dans ces tranches sont $\overline{mp} \cdot \lambda \cdot d$, et $\overline{nq} \cdot \lambda' \cdot d'$, en représentant par d et d' les densités de l'éther. On a aussi $\overline{mp} = \overline{mn} \cos i$, et $\overline{nq} = \overline{mn} \cos r$, et $\lambda : \lambda' = V : U = \sin i : \sin r$, en désignant par V et U les vitesses de propagation de la lumière dans les deux milieux et, par i et r les angles d'incidence et de réfraction. Le rapport entre les deux masses d'éther est donc $d \sin i \cos i : d' \sin r \cos r$. Or, la formule de Newton (2822) donne $V^2 = e : d$, et $U^2 = e : d'$; e étant l'élasticité de l'éther, *supposée la même dans les deux milieux* (2980). D'où $d' : d = V^2 : U^2 = \sin^2 i : \sin^2 r$; et le rapport devient

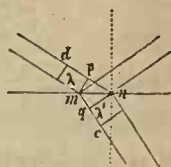


Fig. 2053.

$$\frac{\sin i \cos i}{V^2} : \frac{\sin r \cos r}{U^2} \text{ ou } \frac{\cos i}{\sin i} : \frac{\cos r}{\sin r}.$$

Écrivons maintenant que la force vive dans le faisceau incident est égale à la somme des forces vives dans les faisceaux réfléchis et réfractés; il vient, en appelant 1 , v et u les vitesses de vibration dans les rayons *incident, réfléchi et réfracté*,

$$[x] \frac{\cos i}{\sin i} \cdot 1^2 = \frac{\cos i}{\sin i} v^2 + \frac{\cos r}{\sin r} u^2; \text{ ou } (1 - v^2) \cos i \sin r = u^2 \sin i \cos r.$$

Une seconde relation entre u et v est donnée par le troisième principe (2980), et si l'on admet que les vibrations se font *dans la surface même, normalement au plan d'incidence*, on a $u = v + 1$. En éliminant successivement u et v entre cette équation et la précédente, après avoir remplacé $1 - v^2$ par $(1 - v)(1 + v)$, on obtient

$$v = -\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)}, \quad u = \frac{2 \cos i \sin r}{\sin(i + r)}.$$

Fresnel est arrivé aux mêmes résultats, en partant des formules du choc des corps élastiques. Quand un corps en choque un autre en repos, les vitesses après le choc sont ici $v = \frac{m - m'}{m + m'}$, et $u = \frac{2m}{m + m'}$ (I, 555); et l'on remplace m et m' par $\cos i : \sin i$ et $\cos r : \sin r$.

On voit que si l'on a $i > r$, c'est-à-dire si le second milieu est plus réfringent que le premier, la vitesse v est négative, c'est-à-dire qu'elle change

brusquement de signe dans la réflexion, ce qui revient à un retard de $\frac{1}{2} \lambda$ dans le rayon réfléchi. Nous retrouvons donc ici le principe d'Young, qui nous a servi dans la théorie des couleurs produites dans les lames minces (2913).

Intensité du rayon réfléchi. — L'analyse mathématique prouve que l'intensité d'un rayon lumineux est proportionnelle au carré de la vitesse de vibration. Si donc on désigne par 1 l'intensité du rayon incident, et par a^2 celle du rayon réfléchi, on aura, en développant $\sin(i - r)$ et $\sin(i + r)$ et remplaçant $\sin r$ et $\cos r$ par leur valeur en fonction de i et de l'indice n

$$[1] \quad a^2 = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)}, \quad \text{ou} \quad a^2 = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \cos i} \right)^2,$$

Discussion. — Quand l'angle d'incidence augmente, a^2 augmente aussi d'une manière continue, depuis $i = 0$, jusqu'à $i = 90^\circ$. En effet, i étant toujours moindre que 90° , $\frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)}$ est plus grand que $\frac{n - 1}{n + 1}$; car $\sin(i - r)$ surpasse $\sin i - \sin r = (n - 1) \sin r$, d'autant plus que r est plus grand; au contraire, $\sin(i + r)$ est toujours inférieur à $\sin i + \sin r$, ou $(n + 1) \sin r$; d'autant plus que r est aussi plus grand. La valeur de $\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)}$ surpasse donc $\frac{\sin i - \sin r}{\sin i + \sin r} = \frac{(n - 1) \sin r}{(n + 1) \sin r} = \frac{n - 1}{n + 1}$, d'autant plus que r est plus grand. Comme cette dernière fraction est constante, la première augmente d'une manière continue avec r et, par conséquent, avec i ; et son *minimum* a lieu pour $i = 0$, qui donne $a^2 = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$, et son *maximum*, pour $i = 90^\circ$, qui donne $a^2 = 1$, auquel cas le rayon incident est couché sur la surface réfléchissante.

2982. Réflexion suivant un plan perpendiculaire au plan de polarisation. — Dans ce cas, les mouvements vibratoires s'accomplissent dans le plan d'incidence. La première équation $[\alpha]$, relative au principe de la conservation des forces vives, reste la même : $(1 - v'^2) \cos i \sin r = u'^2 \sin i \cos r$. Mais la seconde doit être modifiée; car les mouvements de l'éther n'étant pas parallèles à la surface réfléchissante, il faut considérer, au lieu des vitesses, leurs composantes parallèles à cette surface, composantes qui sont $1 \cdot \cos i$; $v' \cos i$; et $u' \cos r$. L'équation $u = v + 1$ est donc remplacée ici par $u' \cos r = (1 + v') \cos i$. En éliminant successivement u' et v' entre cette équation et la première, on trouve

$$[2] \quad v' = \frac{\sin r \cos r - \sin i \cos i}{\sin r \cos r + \sin i \cos i} = -\frac{\text{tang}(i - r)}{\text{tang}(i + r)}; \quad u' = \frac{2 \cos i \sin r}{\sin i \cos i + \sin r \cos r}.$$

Si i est plus grand que r , c'est-à-dire si le second milieu est plus réfringent que le premier, la valeur de v' sera négative quand $i + r$ sera moindre que 90° , c'est-à-dire quand i sera moindre que l'angle de polarisation; elle sera

positive dans le cas contraire. L'intensité b^2 du rayon réfléchi sera, en prenant toujours pour unité celle du rayon incident :

$$[2] \quad b^2 = \frac{\text{tang}^2(i-r)}{\text{tang}^2(i+r)} = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - n^2 \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + n^2 \cos i} \right)^2.$$

Discussion. — Pour $i = 0$, on a $b^2 = (n-1)^2 : (n+1)^2$. C'est la même valeur que dans le cas précédent ; ce qui se conçoit, car, le rayon incident étant normal, les mouvements vibratoires s'exécutent dans la surface réfléchissante, et l'intensité du rayon réfléchi doit être indépendante de leur direction. Pour $i = 90^\circ$, on a encore $b^2 = 1$. Mais la valeur de b^2 ne croît pas d'une manière continue de $i = 0$ à $i = 90^\circ$; car, en considérant la première forme de la valeur de b^2 , on voit qu'elle devient nulle quand on fait $i + r = 90^\circ$. Un rayon polarisé perpendiculairement au plan d'incidence ne donne donc plus de rayon réfléchi, quand le rayon incident est perpendiculaire au rayon réfracté, c'est-à-dire quand l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation ; on retrouve donc la loi de Brewster (2965).

Rayons de chaleur. — MM. de La Provostaye et P. Desains ont vérifié les formules [2], et [1] (2981) sur les rayons calorifiques polarisés. Ces rayons tombaient sur un miroir de verre, de manière que le plan d'incidence coïncidât avec le plan de polarisation, ou lui fût perpendiculaire. Les intensités des rayons réfléchis mesurées au moyen du thermomultiplicateur, ont toujours été d'accord avec celles que donnent les formules de Fresnel. Le nombre adopté pour l'indice de réfraction du verre pour la chaleur était 1,45. — Des expériences semblables faites sur des rayons de chaleur non polarisés, ont aussi donné des résultats d'accord avec ceux que l'on déduit d'une autre formule étudiée plus loin (2986), relative au cas de la réflexion des rayons lumineux naturels.

2983. Réflexion dans un plan oblique au plan de polarisation. — Les mouvements vibratoires sont, dans ce cas, obliques au plan d'incidence. Décomposons la vitesse de vibration dans le rayon incident, en deux composantes situées dans un plan normal à ce rayon, et l'une perpendiculaire au plan d'incidence et l'autre dans ce plan. En représentant toujours par 1 la vitesse de vibration du rayon incident ; et par α l'angle du plan de polarisation avec le plan d'incidence, $\cos \alpha$ et $\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$ seront les vitesses composantes. La lumière incidente polarisée dans l'azimut α , peut donc être regardée comme la somme de deux faisceaux, l'un d'intensité $\cos^2 \alpha$, polarisé dans le plan d'incidence, l'autre d'intensité $\sin^2 \alpha$, polarisé normalement à ce plan, et donnant (2981, 2982) des faisceaux réfléchis, d'intensité

$$[3] \quad r = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \cos^2 \alpha, \quad \text{et} \quad r' = \frac{\text{tang}^2(i-r)}{\text{tang}^2(i+r)} \sin^2 \alpha.$$

La somme de ces deux faisceaux réfléchis donnera, pour l'intensité du faisceau total réfléchi

$$[4] \quad R = r + r' = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \cos^2 \alpha + \frac{\text{tang}^2(i-r)}{\text{tang}^2(i+r)} \sin^2 \alpha;$$

car deux faisceaux polarisés à angle droit ne peuvent se détruire, ni même s'affaiblir mutuellement. — Cette formule comprend les deux cas précédents, en y faisant successivement $\alpha = 0$ et $\alpha = 90^\circ$.

Si α est égal à 45° , on a $\cos^2 \alpha = \sin^2 \alpha = \frac{1}{2}$, et la formule devient

$$[5] \quad R = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \right),$$

résultat qui convient au cas de deux rayons d'intensité $\frac{1}{2}$, polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire; et aussi au cas où ils sont polarisés dans deux plans perpendiculaires l'un à l'autre et inclinés sur le plan d'incidence; car les angles qu'ils font alors avec ce plan sont α et $90^\circ - \alpha$, et pour avoir la somme de leurs intensités, il faut multiplier le premier terme de la formule [5] par $[\cos^2 \alpha + \cos^2(90^\circ - \alpha)]$, et le second terme par $[\sin^2 \alpha + \sin^2(90^\circ - \alpha)]$, facteurs égaux à l'unité.

Si nous supposons i égal à l'angle de polarisation, il faut faire $i + r = 90^\circ$ (2965), et la formule [4] devient $R = \sin^2(i-r) \cos^2 \alpha$. L'intensité est donc proportionnelle à $\cos^2 \alpha$, comme l'avait admis Malus (2978).

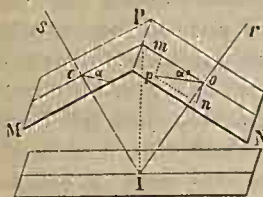


Fig. 2054.

Remarque. — Pour établir les calculs qui précèdent, Fresnel a supposé que l'élasticité de l'éther est la même dans tous les milieux homogènes (2980) et que sa densité est variable. MM. Neumann et Mac-Cullagh ont supposé, au contraire, que l'élasticité change d'un milieu à un autre, et que la densité de l'éther est invariable. Cette nouvelle hypothèse conduit aussi à

dés formules que vérifie l'expérience, mais à la condition d'admettre que les vibrations de l'éther se font dans le plan de polarisation, supposition qui ne peut être adoptée, comme nous l'avons vu plus haut (2960). En outre, l'hypothèse d'une densité identique dans les différents milieux est incompatible avec le phénomène, constaté par M. Fizeau (2853), de l'entraînement d'une partie de l'éther par les milieux en mouvement, qui montre l'action, nécessairement variable, exercée par les molécules pondérables, sur l'éther qu'elles condensent autour d'elles.

2984. Changement du plan de polarisation par la réflexion. — Les deux rayons polarisés à angle droit, dans lesquels se décompose un rayon polarisé dans un azimut quelconque, se trouvant dans la même phase au point d'incidence, et leur rapport d'intensité restant le même dans le rayon réfléchi, à toute distance de ce point, la résultante des vitesses sera partout dirigée dans le même plan, de sorte que le rayon réfléchi sera encore polarisé.

Mais le plan de polarisation, dont la position dépend du rapport entre les deux vitesses, ne sera pas le même que dans le rayon incident. En effet, soient PM et PN (fig. 2054), des plans perpendiculaires aux rayons, incident SI et

réfléchi Ir ; sIr le plan d'incidence, xcI le plan de polarisation du rayon incident, et poI celui du rayon réfléchi, dont on cherche l'azimut $\alpha' = mop$. Si nous décomposons la vitesse de vibration op en deux autres, l'une om dans le plan d'incidence, et l'autre on perpendiculaire à ce plan, nous aurons $\text{tang } \alpha' = on : om$. Les vitesses on et om se calculent au moyen des formules $[\alpha]$ (2981) et $[\beta]$ (2982), en multipliant les expressions trouvées pour v et v' , par $\sin \alpha$ et par $\cos \alpha$, parce que les intensités des rayons considérés sont ici $\sin \alpha$ et $\cos \alpha$, au lieu de 1. On trouve ainsi

$$om = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \cos \alpha; \quad on = pm = -\frac{\text{tang}(i-r)}{\text{tang}(i+r)} \sin \alpha;$$

$$[6] \quad \text{d'où } \text{tang } \alpha' = \frac{pm}{om} = \text{tang } \alpha \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)},$$

On voit que α' étant, en général, différent de α , le plan de polarisation tourne d'une certaine quantité, par la réflexion.

Quand le rayon incident est dirigé suivant la normale, on a $i = 0$, $r = 0$ et α' est égal à α . Ce résultat était facile à prévoir; car alors les vibrations ont lieu dans la surface réfléchissante, et il n'y a pas de raison pour qu'elles changent de direction. — Si l'on a $i + r = 90^\circ$, c'est-à-dire si l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation, il vient $\alpha' = 0$, quel que soit α ; ce qui montre que, *sous l'angle de polarisation*, le rayon réfléchi est toujours polarisé dans le plan de réflexion. Par conséquent, si le rayon incident était polarisé dans le plan d'incidence, le plan de polarisation ne changerait pas. Il en serait de même s'il était polarisé perpendiculairement au plan d'incidence; car, pour $\alpha = 90^\circ$, on a $\text{tang } \alpha = \infty$, et par conséquent $\text{tang } \alpha' = \infty$, et $\alpha' = 90^\circ$. Tous ces résultats sont conformes à l'expérience.

Le rapport $\cos(i+r) : \cos(i-r)$ étant moindre que l'unité, la formule [6] montre que α' est toujours moindre que α , sauf dans les cas particuliers où il lui est égal. La réflexion a donc pour effet de rapprocher le plan de polarisation, du plan d'incidence; et si le rayon se réfléchit un certain nombre de fois sur plusieurs miroirs, le plan d'incidence restant constant, son plan de polarisation finira par se confondre sensiblement avec le plan d'incidence. Le nombre des réflexions nécessaires pour cela sera d'autant plus grand que les angles d'incidence aux diverses réflexions différeront plus de l'angle de polarisation, et que l'angle α sera plus grand. Ce nombre pourra se calculer au moyen de la formule [6], en y remplaçant successivement α par les différents angles $\alpha', \alpha'', \dots, \alpha_n$, trouvés successivement, jusqu'à ce que $\text{tang } \alpha$ soit négligeable; mais α ne pourra jamais être nul.

La formule [6] a été vérifiée par Arago sur le verre et sur l'eau. Les appareils de Biot et de Seebeck (2965) peuvent servir à cette vérification; on fait tomber sur la surface réfléchissante, un faisceau polarisé dans un plan connu, et l'on cherche, avec le polariscope p , la position du plan de polarisation dans le faisceau réfléchi. Brewster, qui a fait beaucoup d'expériences à ce sujet, a trouvé un

accord satisfaisant entre la théorie et l'observation; mais les procédés qu'il employait ne pouvaient être très-précis, car l'accord existe au même degré pour le diamant, et nous verrons que les formules ne peuvent s'appliquer à ce corps, à cause du changement de phase dont nous avons déjà dit un mot (2980).

La formule [6] peut aussi servir à calculer l'*indice de réfraction*; car elle donne la valeur de r quand on connaît α , α' et i . C'est là un des moyens qu'a employés Fresnel pour contrôler sa formule. Il a trouvé un accord satisfaisant entre les indices ainsi calculés et ceux que donnent les mesures directes.

III. Théorie de la polarisation par réflexion.

2985. Un faisceau naturel revient à deux faisceaux égaux polarisés à angle droit. — La lumière naturelle est produite par des mouvements vibratoires ayant lieu successivement dans tous les sens à la surface de l'onde (2959). Chacun de ces mouvements peut être décomposé en deux autres, suivant deux directions constantes perpendiculaires entre elles; de sorte que le rayon peut être remplacé par deux autres, polarisés dans des plans perpendiculaires entre eux. La différence entre les composantes qui se succèdent en un point du rayon, varie à chaque instant, les directions des résultantes qui les fournissent changeant sans cesse; mais la rapidité de ces changements est telle, que, dans une longueur du rayon parcourue en un temps bien moindre que la durée de la sensation, les sommes de composantes sont égales dans les deux plans; de sorte que les deux rayons composants ont la même intensité. Un rayon naturel d'intensité 1 peut donc être regardé comme formé de deux rayons polarisés à angle droit et d'intensité $\frac{1}{2}$. Un semblable rayon se réfléchit également dans tous les azimuts; l'intensité du rayon réfléchi étant donnée par la formule [5] (2983). — Cette décomposition d'un rayon naturel en deux autres polarisés à angle droit est réalisée dans la double réfraction; car nous verrons que les deux rayons dans lesquels se partage le rayon incident, sont polarisés dans des plans rectangulaires (3005).

2986. Intensité de la lumière naturelle réfléchie. — D'après ce qui précède, un faisceau de lumière naturelle d'intensité 1 peut être remplacé par deux faisceaux d'intensité $\frac{1}{2}$ polarisés dans des plans perpendiculaires, dont un dans le plan d'incidence. Or, ces deux rayons fournissent, à la réflexion, des intensités données par les formules [1] (2981) et [2] (2982),

$$[7] \quad \frac{1}{2} a^2 = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}, \quad \text{et} \quad \frac{1}{2} b^2 = \frac{1}{2} \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)}.$$

L'intensité du rayon réfléchi sera donc leur somme $N = \frac{1}{2}(a^2 + b^2)$. Cette somme va en augmentant quand i passe de 0° à 90° . Si l'on exprime a^2 et b^2 en fonction de n et de i , comme il a été fait plus haut (2981, 2982), on voit facilement que, pour $i = 0$, l'intensité N devient $\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$; et 1, pour

$i = 90^\circ$. Sous l'angle de polarisation, on a $i + r = 90^\circ$, et il vient $N = \frac{1}{2} \sin^2 (i - r) = \frac{1}{2} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2$, car on a $\tan g i = n$ (2963). La valeur de N est moindre que 1, et plus grande que $\left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$; car elle revient à $\frac{1}{2} \frac{n - 1}{n + 1} \cdot \frac{n + 1}{n + 1}$. La lumière réfléchie augmente donc avec l'angle d'incidence. Pour le verre, dont l'indice est 1,5, les valeurs qui correspondent à $i = 0$, $i + r = 90^\circ$, et $i = 90^\circ$, sont 0,04; 0,15 et 1. Dans le cas de l'incidence normale; et, en ne considérant que les rayons réfléchis à la première surface, on trouve

pour l'eau,	le sel gemme,	le cristal de roche,	le diamant,
0,0195	0,045	0,048	0,175

On voit pourquoi le diamant jette un si vif éclat. Les nombres qui correspondent au sel gemme, au verre et au cristal de roche, diffèrent très-peu de ceux que Melloni avait trouvés pour les quantités de chaleur réfléchies par les mêmes substances. Cela se conçoit facilement, la position des rayons calorifiques dans le spectre montrant que l'indice de réfraction de ces rayons diffère peu de celui des rayons lumineux.

Si la lumière incidente était en partie polarisée, on la considérerait comme composée de deux faisceaux : l'un polarisé, d'intensité p ; l'autre naturel, d'intensité $1 - p$. L'intensité du rayon réfléchi par le premier serait donnée par la formule [4] $R = p (r + r')$, (2983), et celle du faisceau réfléchi par le second, par la formule $N = (1 - p) \frac{1}{2} (a^2 + b^2)$.

2987. Explication de la polarisation par réflexion. — Les formules [7] (2986) montrent que a est plus grand que b ; car, en multipliant et en divisant chaque terme de a par le *cosinus* de l'angle, il vient $\frac{\tan g^2 (i - r) \cos^2 (i - r)}{\tan g^2 (i + r) \cos^2 (i + r)}$, quantité plus grande que b , puisque $\cos (i + r)$ est moindre que $\cos (i - r)$. Ce résultat nous montre que le rayon composant polarisé dans le plan d'incidence, ou en d'autres termes, que les mouvements *perpendiculaires* à ce plan, se réfléchissent en plus grande proportion que ceux qui s'accomplissent dans ce plan. De là la plus grande abondance des premiers mouvements dans le faisceau réfléchi, et, par conséquent, *la polarisation partielle de ce dernier dans le plan de réflexion.*

Proportion de lumière polarisée. — L'intensité de la lumière non polarisée est représentée par $\frac{1}{2} b^2$, et la quantité polarisée dans le plan d'incidence, par l'excès $\frac{1}{2} a^2$ du rayon polarisé dans ce plan, sur le rayon, $\frac{1}{2} b^2$, polarisé en sens contraire, c'est-à-dire par $\frac{1}{2} (a^2 - b^2)$. La *proportion* de lumière polarisée dans le plan d'incidence est donc

$$[8] \quad p = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} = \frac{\cos^2 (i - r) - \cos^2 (i + r)}{\cos^2 (i - r) + \cos^2 (i + r)},$$

en remplaçant les *sinus* par leur valeur en fonction de la tangente et du cosinus, comme nous venons de le faire pour prouver qu'on a $a > b$.

Discussion. — La proportion de lumière polarisée est nulle quand le rayon incident est normal à la surface réfléchissante; car, pour $i = 0$ et $r = 0$, on a $P = 0$; ce que Malus avait découvert par l'expérience. On a encore $P = 0$ quand $i = 90^\circ$, c'est-à-dire quand le rayon incident est couché sur la surface. Si nous supposons $i + r = 90^\circ$, nous aurons $P = 1$; toute la lumière réfléchie sera donc polarisée, et nous retrouvons la *loi de Brewster* (2965).

Si l'on veut l'incidence pour laquelle la quantité absolue de lumière polarisée est *maximum*, il faut calculer la valeur de i qui rend $\frac{1}{2}(a^2 - b^2)$ *maximum*. Le calcul conduit à la relation $\cos(i + r) = \cos^3(i - r)$. Pour le verre, on a $n = 1,5$, et l'on trouve $i = 79^\circ$, et 0,193 de lumière polarisée. L'intensité totale de la lumière réfléchie est 0,315; de sorte que la proportion de lumière polarisée est 0,44. Sous l'angle de polarisation, toute la lumière est polarisée, mais son intensité n'est que 0,074 de la lumière incidente.

2983. Explication synthétique de la polarisation par réflexion. —

Le déplacement du plan de polarisation par la réflexion (2984), qui le rapproche du plan d'incidence, peut servir à rendre compte de la polarisation par réflexion; car la réflexion a pour effet de rapprocher les directions des mouvements vibratoires, de la perpendiculaire à ce plan. Or, cette influence doit se faire sentir sur chaque vibration individuellement; elle agira donc ainsi sur la direction de chacune des vibrations différemment orientées qui se succèdent dans un rayon naturel, et cette direction se trouvera, pour toutes, rapprochée de la perpendiculaire au plan de réflexion. Le *rayon composant* polarisé dans ce plan l'emportera donc en intensité sur l'autre. Si le rayon tombe sous l'angle de polarisation, chacune des vibrations sera amenée à être à très-peu près perpendiculaire au plan de réflexion, puisque nous avons vu que le rayon réfléchi est alors polarisé dans le plan de réflexion (2984), et le rayon naturel se trouvera presque entièrement polarisé.

Remarque. — La théorie semble indiquer que le rayon réfléchi sous l'angle de polarisation est toujours entièrement polarisé; ce qui est contraire à l'expérience. Mais n'oublions pas que nous avons supposé, avec Fresnel, que la réflexion n'apportait pas de changement de phase dans les mouvements vibratoires; ce qui n'a lieu, comme nous en avons averti (2980), que pour les rares substances qui polarisent complètement. Le verre et l'eau sont à peu près dans ce cas; aussi, Arago a-t-il trouvé, par des expériences sur ces corps, la formule [8] exacte. Il procédait en cherchant les incidences pour lesquelles le rayon réfléchi renfermait toujours la même *proportion* de lumière polarisée, au moyen d'un *polarimètre* qui donne cette proportion et que nous décrirons plus loin. Ed. Desains¹ a aussi vérifié cette formule sur le verre, par la même méthode, comme nous aurons occasion de l'expliquer (3022).

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXI, p. 286.

2989. Polarisation par des réflexions successives. — L'augmentation de la proportion de lumière polarisée par des réflexions successives s'explique facilement, en considérant le faisceau partiellement polarisé comme composé de rayons polarisés et de rayons à l'état naturel. En effet, les miroirs étant tous perpendiculaires au premier plan d'incidence, et par conséquent au plan de polarisation, la portion polarisée du faisceau sera réfléchie presque totalement, pendant que la portion naturelle se partagera en deux parties, l'une transmise, l'autre réfléchie, polarisée en partie et s'ajoutant à la portion polarisée déjà réfléchie. On voit qu'il faudra un nombre infini de réflexions pour obtenir un faisceau totalement polarisé, s'il s'agit d'une substance qui ne polarise complètement sous aucun angle, puisqu'une partie seulement de la lumière naturelle réfléchie se polarise. Mais après un certain nombre de réflexions, la proportion de lumière naturelle sera négligeable.

2990. Système de Brewster sur la lumière partiellement polarisée. — Au lieu de regarder la lumière incomplètement polarisée comme un mélange de lumière naturelle et de lumière totalement polarisée, Brewster a cru pouvoir conclure de ses expériences sur les réflexions multiples, qu'aucun rayon élémentaire du faisceau n'est entièrement polarisé. Il admet que la réflexion imprime aux rayons un changement physique, qui les rend plus aptes à être polarisés par une nouvelle réflexion. Un rayon partiellement polarisé est celui dans lequel les plans de polarisation des faisceaux composants polarisés à angle droit, dans lesquels on décompose la lumière neutre, se sont rapprochés du plan d'incidence. La polarisation, dans ce système, admettrait donc des degrés. Cette manière de voir et celle qu'adoptent les physiciens français, ne sont en réalité que deux modes différents de représenter un même fait, et, au fond, elles ne sont pas incompatibles l'une avec l'autre. Toutes les deux peuvent servir à rendre compte de la polarisation partielle; nous adopterons cependant de préférence le langage qui se rapporte à la première, comme se prêtant plus facilement à une interprétation simple des phénomènes.

§ 3. — POLARISATION PAR RÉFRACTION SIMPLE, ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE

I. Lois de la polarisation par réfraction.

2991. Polarisation par réfraction. — La polarisation par réfraction simple a été découverte, en 1811, par Malus, Biot et Brewster, chacun de leur côté. Pour constater ce phénomène, on dispose, à la place du miroir *m* de l'appareil de Biot (2962), un prisme de verre, et on le tourne de manière que le rayon réfracté à son entrée, en sorte perpendiculairement à la face d'émergence, comme on le voit en P (fig. 2048). Si l'on fait tourner le polariscope placé en *p*, on observe des *maximum* et des *minimum* d'intensité, mais

peu prononcées, ce qui indique que la lumière n'est polarisée qu'en assez faible proportion. On peut aussi placer le prisme au centre de l'appareil qui sert aux lois de la réfraction (2962).

Le plan de polarisation est *perpendiculaire* au plan de réfraction; si donc on reçoit le rayon polarisé, sur un miroir de verre, le *maximum* d'éclat a lieu quand le plan d'incidence sur ce miroir est perpendiculaire au plan d'incidence sur le prisme. Si le rayon sort obliquement par la seconde face du prisme, ou traverse obliquement une lame à faces parallèles, une nouvelle portion de lumière est polarisée à la sortie, et dans le même plan qu'à l'entrée. — On voit que lorsqu'un rayon tombe sur la surface d'un milieu diaphane, le rayon réfléchi et le rayon transmis sont polarisés dans des plans perpendiculaires; ils sont dits *polarisés à angle droit*, ou *en sens inverse*.

2992. Égalité des quantités de lumière polarisées par réflexion et par réfraction. — Arago a prouvé par l'expérience suivante, que les *quantités absolues* de lumière polarisée dans les faisceaux réfracté et réfléchi sont égales.

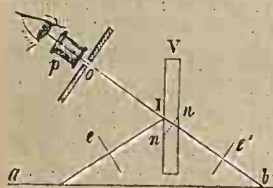


Fig. 2055.

On dispose une lame de verre à face bien parallèle V (fig. 2055) perpendiculairement à une feuille de papier *ab* éclairée uniformément, et l'on regarde obliquement, à travers l'ouverture *o* d'un écran, la lumière transmise et réfléchie venant des parties *a* et *b* de la feuille. L'œil étant armé d'un prisme biréfringent *p*, on voit deux images de l'ouverture *o*.

Soit *P* la quantité de lumière polarisée, et *N* la quantité de lumière naturelle que contient le faisceau réfléchi. Si l'on dirige la section principale du cristal dans le plan d'incidence, la partie naturelle *N* se partagera entre les deux images, tandis que la partie polarisée sera tout entière dans l'image ordinaire (2954). Les intensités de ces images seront donc $P + \frac{1}{2} N$, et $\frac{1}{2} N$, et on les observerait seules, si l'on interceptait les rayons transmis, au moyen d'un écran noir *e'*. Ces rayons transmis sont eux-mêmes composés d'une partie polarisée *P'*, et d'une partie naturelle *N'*. Le plan de polarisation étant perpendiculaire au plan d'incidence, le faisceau ordinaire aura pour intensité $\frac{1}{2} N'$, et le faisceau extraordinaire $P' + \frac{1}{2} N'$, et on les observerait en plaçant un écran en *e*. Si maintenant on laisse passer à la fois les rayons réfléchis et transmis, les images se superposeront deux à deux, l'intensité de l'image ordinaire sera $P + \frac{1}{2} N + \frac{1}{2} N'$, et celle de l'image extraordinaire, $P' + \frac{1}{2} N' + \frac{1}{2} N$. Or, l'expérience montre que ces intensités sont égales. Il faut donc que l'on ait $P = P'$. L'expérience se fait facilement avec l'appareil photométrique d'Arago, que nous décrivons plus loin (3013).

Dans cette expérience, il y a deux réfractions, à l'entrée et à la sortie du rayon, et à chacune d'elles il se fait une polarisation partielle; mais il y a aussi deux réflexions, aux deux faces de la lame. On peut, du reste, comparer les

rayons n'ayant subi qu'une seule réfraction et qu'une seule réflexion, en taillant la lame en biseau *mn* (fig. 2055), de manière que le rayon *bl* entrant normalement, ne soit polarisé qu'à sa sortie en *l*, et couvrant d'un écran noir une partie de la surface *ab*, de manière à intercepter les rayons qui, réfléchis à la seconde face, *n*, se joindraient au rayon *lo*.

2993. Conséquences. — 1° La loi qui précède nous donne l'explication de ce fait d'expérience, qu'il n'y a pas de polarisation dans la réflexion totale et dans la réflexion rasante; en effet, le rayon réfracté ne contenant pas, dans ces deux cas, de lumière polarisée, puisqu'il n'existe pas, le rayon réfléchi n'en doit pas non plus contenir. — 2° Il n'y a pas de polarisation dans la réflexion sous l'incidence normale; il n'y a donc pas, dans le même cas, de lumière polarisée dans le rayon réfracté. — 3° Le *maximum absolu* de lumière polarisée par réfraction aura lieu sous la même incidence que le *maximum* de lumière polarisée par réflexion, c'est-à-dire, pour le verre, sous l'incidence de 79°. Mais il n'y a pas *maximum* sous l'angle de polarisation dans la *proportion* de lumière polarisée dans le rayon réfracté, comme pour le rayon réfléchi. — 4° La *proportion* de lumière polarisée dans le rayon réfracté, va constamment en augmentant depuis $i = 0$ jusqu'à $i = 90^\circ$. En effet, la quantité absolue de lumière polarisée augmente, comme dans le rayon réfléchi; tandis que la lumière totale transmise va en diminuant, car elle est complémentaire de la quantité réfléchie. On voit donc qu'il n'y a pas d'angle de polarisation pour la lumière réfractée, que jamais cette lumière ne peut être entièrement polarisée, mais qu'elle contient d'autant moins de lumière naturelle que l'angle d'incidence est plus grand.

2994. PILE DE GLACES. — Quand on veut obtenir un faisceau fortement polarisé par réfraction, il faut lui faire traverser successivement plusieurs lames parallèles. Un semblable système se nomme *pile de glaces* ou *pile de plaques*. Les lames de verre, minces, bien polies, et parallèles, peuvent être appliquées les unes sur les autres, mais sans adhérer, de manière qu'il y ait toujours une couche d'air interposée.

Les propriétés des piles de glaces ont été découvertes par Malus. Pour en expliquer les effets, considérons une pile de glaces recevant sous l'angle de polarisation un faisceau neutre d'intensité 1. La lumière qui traverse la première lame, en sort partiellement polarisée perpendiculairement au plan d'incidence (2991). Soit *p* la partie polarisée, et *n* la partie restée neutre. La portion qui a été réfléchie est $1 - (p + n)$. La partie polarisée *p*, ne pouvant être réfléchie sous l'angle de polarisation, par la première surface de la seconde lame (2982), pénétrera entièrement et traversera cette lame ainsi que les suivantes sans éprouver de pertes, l'absorption étant négligée. La partie *n* se partagera à l'entrée de la seconde lame, comme la lumière incidente l'a fait à l'entrée de la première. Une portion $n(p + n) = np + n^2$ sera transmise, et $n - n(p + n)$ sera réfléchie. De la partie transmise, la portion polarisée *np* passera sans éprouver de perte, à travers toutes les lames, et la partie non

polarisée n^2 se partagera à l'entrée de la troisième lame, en lumière, transmise $n^2 (p + n)$, et en lumière réfléchie $n^2 - n^2 (p + n)$..., et ainsi de suite. Si donc on suppose qu'il y ait m lames, le faisceau émergent contiendra $p + np + n^2p + \dots + n^{m-1} p = p \frac{1 - n^m}{1 - n}$ de lumière polarisée, et une quantité n^m de lumière naturelle. Si m est suffisamment grand pour que n^m soit très-petit, le faisceau émergent paraîtra entièrement polarisé perpendiculairement au plan d'incidence.

2995. Du nombre des plaques. — Le nombre des plaques nécessaires pour arriver à ce résultat dépend de leur nature, et surtout de l'angle d'incidence. Plus cet angle est grand, moins il faut de plaques ; car, lorsqu'on dépasse l'angle de polarisation, une partie de la lumière déjà polarisée se réfléchit, d'un autre côté, une plus grande proportion de celle qui reste naturelle est polarisée (2993) ; de sorte qu'il faut moins de plaques pour arriver à une suppression presque complète de la lumière naturelle. Par exemple, Brewster a trouvé que la lumière d'une bougie placée à une distance de 4 mètres environ, est entièrement polarisée sous les incidences suivantes, par un nombre de lames de crown indiqué à la seconde ligne :

79° 11'	74°	69° 4'	63° 21'	60° 8'	57° 10'	53° 28'	50° 5'	45° 35'	41° 41'
8	12	16	21	24	27	31	35	41	47

Quand on dépasse l'angle pour lequel un nombre donné de plaques polarise complètement, la polarisation continue à être complète, mais l'intensité du faisceau polarisé diminue, parce que la proportion de lumière réfléchie augmente. Le *maximum* de lumière polarisée transmise ayant lieu sous l'angle de polarisation, aucune portion n'étant réfléchie, il convient d'employer cette incidence. On peut, du reste, dépasser sans inconvénient le nombre de plaques nécessaire, la lumière totalement polarisée par réfraction ne pouvant se réfléchir sur les lames surnuméraires, comme on peut s'en assurer, en écartant ces lames de manière à pouvoir observer les rayons réfléchis, s'il en existait.

Transparence d'une pile. — Une conséquence curieuse de ce qui précède, c'est qu'une pile de glaces est d'autant plus *transparente*, qu'elle est traversée plus obliquement à partir de l'angle de polarisation. Cela tient à ce que la lumière polarisée dans chaque lame va en augmentant avec l'angle d'incidence, ce qui amoindrit les pertes par réflexion, dans une proportion plus grande que ces pertes n'augmentent par l'influence de l'obliquité dans les premières lames, qui seules reçoivent beaucoup de lumière naturelle.

Les piles de glaces offrent l'avantage de fournir de la lumière polarisée très-intense, quand elles sont composées de lames pures et minces, ne produisant qu'une absorption insensible. On fait des piles avec des lames de mica, ou même avec une seule plaque un peu épaisse dont on a légèrement séparé les feuillets par la chaleur. On en a fait avec des liquides visqueux, comme l'eau de savon,

dans lesquels on trempait des lames de carton présentant une ouverture qui retenait une pellicule liquide. Deux feuilles d'or forment une pile, qui peut polariser complètement la faible proportion de lumière solaire qu'elle laisse passer.

2996. Pile de glaces comme polariscope. — Si l'on fait tomber obliquement sur une pile de glaces, un rayon polarisé, elle l'interceptera, d'après ce que nous venons de voir, quand son plan de polarisation se confondra avec le plan d'incidence, et le laissera passer quand ces deux plans seront perpendiculaires. Nous verrons (3021) que les piles de glaces peuvent aussi être employées comme *polarimètres*, c'est-à-dire pour évaluer la *proportion* de lumière polarisée contenue dans un faisceau.

2997. Application de la polarisation par réfraction. — La direction différente du plan de polarisation dans les rayons réfléchis et réfractés, a fourni à Arago un moyen ingénieux pour distinguer les écueils en mer calme, malgré l'éclat de la lumière réfléchie qui les masque. Il suffit de regarder à travers une tourmaline ou un prisme de Nicol ayant la section principale verticale. Les rayons réfléchis sont éteints, et les rayons venant de l'écueil et réfractés par l'eau sont seuls transmis à l'œil.

Arago a constaté que la lumière des halos est polarisée perpendiculairement au plan passant par l'œil et normal à l'arc. Cette lumière est donc réfractée, ce qui confirme l'explication de Mariotte (2725).

Polarisation dans l'émission. — Quand on observe au polariscope la lumière qui émane obliquement des solides ou des liquides incandescents, on reconnaît que cette lumière est en partie polarisée perpendiculairement au plan d'émission. Ce résultat, découvert par Arago, prouve qu'une portion notable des rayons a subi la réfraction, et par conséquent émane d'une certaine profondeur au-dessous de la surface; ce qui est d'accord avec le fait de la transparence des particules en suspension qui donnent aux flammes leur éclat (2419).

D'après les lois de l'égalité entre les quantités de lumière polarisées dans la lumière réfractée et réfléchie (2992), les rayons réfléchis intérieurement à la surface d'un corps incandescent doivent contenir autant de lumière polarisée que les rayons émis. C'est, en effet, ce qui paraît avoir lieu; car le noir de fumée, qui ne réfléchit pas sensiblement de lumière intérieure, puisqu'il n'en peut réfléchir extérieurement, émet des rayons dépourvus de polarisation.

Cela nous explique aussi ce fait d'expérience, que la lumière des flammes et des gaz incandescents ne présente pas de traces de polarisation, la réflexion intérieure n'existant pas pour ces sortes de fluides.

La lumière des bords du soleil ne présentant aucune trace de polarisation, Arago en a conclu que cette lumière ne peut être rayonnée par un corps solide ou liquide, et qu'elle émane d'un gaz incandescent, ou tenant en suspension des parcelles précipitées, ce qui confirme les découvertes faites au moyen du spectroscopie sur la constitution de l'enveloppe lumineuse du soleil (2646).

On ne peut appliquer la même méthode d'investigation aux étoiles, dont le

diamètre apparent est insensible; les polarisations des rayons qui partent de points situés à 90° de distance angulaire les uns des autres, s'entre-détruisent. Mais on peut l'appliquer aux étoiles variables; car, que les variations d'éclat soient dues à la forme aplatie de ces astres, ou à des corps extérieurs, ou à des parties obscures de leur surface, la polarisation des rayons émis obliquement de certains points ne sera pas détruite par celle des rayons qui manquent, et pourra être constatée. Or, Arago n'a pu discerner la moindre trace de polarisation dans la lumière des étoiles variables; d'où il a conclu qu'il est très-probable que leur lumière émane d'une enveloppe gazeuse constituée comme celle du soleil.

II. Réfraction de la lumière polarisée, et théorie de la polarisation par réfraction.

2998. La lumière réfractée complémentaire de la lumière réfléchie.

— Quand un rayon polarisé par un moyen quelconque tombe sur la surface d'un milieu transparent, une partie est réfléchie et l'autre transmise. Fresnel a admis que la somme des intensités de ces deux parties est égale à l'intensité du faisceau incident, ce qui suppose qu'il n'y a aucune perte à la surface. Ce principe résulte de la théorie; car si l'on calcule l'intensité du rayon réfracté, au moyen des formules qui donnent la vitesse de vibration dans ce rayon (2981), on trouve le même résultat qu'en retranchant l'intensité du rayon réfléchi de celle du rayon incident. De plus, Arago a vérifié ce principe sur le verre, par des expériences décrites plus loin (3015).

Il résulte de là qu'un rayon totalement polarisé normalement au plan d'incidence et tombant sous l'angle de polarisation, est entièrement transmis, puisqu'il ne donne pas de rayon réfléchi. C'est donc quand les vibrations ont lieu dans le plan d'incidence, et qu'elles font avec la surface l'angle de polarisation, qu'elles se transmettent le plus facilement à l'éther du second milieu; conséquences qui se déduisent aussi des formules suivantes de Fresnel.

2999. Intensité du rayon réfracté donné par un rayon polarisé.

— D'après ce qui précède, on peut calculer l'intensité du rayon réfracté, en retranchant de l'intensité 1 du rayon incident celle du rayon réfléchi. Donc, en conservant les mêmes notations, et désignant par T l'intensité du rayon transmis, on a, pour le cas général (2983),

$$T = 1 - a^2 \cos^2 \alpha - b^2 \sin^2 \alpha = 1 - \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \cos^2 \alpha - \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \sin^2 \alpha.$$

En introduisant dans cette formule les valeurs que prennent a^2 et b^2 dans les différents cas particuliers que nous avons examinés, et, faisant varier α , il sera facile de trouver les diverses valeurs correspondantes de T.

3000. Changement du plan de polarisation par la réfraction. — Décomposons, comme dans le cas de la réflexion (2984), la vitesse de vibration

du rayon incident en deux autres, dirigées, l'une dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire. La tangente du nouvel angle du plan de polarisation avec le plan d'incidence sera égale au rapport de ces composantes, qui sont $u \sin \alpha$ et $u' \cos \alpha$. Les valeurs de u et u' ont été calculées aux nos 2981, 2982, et l'on aura

$$\text{tang } \alpha' = \frac{u}{u'} \text{ tang } \alpha = \frac{1}{\cos(i-r)} \text{ tang } \alpha; \quad \text{ou} \quad \cot \alpha' = \cos(i-r) \cot \alpha;$$

formule que Brewster avait déduite d'un grand nombre d'expériences. On voit que $\cot \alpha$ est plus grand que $\cot \alpha'$, le cosinus étant toujours plus petit que 1; α' est donc plus grand que α . Donc, la réfraction écarte le plan de polarisation du plan d'incidence, et d'autant plus que i est plus grand, car $\cos(i-r)$ diminue quand i augmente. Pour $\alpha = 45^\circ$, on a $\cot \alpha' = \cos(i-r)$, et, pour $\alpha = 90^\circ$, $\cot \alpha' = 0$; d'où $\alpha' = 90^\circ$. Le plan de polarisation ne change donc pas d'azimut quand les mouvements vibratoires se font dans le plan d'incidence.

3001. Changement du plan de polarisation par une pile de glaces.

— Supposons que le rayon réfracté émerge par une face parallèle à la face d'entrée, et appelons α'' le nouvel azimut du plan de polarisation, nous aurons $\cot \alpha'' = \cos(i-r) \cot \alpha' = \cos^2(i-r) \cot \alpha$. Pour une seconde plaque, on aurait $\cot \alpha''' = \cos^3(i-r) \cot \alpha \dots$, et, après un trajet à travers m plaques, du rayon subissant $2m$ réfractions,

$$\cot \alpha_{2m} = \cos^{2m}(i-r) \cot \alpha.$$

On voit que $i-r$ étant moindre que 90° , $\cot \alpha_{2m}$ ne sera nul que pour un nombre infini de plaques; le plan de polarisation ne pourra donc jamais être exactement perpendiculaire au plan d'incidence. — Brewster, qui a vérifié la formule précédente au moyen d'un grand nombre d'expériences, a trouvé que, pour $\alpha = 45^\circ$, des piles de 8 plaques sous l'incidence de $78^\circ 52'$; de 24 plaques sous l'incidence de 61° ; et de 47 plaques sous l'incidence de $43^\circ 34'$, amènent le plan de polarisation du rayon émergent à être sensiblement perpendiculaire au plan d'incidence; car la formule donne pour les angles des deux plans $88^\circ 50'$, $89^\circ 38'$ et $88^\circ 27'$.

3002. EXPLICATION DE LA POLARISATION PAR RÉFRACTION.

— Si nous considérons un faisceau de lumière neutre comme formé de deux faisceaux d'égale intensité polarisés à angle droit, et, si nous nous reportons à ce qui a été dit pour la réflexion (2986), l'intensité du rayon réfracté sera $t = 1 - \frac{1}{2}(a^2 + b^2)$; ce qu'on pourrait trouver, comme dans le cas de la réflexion, en partant des intensités calculées quand le rayon est polarisé dans le premier et dans le second azimut; mais ce qui serait plus compliqué.

Le faisceau partiel polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, donne un faisceau $(1 - b^2)$ plus intense que celui, $(1 - a^2)$, qui est polarisé dans ce

plan; puisque l'on a $a^2 > b^2$ (2987). Les vibrations, dans ce dernier plan, sont donc plus nombreuses que dans le plan perpendiculaire; de là la polarisation partielle du rayon réfracté.

Le mouvement du plan de polarisation peut aussi servir à expliquer la polarisation par réfraction, au moyen d'un raisonnement synthétique semblable à celui que nous avons employé pour la réflexion (2988). On voit que la polarisation ne peut être que partielle, un mouvement vibratoire ne pouvant être amené à être perpendiculaire au plan de réfraction que lorsqu'il se trouve déjà perpendiculaire à ce plan dans le rayon incident (3000).

On peut, du reste, calculer les azimuts des plans de polarisation des deux rayons partiels qui composent un rayon naturel, en supposant qu'ils forment des angles de 45° avec le plan d'incidence. Il suffit de faire $\alpha = 45^\circ$, dans la formule $\cot \alpha' = \cos(i - r) \cot \alpha$; et elle devient $\cot \alpha' = \cos(i - r)$, formule qui montre que α' est toujours plus grand que $\alpha = 45^\circ$, mais qu'il ne peut jamais devenir égal à 90° . Les plans de polarisation des deux rayons partiels

seront donc simplement rapprochés de l'azimut de 90° . Si le rayon traverse une pile de plaques, les azimuts des plans de polarisation seront donnés par la formule $\cot \alpha_{2m} = \cos^{2m}(i - r)$, et la lumière naturelle qui traverserait des piles de 8, 24 ou 47 lames de verre dans les conditions indiquées ci-dessus (2995), paraîtrait complètement polarisée dans le second azimut; c'est, en effet, ce qu'a constaté Brewster.

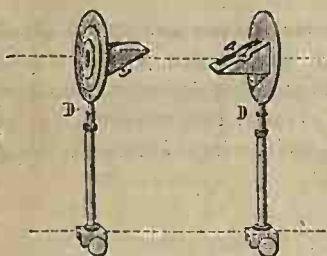


Fig. 2056.

3003. Quantité de lumière polarisée contenue dans le rayon réfracté.

— Si l'on considère un rayon naturel comme composé de deux rayons d'intensité $\frac{1}{2}$, polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement, les intensités des rayons réfractés qu'ils fournissent sont $\frac{1}{2}(1 - a^2)$ et $\frac{1}{2}(1 - b^2)$. En les retranchant l'une de l'autre, on a la quantité de lumière polarisée dans l'azimut de 90° . La différence est $\frac{1}{2}(1 - b^2 - 1 + a^2) = \frac{1}{2}(a^2 - b^2)$, expression qui représente aussi, comme nous l'avons vu (2992), la quantité de lumière polarisée dans le rayon réfléchi. Nous retrouvons donc ici la loi d'Arago sur l'égalité des quantités de lumière polarisées dans les deux rayons (2992). La proportion de lumière polarisée dans le rayon réfracté est représentée par la formule $\frac{\frac{1}{2}(a^2 - b^2)}{1 - \frac{1}{2}(a^2 + b^2)}$.

3004. Polarisation des radiations calorifiques et chimiques, par réfraction. — M. Forbes, ayant fait passer obliquement à travers deux piles de mica, des rayons de chaleur qu'il recevait ensuite sur un thermoscope, reconnut que l'intensité des rayons émergents était *maximum* quand les plans d'incidence sur les deux piles étaient parallèles, et très-faibles quand ces plans

étaient perpendiculaires entre eux. La figure 2056 représente les deux piles obliques au moyen desquelles on répète cette expérience ; elles sont portées par des supports D, D, qu'on place sur le banc de Melloni (II, 862) ; l'une d'elles peut tourner autour du faisceau calorifique horizontal.

Lors de ses expériences sur la double réfraction de la chaleur, en 1847 (2927), M. Knoblauch constata la polarisation des rayons de chaleur par les piles de glaces, prouva que le plan de polarisation est perpendiculaire à celui des rayons polarisés par réflexion, et reconnut que la proportion polarisée dépend de l'angle d'incidence. Pour vérifier ce dernier point, on dispose une des piles, D' (fig. 2057), de manière qu'elle puisse s'incliner en tournant autour d'un axe horizontal.

MM. de la Provostaye et P. Desains ont, de leur côté, constaté la polarisation des rayons de chaleur à travers des lames de verre ou des piles de glaces, et ont reconnu qu'il y a égalité entre les quantités de chaleur polarisée par réflexion et par réfraction (2992).

Des expériences faites par les mêmes physiciens, en 1850, sur les rayons de chaleur émis oblique-

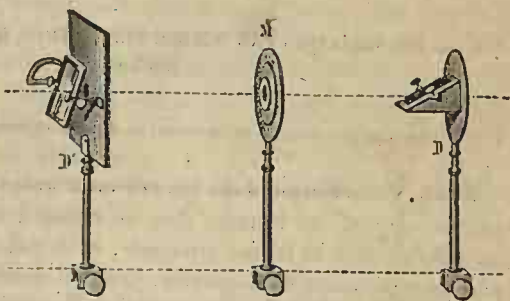


Fig. 2057.

ment par une surface incandescente, ont prouvé que ces rayons sont polarisés dans un plan perpendiculaire au plan d'émission, comme les rayons lumineux (2997)¹. Par exemple, les rayons émis par une surface de platine incandescente, sous un angle de 70° avec la normale, et traversant ensuite deux lames de mica inclinées à 35° sur leur direction, ont dévié l'aiguille du thermomultiplicateur de 24°,5 quand le plan de réfraction sur les lames était parallèle au plan d'émission, et de 8°,5 seulement quand il lui était perpendiculaire. Le platine platiné et le fer oxydé ont donné des résultats beaucoup moins prononcés, mais cependant nettement distincts, même au-dessous du rouge. — Les rayons émis normalement n'ont donné aucun signe de polarisation.

Magnus, en 1866, a opéré à 100° seulement, sur des substances polies recouvrant la base oblique d'un tube de fer-blanc, dans lequel circulait un courant de vapeur d'eau². Il a aussi expérimenté sur la surface horizontale de liquides. Le polariscope était formé d'un miroir de verre noir, les polariscope

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVIII, p. 252, et t. XXX, p. 159.

² *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XV, p. 467.

biréfringents absorbant trop de chaleur. Les expériences ont été faites sur quatre métaux différents, sur le verre et sur divers enduits gras ou résineux, sous un angle d'émission de 35°. Le plan de polarisation a toujours été perpendiculaire au plan de cet angle.

Radiations chimiques. — Bérard, puis M. Abria, ont constaté que les radiations chimiques frappant obliquement une plaque de verre, se partagent en deux faisceaux, l'un réfléchi, l'autre réfracté, polarisés dans les mêmes plans et suivant le même angle de polarisation que les rayons de lumière et de chaleur. M. Abria a constaté, en outre, qu'un faisceau qui a traversé deux piles de glaces noircit rapidement le chlorure d'argent quand les plans de réfraction sur les deux piles sont parallèles, et agit à peine au bout d'un temps beaucoup plus long, quand ces plans sont perpendiculaires entre eux.

§ 4. — POLARISATION PAR DOUBLE RÉFRACTION, ET THÉORIE DE LA DOUBLE RÉFRACTION

I. Polarisation par double réfraction, et double réfraction de la lumière polarisée.

3005. Polarisation dans les cristaux uniaxes. — Quand un rayon de lumière naturelle se bifurque dans un cristal à un axe, le *rayon ordinaire est polarisé dans la section principale, et le rayon extraordinaire, dans un plan perpendiculaire à cette section.* Cette loi se constate facilement au moyen d'un polariscope, quand on connaît la direction de la section principale correspondant à la face d'incidence; elle sert à distinguer facilement le rayon ordinaire du rayon extraordinaire. Ici encore se montre la réciprocité entre les polariscope et les polarisateurs; car un prisme de Nicol polarise la lumière naturelle qui le traverse, dans un plan perpendiculaire à sa section principale. Le faisceau extraordinaire qui émerge seul d'une lame de tourmaline parallèle à l'axe est polarisé dans un plan perpendiculaire à cet axe; de manière qu'il traverse le plus facilement une seconde tourmaline, quand l'axe de celle-ci est parallèle à celui de la tourmaline polarisante, et que toute lumière est interceptée quand les tourmalines ont leurs axes perpendiculaires l'un à l'autre. Pour expliquer l'absorption du rayon ordinaire, on a comparé la tourmaline à une pile de glaces, en la considérant comme formée de lames superposées; le rayon ordinaire polarisé dans le plan d'incidence par les premières lamelles serait ensuite arrêté par les suivantes. C'est Biot qui a découvert les propriétés de la tourmaline. Antérieurement, Brewster avait constaté des propriétés semblables dans les agates formées de couches minces et taillées en lame perpendiculaire à ces couches; les rayons étaient polarisés dans un plan perpendiculaire aux couches.

Un des polarisateurs biréfringents les plus employés est le prisme de Nicol, qui est incolore et que l'on peut obtenir très-limpide et d'assez grand volume

pour laisser passer de gros faisceaux de lumière. MM. Hartnack et Prazmowski en ont perfectionné la construction de manière à en diminuer la longueur, en disposant les faces d'entrée et de sortie perpendiculairement aux rayons, ce qui est commode dans beaucoup de cas. Ils ont aussi essayé diverses matières collantes : baume de Canada et de copahu; huiles de lin, de pavot¹. Nous avons vu (2954) que L. Foucault a simplement interposé une mince couche d'air.

3006. Polarisation dans les biaxes. — Dans ces sortes de cristaux, les deux rayons sont polarisés dans des plans sensiblement perpendiculaires l'un à l'autre. Dans le cas particulier où le plan d'incidence se confond avec une des sections principales ou avec le plan des axes, il y a un des rayons qui suit la loi des sinus, et qui peut, par conséquent, se nommer *rayon ordinaire*. Ce rayon est polarisé dans le plan de la section principale, et l'autre dans un plan perpendiculaire. On nomme cristaux *positifs*, ceux chez lesquels le rayon extraordinaire est plus dévié que le rayon ordinaire, et cristaux *négatifs*, ceux chez lesquels il est le moins dévié.

Quand le plan d'incidence a une position quelconque, le plan de polarisation est plus difficile à trouver. Cependant, Biot le détermine approximativement en menant par le rayon réfracté un plan passant par chacun des deux axes optiques. L'angle dièdre de ces deux plans est divisé à peu près en deux parties égales, par le plan de polarisation de l'un des rayons.



Fig. 2058.

Il résulte de la polarisation des deux rayons à angle droit, que lorsqu'on forme des *piles de mica* (2994) il faut avoir soin de placer les lames de manière qu'elles aient toutes une section principale dans le plan de réfraction; alors elles se comportent comme de simples glaces, et la double réfraction ne joue pas de rôle; mais si les lames étaient placées au hasard, leurs effets se contrarieraient plus ou moins.

3007. DOUBLE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE. — Quand un rayon de lumière naturelle traverse un cristal à un axe ne présentant pas comme la tourmaline de propriétés exceptionnelles, les rayons ordinaire et extraordinaire émergent avec des intensités sensiblement égales, la perte par absorption étant supposée négligeable. Mais si la lumière a été polarisée par un moyen quelconque, le faisceau se partage encore en deux autres polarisés à angle droit, mais ayant des intensités généralement inégales. Quand la section principale contient le plan de polarisation, le *rayon extraordinaire* est éteint, et toute la lumière passe dans le *rayon ordinaire*. Quand la section principale est perpendiculaire à ce plan, le *rayon ordinaire* disparaît à son tour; et quand les deux plans forment un angle de 45°; les deux rayons ont même intensité. La figure 2058 montre comment se succèdent les deux images, quand le polariscope biréfringent à

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. VII, p. 181.

faces parallèles tourne de 180° . pr est la direction du plan de polarisation ; l'image ordinaire o ne change pas de position, tandis que l'image extraordinaire e tourne autour d'elle. Les résultats sont les mêmes dans deux positions du prisme différant de 180° ; les images sont indiquées en lignes pointillées quand elles disparaissent.

L'expérience se fait facilement avec l'appareil de Biot (*fig.* 2048), auquel on ajuste un polariscope biréfringent. — Au moyen d'un semblable prisme tournant sur lui-même, M. Mach et M. Spottiswoode montrent simultanément les diverses intensités que prend le rayon incident polarisé. M. J. Duboscq fait cette expérience au moyen de l'appareil (*fig.* 2047) (2959), dans le tube tournant duquel on place le prisme. Si on le fait tourner lentement, on voit les intersections des deux faisceaux avec un écran prendre les intensités successives que nous venons d'énumérer. Mais si l'on tourne rapidement, chaque faisceau décrit sur l'écran un anneau, très-sombre dans le plan de polarisation du faisceau incident pour le faisceau extraordinaire, et dans un plan perpendiculaire au plan de polarisation, pour le faisceau ordinaire. — Si le polariscope a ses deux faces parallèles et normales au tube tournant, il n'y a plus qu'un anneau, le faisceau ordinaire ne se déplaçant pas et son intersection avec l'écran prenant une teinte grise, parce qu'elle passe successivement par des *maximum* et *minimum* d'éclat.

3008. Loi de Malus. — Quand on fait varier l'angle du plan de polarisation avec la section principale, les images *ordinaire* et *extraordinaire* changent d'intensité en sens inverse, sont égales quand l'angle est de 45° , et disparaissent, la première, quand l'angle est nul, et la seconde, quand il est égal à 90° . Malus a représenté les intensités O et E des deux rayons, par les formules

$$O = I \cos^2 \alpha \qquad E = I \sin^2 \alpha$$

dans lesquelles I est l'intensité du rayon incident, et α l'angle du plan de polarisation avec la section principale. Ces formules donnent bien des intensités dans les cas particuliers de $\alpha = 0$, $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$; mais il en serait de même pour toute autre puissance du *cosinus* ou du *sinus*. Nous verrons comment la théorie des ondulations y conduit, et comment on les a vérifiées par l'expérience.

Si l'on considère l'angle $\beta = 90^\circ - \alpha$ que fait le plan de polarisation avec la section principale d'un nicol, on aura $E = I \cos^2 \beta$; β étant ainsi compté à partir de la position pour laquelle on a le *maximum* d'intensité.

3009. Expérience des rhomboédres superposés. — C'est dans les rayons bifurqués par le spath d'Islande, que Huyghens a découvert qu'un rayon peut posséder des propriétés différentes sur ses divers côtés (2956). Voici les expériences curieuses qu'il faisait à ce sujet, expériences dont les résultats se prévoient facilement d'après ce qui précède. Deux rhomboédres superposés sont placés sur un point noir, et l'on voit en général 4 images, chaque rayon émergeant du premier cristal se bifurquant dans le second. Mais dans certaines positions relatives des deux rhomboédres, dont les faces de contact sont repré-

sentées (fig. 2059), l'une en ligne pleine, l'autre en ligne pointillée, deux des images disparaissent, o et o' sont celles qui proviennent du rayon ordinaire sortant du premier rhomboïdre, et e , e' celles qui proviennent du rayon extraordinaire; la lettre accentuée désignant l'image extraordinaire dans la seconde réfraction. Les 4 images forment un losange dont les côtés restent constants, et dont les angles varient. Quand les sections principales sont parallèles en même temps que toutes les arêtes des deux spaths, il n'y a que deux images. Il en est de même quand le cristal supérieur a tourné de 90° . Quand il a tourné de 180° , il n'y a plus que les deux images o et e , qui coïncident si les cristaux ont même épaisseur, les déviations s'y faisant en sens contraire.

Ces résultats peuvent se déduire de la formule de Malus. O_o , O_e étant les intensités des images données par le faisceau ordinaire sortant du premier



Fig. 2059.

rhomboïdre, et E_o , E_e les intensités de celles que donne le faisceau extraordinaire, on a, en appelant $\frac{1}{2} I$ l'intensité des rayons sortant du premier spath.

$$O_o = \frac{1}{2} I \cos^2 \alpha, \quad O_e = \frac{1}{2} I \sin^2 \alpha; \quad \text{et } E_o = \frac{1}{2} I \sin^2 \alpha, \quad E_e = \frac{1}{2} I \cos^2 \alpha.$$

Si la lumière incidente était polarisée, les intensités $\frac{1}{2} I$ devraient être remplacées, dans ces formules, par $I \cos^2 \alpha'$ et $I \sin^2 \alpha'$; α' étant l'angle de la section principale du premier spath avec le plan de polarisation des rayons incidents.

Comme il est rare de trouver des spaths purs assez épais pour que les images soient suffisamment séparées, on emploie souvent dans ces expériences deux prismes de spath parallèles à l'axe, et à angle très-petit. On peut alors, quand la lumière est intense, projeter les quatre images sur un écran.

3010. Polariscopes à deux images. — Dans bien des cas, il est nécessaire d'observer en même temps les deux images données par les polariscopes biréfringents; on voit ainsi simultanément les effets produits dans des azimuts différant de 90° , ce qui permet des comparaisons souvent précieuses. On peut employer pour cela le prisme de Rochon (2941). Mais les images sont trop peu écartées pour certaines expériences.

Prisme de Wollaston. — Cet instrument, qui écarte beaucoup les images, est composé de deux prismes de cristal de roche, disposés comme ceux de Rochon. Seulement, la face d'incidence du prisme antérieur contient l'axe qui est en même temps perpendiculaire aux arêtes. Le second prisme a toujours ses arêtes parallèles à l'axe. Il résulte de cette disposition, qu'un rayon

qui entre perpendiculairement à la face d'incidence, ne se bifurque pas dans le premier prisme, mais se compose néanmoins de deux rayons superposés, de vitesse différente (2935, 2^o), celle du rayon extraordinaire étant la plus petite, parce que le cristal est positif. Le rayon ordinaire, polarisé dans la section principale, c'est-à-dire dans la section droite du premier prisme, ne donnera donc, à son entrée dans le second, qu'un rayon, l'*extraordinaire*, la section principale de ce second prisme étant parallèle aux arêtes, et ce rayon sera dévié en se rapprochant de la normale, le cristal étant positif. Le rayon extraordinaire du premier prisme ne donnera que son rayon ordinaire, et comme sa vitesse était *minimum* (2938), elle augmentera en passant dans le second prisme, et il s'écartera de la normale d'une quantité égale à celle dont l'autre s'en était rapproché. A l'émergence, une nouvelle déviation en sens inverse pour les deux rayons, doublera l'angle de bifurcation. Si l'on fait tourner l'instrument sur lui-même, aucune des deux images ne restera fixe; et si on l'emploie comme polariscope, l'un des rayons superposés dans le premier prisme disparaîtra, ainsi que le rayon qu'il donne dans le second, quand le plan de polarisation sera normal ou parallèle aux arêtes.

3011. Polarisation des radiations calorifiques et chimiques, par double réfraction. — Après les expériences de Bérard sur la polarisation des rayons de chaleur par réflexion (2973), et des essais infructueux faits par Melloni au moyen de tourmalines, M. Forbes, en 1834, obtint des signes évidents de polarisation dans des rayons de chaleur ayant traversé des piles de mica ou des tourmalines. — Peu de temps après, Melloni reprit la question au moyen de son thermomultiplicateur¹; les rayons de la source, rendus parallèles au moyen d'un miroir concave, traversaient une large lentille de sel gemme et allaient former un foyer, près duquel on plaçait un système de deux tourmalines superposées. Les rayons divergents partant du foyer étaient rassemblés par une seconde lentille beaucoup plus petite en un faisceau parallèle plus étroit, et par suite plus intense, qui tombait tout entier sur la base de la pile du thermomultiplicateur. Cet instrument indiquait une température *minimum*, quand les tourmalines étaient croisées, et *maximum*, quand elles étaient parallèles.

En 1847, M. Knoblauch constata la polarisation dans des plans rectangulaires, des faisceaux calorifiques séparés par un spath d'Islande, et vit l'un d'eux disparaître quand la section principale d'un second spath qu'il leur faisait traverser était perpendiculaire ou parallèle à la section principale du spath polariseur. Il reconnut aussi que les deux faisceaux avaient la même intensité, et qu'une lame de spath d'Islande perpendiculaire à l'axe ne donnait ni bifurcation ni polarisation aux rayons calorifiques.

A la même époque, MM. de la Provostaye et P. Desains² observaient, de leur côté, la double réfraction des rayons calorifiques du soleil traversant un prisme

¹ *Bibl. de Genève*, t. IX, p. 62, et *Ann. de ch. et de ph.*, 2^e série, t. LXI, p. 375, et LXV, 5.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVII, p. 409.

achromatique de spath d'Islande, et constataient, en faisant tomber successivement les faisceaux ordinaire et extraordinaire sur un miroir de verre sous l'incidence de 56° , que l'intensité des rayons réfléchis était nulle quand le plan de réflexion était perpendiculaire au plan de polarisation des rayons incidents.

Les mêmes physiciens ont, en outre, établi que les rayons calorifiques polarisés sont soumis aux mêmes lois que les rayons lumineux polarisés. Par exemple, ils ont retrouvé la loi de Malus (3007). Les rayons calorifiques, renvoyés par un héliostat et polarisés par un spath d'Islande, traversaient un prisme analyseur biréfringent qui les bifurquait en deux faisceaux, que l'on recevait successivement sur la pile du thermomultiplicateur. Les intensités de chaque faisceau, quand on faisait varier l'angle, α , du plan de polarisation avec la section principale du prisme analyseur, ont été toujours proportionnelles à $\cos^2 \alpha$ pour le rayon ordinaire, et à $\sin^2 \alpha$ pour le rayon extraordinaire.

Radiations chimiques. — Il résulte d'expériences de M. Abria que les radiations chimiques se bifurquent dans les biréfringents en se polarisant dans les mêmes conditions que la lumière et la chaleur. Un faisceau de rayons qui traverse deux tourmalines à axes parallèles agit rapidement sur le chlorure d'argent, et il n'agit plus quand les tourmalines sont croisées.

II. Applications de la polarisation par double réfraction à la photométrie et à la polarimétrie.

3012. — Arago a imaginé, en 1833, une méthode photométrique fondée sur la loi de Malus ou du carré du cosinus (3008), au moyen de laquelle il a soumis au contrôle de l'expérience plusieurs résultats théoriques cités dans ce chapitre, et qui lui a servi ensuite à comparer les intensités de différentes sources naturelles de lumière. Ne voulant pas s'appuyer sur une loi purement théorique, il a d'abord soumis la loi de Malus à de nombreuses vérifications expérimentales. Pour cela, il a commencé par construire une table des intensités de la lumière réfléchie par une lame de verre sous diverses incidences; puis, il a comparé à ces intensités celles que lui donnait un prisme biréfringent¹.

3013. Appareil photométrique d'Arago. — F (fig. 2060) est une feuille de papier tendue verticalement et éclairée uniformément par derrière, et V une glace à faces parallèles, perpendiculaire à la feuille et fixée à une certaine distance. Un tube T, muni d'un diaphragme à fente verticale p , tourne dans un plan horizontal, avec la règle on qui le porte, de manière à former avec le plan de la glace V des angles mesurés au moyen de l'arc fixe a . En t , est une bague dans laquelle peut tourner un anneau, de quantités angulaires connues. Le système t , qui ne sert que pour certaines expériences, se fixe, au moyen d'une vis de pression, en différents points de la règle on . Deux écrans noirs

¹ *Oeuvres complètes de F. Arago (Mémoires scientifiques)*, t. I. p. 451.

Dans le cas des incidences voisines de la normale, il a fallu employer le moyen indirect suivant, en partant des résultats obtenus jusqu'à 26° : On affaiblit les rayons qui doivent être transmis à travers la glace V, par l'interposition d'une lame de même matière, plus ou moins inclinée par rapport à ces rayons, et qui en réfléchit une partie qu'il s'agit d'évaluer. Pour cela, on cherche, en déplaçant le tube T, sous quel angle α la lumière réfléchie est égale à la lumière transmise provenant du faisceau affaibli par la lame, et l'on trouve dans la table, les quantités r et t de lumière réfléchie et transmise en V sous l'inclinaison α . Si maintenant on représente par 1 l'intensité du faisceau incident non modifié, et par i celle d'un faisceau égal après qu'il a été affaibli par la lame auxiliaire, ce faisceau aura, d'après la table, l'intensité it après son passage à travers la glace V; et comme il est alors égal au faisceau réfléchi r on aura $r = it$, d'où $i = r : t$. Le rapport $(r : t)$ représente donc l'intensité du rayon transmis par la lame auxiliaire, et $1 - (r : t)$, celle du faisceau réfléchi par cette lame sous l'angle qu'elle forme avec le faisceau, angle qui peut être aussi rapproché que l'on veut de 90° .

3016. Il ne s'éteint pas de lumière dans la réflexion et la réfraction des corps transparents. — Pour établir ce principe important (2998), nécessaire pour la vérification de la loi du \cos^2 , on fait faire au tube T (fig. 2060), l'angle de $11^\circ 8'$ avec la surface de la plaque, auquel cas les images réfléchies et transmises sont égales; on place ensuite dans le trajet des rayons qui doivent être transmis, une seconde lame de verre parallèle à la première, et assez éloignée pour renvoyer à celle-ci de la lumière réfléchie. La plaque fixe reçoit ainsi, au lieu du faisceau direct, la somme des faisceaux transmis et réfléchis par la lame auxiliaire. Or, cette somme est égale au faisceau direct, car c'est toujours sous l'angle de $11^\circ 8'$ que les images des deux fentes sont égales. Il en est encore de même quand la lame auxiliaire est inclinée par rapport à la plaque fixe. On conclut de là que la somme des intensités des faisceaux transmis et réfléchis est égale à l'intensité du faisceau incident.

3017. Vérification de la loi du carré du cosinus. — Une des fentes est placée un peu au-dessus de la plaque de verre V (fig. 2060), de manière à laisser passer des rayons venant directement du papier éclairé. L'autre fente, placée un peu plus bas, donne passage aux rayons réfléchis par la plaque. On partage le faisceau direct en deux autres égaux entre eux, au moyen d'un prisme biréfringent fixé en t , et l'on reçoit le faisceau ordinaire sur un second prisme parallèle au premier. Ce faisceau se bifurque à son tour, et il s'agit de vérifier si l'intensité du rayon ordinaire qu'il fournit varie proportionnellement au carré du cosinus de l'angle que font entre elles les sections principales des deux prismes. Pour cela, on déplace le tube T jusqu'à ce que l'intensité de la lumière réfléchie soit égale à celle de la lumière venant directement de l'écran transmise à travers les prismes. Or, la première intensité se trouve dans la table; la seconde est donc aussi connue. On fait de même en inclinant différemment les sections principales des prismes l'une par rapport à l'autre, et l'on

compare les valeurs obtenues, à celles que l'on déduit de la loi du \cos^2 . Les expériences ont donné un accord très-satisfaisant entre les deux séries de résultats; les différences n'allaient qu'à quelques centièmes. — Nous allons indiquer quelques-uns des résultats photométriques obtenus, sous la direction d'Arago, en s'appuyant sur la loi du carré du *cosinus*.

3018. Il ne s'éteint pas de lumière dans la réflexion totale. —

Bouguer admettait qu'il se perdait dans la réflexion totale environ $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{5}$ de la lumière incidente. M. Potter a trouvé cette perte insensible, et l'appareil d'Arago a conduit au même résultat. On procède en suivant la même marche que pour trouver la proportion de lumière réfléchie dans les incidences très-obliques (3015), en remplaçant la lame auxiliaire, par un prisme dans lequel la lumière est réfléchie totalement, puis traverse la glace V (*fig.* 2060), en se substituant à la lumière directe qui était transmise. On trouve que, pour qu'il y ait égalité entre les deux images, il faut que le tube T ait la même position qu'avant l'interposition du prisme. La lumière réfléchie dans ce dernier a donc la même intensité que celle qui vient de la feuille de papier; il n'y a donc pas de perte dans la réflexion totale, ou du moins la perte ne va pas à $\frac{1}{1000}$ de la lumière incidente. Il est essentiel de placer sur le trajet des rayons réfléchis par la glace V, une plaque de verre dans laquelle les rayons parcourent le même trajet que dans le prisme, afin de compenser les pertes à l'entrée et à la sortie de ce dernier et celles qui peuvent provenir de l'absorption.

3019. Pouvoir réflecteur des métaux. — Si l'on remplace le prisme à réflexion totale, par un miroir métallique, on substituera aux rayons directs transmis, les rayons réfléchis par ce miroir, et l'on pourra comparer leur intensité à celle de la lumière réfléchie par la glace, et par conséquent à l'intensité de la lumière incidente. Cette méthode a été appliquée au platine, à l'acier, au métal des miroirs, et l'on a vérifié une fois de plus l'augmentation de la proportion de lumière réfléchie avec l'angle d'incidence.

3020. Intensité des étoiles, du soleil. — Arago a encore appliqué la loi du \cos^2 à la comparaison des intensités des principales étoiles. L'instrument employé n'est autre que la lunette de Rochon (2942), devant l'oculaire de laquelle est disposé un prisme de Nicol pouvant tourner sur lui-même de quantités mesurées sur un cercle gradué. Quand le prisme de Nicol et celui qui contient la lunette ont leur section principale dans le même plan, on ne voit que l'image ordinaire de l'étoile, polarisée dans ce plan. Si l'on fait tourner peu à peu le prisme de Nicol, on voit bientôt apparaître la seconde image, dès que son éclat dépasse un peu celui du ciel, et l'on observe l'angle α que font alors les sections principales des deux prismes. On fait de même avec une autre étoile, et si α' est l'angle des deux plans quand la seconde image commence à paraître, et I, I' les intensités des deux étoiles, on a $I \sin^2 \alpha = I' \sin^2 \alpha'$; d'où $I : I' = \sin^2 \alpha' : \sin^2 \alpha$. Nous prenons les *sinus* au lieu des *cosinus*, parce qu'il s'agit de l'image extraordinaire.

On peut encore procéder en affaiblissant la lumière de l'étoile la plus brillante,

jusqu'à ce que sa seconde image apparaisse, dans le même état de l'instrument que pour la plus faible. Pour cela, on place devant l'objectif une lame de verre inclinée par rapport à l'axe de la lunette, et qui affaiblit les rayons incidents, d'après l'obliquité, dans une proportion donnée par une table construite comme nous l'avons expliqué plus haut (3015). Voici quelques résultats moyens comparés aux intensités de *sirius* et d'*acturus* représentées par 1000 :

procyon	bêteigneuse	rigel	wéga	altair	aldébaran	l'épi
444	411	402	394	338	219	158

Intensité aux différents points de la surface solaire. — Le prisme de Rochon étant placé de manière que le bord d'une des images du soleil passe par le centre de l'autre, on a trouvé, en faisant tourner le prisme de Nicol, que l'image extraordinaire commence à paraître, au même moment, sur le bord et au centre de l'image ordinaire. L'éclat de cette dernière image est donc partout le même. Bouguer avait annoncé que l'éclat du centre était à celui du bord comme 48 est à 35. S'il en était ainsi, le prisme de Nicol devrait tourner de $1^{\circ} 29'$, pour passer de la position où le bord de l'image extraordinaire apparaîtrait sur le bord de l'image ordinaire, à celle où il commencerait à se distinguer près du centre. La différence d'intensité annoncée par divers observateurs ne paraît donc pas exister pour les rayons lumineux; mais elle est réelle quant aux effets calorifiques et chimiques de ces rayons.

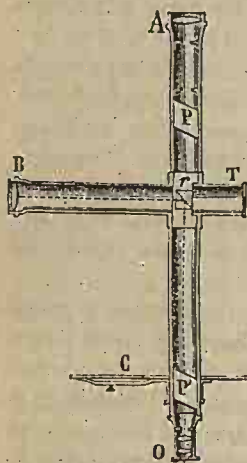


Fig. 2061. — $\frac{1}{6}$.

3021. Photomètres divers. — La loi du \cos^2 a aussi été appliquée à la construction de divers autres *photomètres*. — 1^o Nous allons d'abord décrire celui de M. E. Becquerel ¹, avec lequel il a pu comparer les intensités lumineuses des corps phosphorescents (2686). AO, BrO (*fig.* 2061) sont deux petites lunettes ayant même oculaire O, dont une BrO, est coudée, les rayons qui la traversent éprouvant la réflexion totale dans un prisme de verre *r* mobile dans le tube T. Les lumières à comparer sont placées à la même distance des objectifs A et B. En P et P', sont deux prismes de Nicol que traversent les rayons de la lumière la plus intense entrant en A. Quand ces deux prismes ont leurs sections principales parallèles, cette lumière n'est pas sensiblement affaiblie; mais si l'on fait tourner le prisme P' d'une quantité α mesurée sur le cercle divisé C, l'intensité de cette lumière diminue et est proportionnelle à $\cos^2 \alpha$; de manière qu'on peut rendre égales en intensité, les images de deux fentes que traversent les rayons, et qu'on amène à être contiguës en déplaçant un peu le prisme réflecteur *r*.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXII, p. 14.

Les lumières comparées doivent être *neutres*, et pour bien juger de l'égalité, il faut que la différence des intensités ne soit ni trop grande ni trop petite. La source la plus intense était une lampe Carcel qui servait de terme de comparaison, M. E. Becquerel a trouvé que, si l'angle α est compris entre 30' à 40', et 45° à 50°, l'erreur ne dépasse guère $\frac{1}{50}$ de l'intensité de la plus faible source.

Le même instrument a aussi servi à la vérification de la loi du \cos^2 : la lampe étant placée successivement à différentes distances, d , et l'autre source étant constante, M. E. Becquerel a constaté que le produit $d \cos \alpha$ reste le même, et par conséquent $d^2 \cos^2 \alpha$, quand α est tel que les deux images présentent la même intensité.

2° M. F. Bernard, lors de son grand travail sur l'absorption de la lumière par les milieux transparents, dans lequel il a combattu l'hypothèse de Brewster sur la composition de la lumière (2588), a imaginé le photomètre suivant¹ : Les rayons à comparer entrent dans deux tubes parallèles munis de diaphragmes, dans chacun desquels ils traversent successivement deux prismes de Nicol, dont le premier est fixe et polarise les rayons, tandis que l'autre, qui sert d'analyseur, peut tourner sur lui-même de quantités angulaires mesurées sur un arc gradué. Les rayons sortent ensuite des tubes, et sont renvoyés latéralement par des prismes de verre à réflexion totale, dans une petite lunette de Galilée à travers laquelle on compare leurs intensités. Les sections principales des nicols étant d'abord parallèles, on fait tourner l'analyseur que traverse le faisceau le plus intense, d'un angle α tel que les deux images paraissent de même intensité ; et en appelant I et I' les intensités des deux faisceaux avant leur entrée dans l'appareil, on a $I = I' \cos^2 \alpha$, en supposant I' plus grand que I .

3° M. H. Soleil a fait connaître, en 1855, un photomètre très-sensible, dont voici le principe². Les rayons à comparer sont polarisés dans le même plan en traversant un prisme de Nicol, puis ils traversent un prisme biréfringent, dont la section principale est inclinée de 45° sur celle du nicol, de manière que chaque faisceau est divisé en deux autres égaux et polarisés à angle droit. On fait en sorte que, dans les quatre faisceaux ainsi obtenus, l'*ordinaire* d'une des sources et l'*extraordinaire* de l'autre coïncident. Si ces faisceaux sont inégaux en intensité, comme ils sont polarisés à angle droit, le faisceau résultant analysé au moyen d'un polariscope de Savart, instrument très-sensible que nous décrirons plus tard, se montre partiellement polarisé. On fait alors tourner le nicol d'une quantité α , de manière à faire disparaître toute trace de polarisation. Si I et I' sont les intensités des deux sources, les faisceaux ordinaire et extraordinaire superposés étant alors égaux, on aura $I \cos^2 \alpha = I' \sin^2 \alpha$, d'où $I : I' = \tan^2 \alpha$.

• **3021. Polarimètres.** — On nomme *polarimètres* des instruments destinés à mesurer la proportion de lumière polarisée contenue dans un faisceau de lumière. La méthode qu'on emploie généralement consiste, au fond, à dépolariser

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXV, p. 418.

² *Les Mondes*, de M. l'abbé Moigno, t. I (1863), p. 593.

le faisceau en y introduisant une quantité convenable de lumière polarisée à angle droit, de manière à le rendre complètement neutre; la quantité de lumière introduite représente celle qui a été détruite.

Arago se sert pour cela d'une pile de glaces placée à l'extrémité du tube d'un polariscopes à lunules (2955). La pile étant tournée de manière que le plan d'incidence du faisceau à analyser coïncide avec le plan de polarisation, on fait varier peu à peu l'inclinaison de cette pile, jusqu'à ce que la double image donnée par le polariscopes soit complètement exempte de couleurs. Une table, que nous allons apprendre à construire, donne la proportion de lumière que polarise la pile dans la position qu'on lui a donnée, et, par conséquent, la quantité polarisée qu'elle a neutralisée dans le faisceau incident. — La figure 2062 représente le polarimètre d'Arago. En *c* est la lame de cristal de roche, et en *o*

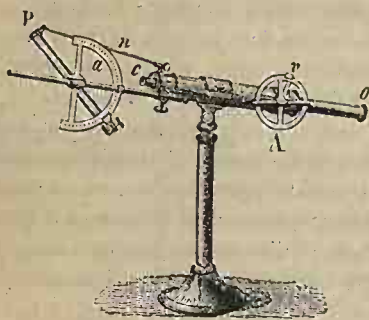


Fig. 2062.

le prisme biréfringent. P est la pile de glaces, dont on mesure l'inclinaison sur l'axe du tube, au moyen de l'arc divisé α . En A est un cercle gradué fixé au tube. Un niveau à bulle d'air, muni d'un vernier *v* et tournant dans le plan de ce cercle, fait connaître, quand il est horizontal, l'angle de l'axe du tube avec l'horizon, pour les expériences de polarisation atmosphérique. Une bande de drap noir, *n*, intercepte les rayons qui se réfléchiraient sur la première glace et viendraient se mêler aux rayons transmis. L'instrument se

tient à la main, ou est articulé sur un pied portatif.

Graduation. — Pour graduer le polarimètre, il faut neutraliser successivement avec la pile, des faisceaux contenant des proportions connues de lumière polarisée. Pour se procurer de semblables faisceaux, on polarise totalement par réflexion sur un miroir de verre, la lumière émanant d'une surface vivement éclairée, et l'on fait passer normalement cette lumière dans une plaque de cristal de roche *parallèle à l'axe*. On tourne cette plaque dans son propre plan, de manière que son axe fasse un certain angle α avec le plan d'incidence sur le miroir. Les deux faisceaux restent presque complètement superposés; ils sont polarisés à angle droit, et leurs intensités sont $I \cos^2 \alpha$ et $I \sin^2 \alpha$, en représentant par *I* l'intensité du faisceau à son entrée dans la plaque. Si le second est le plus faible, ce qui suppose $\alpha < 45^\circ$, il neutralise ou réduit à l'état de lumière naturelle, une partie de l'autre faisceau, égale à $I \sin^2 \alpha$, qui, jointe au faisceau neutralisant, donne le total $2I \sin^2 \alpha$ de lumière naturelle. Il ne reste donc de lumière polarisée, que la quantité $I \cos^2 \alpha - I \sin^2 \alpha = I \cos 2\alpha$. Le rapport de cette quantité à la quantité totale *I* de lumière émergente, est donc $\cos 2\alpha$, mêlée à $2 \sin^2 \alpha$ de lumière neutre. — Ce faisceau, dont l'état de

polarisation est ainsi connu, est reçu dans la pile de glaces tournée de manière que le plan d'incidence coïncide avec le plan de polarisation ; on incline cette pile jusqu'à ce que le polariscope ne donne plus de coloration, et l'on note l'inclinaison et la proportion de lumière dépolarisée sous cette inclinaison.

Par cette méthode, Laugier a construit une table donnant les inclinaisons sous lesquelles des piles de 1, 2, 3... 10 glaces neutralisent un faisceau contenant diverses proportions de lumière polarisée.

On pourrait graduer la pile au moyen des formules théoriques qui donnent la proportion de lumière polarisée sous les diverses incidences ; mais l'absorption d'une partie de la lumière, rendrait les résultats moins exacts.

C'est au moyen d'un polarimètre gradué avec soin que E. Desains a vérifié la formule de Fresnel donnant la proportion de lumière polarisée par réflexion sur le verre (2988). L'indice de réfraction, qu'il faut connaître pour calculer les valeurs de r , était déduit de l'angle de polarisation, au moyen de la loi de Brewster (2965).

III. Théorie de la double réfraction.

3022. — C'est au génie de Fresnel que nous devons la théorie mathématique de la double réfraction. Après avoir établi le principe de la direction transversale des vibrations lumineuses, et donné la véritable définition de la lumière polarisée, il put marcher avec sûreté dans le développement de cette remarquable théorie, au moyen de laquelle, non-seulement on peut rendre compte de tous les phénomènes et de leurs lois, mais encore on a découvert des faits nouveaux, que l'expérience a ensuite vérifiés. Ne pouvant développer ici les calculs élevés qui forment le fond de la théorie de Fresnel, nous en exposerons du moins la marche, en faisant connaître les formules et les résultats¹.

3023. Explication synthétique de la bifurcation. — Voici d'abord comment Fresnel conçoit la bifurcation d'un rayon à son entrée dans un cristal biréfringent². Les molécules étant inégalement rapprochées dans différentes directions, l'éther éprouve de la difficulté à vibrer dans un sens oblique aux plans des couches moléculaires. Ainsi, dans les cristaux *uniaxes*, les mouvements vibratoires s'exécutent facilement dans le sens *perpendiculaire* et dans le sens *parallèle* à l'axe ; tandis qu'un mouvement oblique à l'axe, éprouve une résistance qui détermine sa décomposition en deux autres, l'un *parallèle*, et l'autre *perpendiculaire* à l'axe. Ces deux mouvements se propagent séparément, avec des vitesses différentes et, par conséquent, dans des directions différentes (2840), d'où il résulte deux rayons réfractés.

Considérons, par exemple, une lame d'un cristal uniaxe, taillée parallèlement à l'axe, et recevant normalement un rayon *polarisé dans un plan formant un*

¹ Pour la théorie mathématique, voy. *Traité d'optique physique*, par M. Billet, t. II.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XVII, p. 179.

angle α avec la section principale. Chaque vitesse de vibration, perpendiculaire à ce plan, pourra être décomposée en deux autres, l'une dans la section principale, l'autre perpendiculaire à cette section, la dernière appartenant au rayon ordinaire. Si l représente la vitesse résultante, les vitesses des composantes seront $\cos \alpha$ et $\sin \alpha$, et les intensités des rayons ordinaire et extraordinaire seront représentées par $\cos^2 \alpha$ et $\sin^2 \alpha$, ce qui exprime la loi de Malus (3008). Les déplacements parallèles et perpendiculaires à l'axe étant perpendiculaires entre eux, s'exécuteront d'une manière indépendante, et comme ils se propagent (normalement à leur direction) avec des vitesses différentes, la distance entre deux points correspondants des deux systèmes d'ondes sera proportionnelle à l'épaisseur de cristal qu'ils auront traversée.

S'il s'agit de lumière naturelle, on pourra appliquer le raisonnement qui précède à chaque mouvement élémentaire, et le rayon incident sera divisé en deux autres polarisés dans la section principale et normalement à cette section, et ces rayons seront d'intensité égale, parce que les directions des vibrations du rayon incident passent par tous les azimuts pendant un temps très-court, de manière que les composantes représentent, pendant ce temps, la même somme dans les deux rayons ordinaire et extraordinaire.

Voici maintenant la marche analytique qu'a suivie Fresnel pour expliquer la bifurcation des rayons dans le cas le plus général, tant dans les uniaxes que dans les cristallux à deux axes, et pour déterminer la forme de la surface de l'onde. Il s'est appuyé sur certains principes de mécanique, qui se démontrent par l'analyse, et dont nous allons d'abord donner l'énoncé.

3024. Axes et surface d'élasticité. — Quand on dérange une molécule d'éther de sa position d'équilibre, d'une quantité très-petite par rapport à sa distance aux molécules voisines, il se développe de l'élasticité, en vertu de laquelle celles-ci se déplacent, puis agissent à leur tour sur celles qui les entourent, et le mouvement se propage ainsi de proche en proche. Si l'élasticité développée entre deux molécules exerce son action dans la direction même du premier déplacement, les déplacements qui se propagent restent parallèles à cette direction; c'est ce qui a lieu dans les milieux homogènes. Mais dans un milieu non homogène, l'élasticité développée par les déplacements des molécules réagit en général dans une direction différente de celle du déplacement; de sorte que les déplacements qui se succèdent sur la ligne de propagation, ont des directions différentes du premier; et l'on démontre par l'analyse que :

1^o Quelle que soit la loi suivant laquelle varie d'une manière continue l'élasticité autour du point ébranlé, il existe toujours trois directions rectangulaires pour lesquelles chaque molécule réagit suivant la direction même de son déplacement, de manière qu'un déplacement suivant une de ces directions, la conserve pendant qu'il se propage perpendiculairement au déplacement. Ces directions privilégiées se nomment axes d'élasticité. Dans les milieux cristallisés, les axes passant par deux points, sont parallèles deux à deux, et dans les uniaxes, il en est deux qui sont égaux.

2° On démontre que la force élastique produite par un déplacement peut être remplacée par la résultante des forces que produiraient trois déplacements suivant trois axes rectangulaires, et égaux aux projections du déplacement considéré sur ces trois axes.

Surface d'élasticité. — Si l'on prend sur les trois axes d'élasticité et sur des rayons vecteurs menés dans tous les sens à partir d'un même point, des longueurs proportionnelles aux racines carrées des élasticités, e , développées par les petits déplacements parallèles à chacune de ces directions, on forme une surface que Fresnel nomme *surface d'élasticité*, et dont chaque rayon vecteur représente la *vitesse* v de propagation des vibrations dans une direction parallèle, à cause de la relation $v = \sqrt{e \cdot d}$ (2822). Si nous désignons par v un rayon vecteur, par X, Y, Z les angles qu'il fait avec les trois axes d'élasticité, et par a, b, c les longueurs des trois demi-axes, qui mesurent ce qu'on nomme les *vitesse principales* de propagation, la surface d'élasticité, en coordonnées polaires, sera représentée par l'équation

$$v^2 = a^2 \cos^2 X + b^2 \cos^2 Y + c^2 \cos^2 Z;$$

et, en la rapportant aux axes d'élasticité, par l'équation du 4^e degré

$$(x^2 + y^2 + z^2)^2 = a^2 x^2 + b^2 y^2 + c^2 z^2.$$

3025. Propagation du déplacement d'une particule. — Dans la construction de la surface d'élasticité, le carré du rayon vecteur ne représente pas la résultante entière de la force qui agit sur la particule déplacée, mais seulement la composante dirigée suivant le rayon vecteur. En effet, considérons une particule O (fig. 2063) ébranlée isolément, et soient Ox, Oy, Oz les trois axes d'élasticité, normalement auxquels les vitesses principales de propagation des vibrations qui leur sont parallèles, sont a, b, c . Les forces d'élasticité développées par un même déplacement d dirigé successivement suivant ces axes, sont kda^2, kdb^2, kdc^2 ; puisque le carré de la vitesse est proportionnel à l'élasticité (2822), et que la force élastique développée est proportionnelle au déplacement d , en le supposant très-petit par rapport aux distances des particules d'éther.

Supposons maintenant que le déplacement d s'effectue suivant une droite OD faisant les angles α, β, γ avec les axes. D'après le deuxième principe (3024), la force d'élasticité développée sera la résultante de trois forces que feraient naître les déplacements $d \cos \alpha, d \cos \beta, d \cos \gamma$, dirigés suivant les axes; forces qui sont égales à $kda^2 \cos \alpha, kdb^2 \cos \beta, kdc^2 \cos \gamma$; k étant une constante, et dont la résultante R est égale, d'après la règle du parallépipède des forces, à

$$R = kd \sqrt{a^4 \cos^2 \alpha + b^4 \cos^2 \beta + c^4 \cos^2 \gamma} = kdN^2,$$

en représentant le radical par N^2 . — Les angles α', β', γ' que fait la direction de cette force avec les trois axes, seront donnés par les relations

$$\cos \alpha' = \frac{kla^2 \cos \alpha}{R}, \quad \cos \beta' = \frac{kdb^2 \cos \beta}{R}, \quad \cos \gamma' = \frac{kdc^2 \cos \gamma}{R},$$

valeurs qui diffèrent de $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$, si ce n'est quand la matière est homogène, auquel cas on a $a = b = c$, et $R = kda^2$. La direction OR de la résultante R est donc, en général, différente de celle, OD, du déplacement, et l'angle $DOR = \omega$ est donné par la relation

$$\cos \omega = \frac{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \cos^2 \beta + c^2 \cos^2 \gamma}{N^2}.$$

La force d'élasticité R agit dans la même direction que le déplacement quand celui-ci s'accomplit suivant un des axes; car, si l'on fait, par exemple, $\alpha = 0$, ce qui exige que l'on ait $\beta = \gamma = 90^\circ$, on trouve $\cos \omega = 1$, d'où $\omega = 0$; ce qui peut se voir aussi au moyen des valeurs de $\cos \alpha'$, $\cos \beta'$, $\cos \gamma'$, qui donnent alors $\alpha' = 0$; et $\beta' = \gamma' = 90^\circ$.

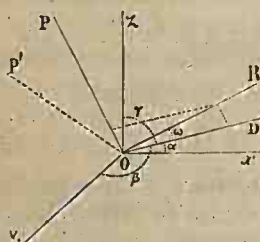


Fig. 2063.

Déviation des déplacements pendant la propagation. — Décomposons la résultante d'élasticité R, dont la direction est OR (fig. 2063), en deux forces, l'une $R' = R \cos \omega$ dirigée suivant OD, l'autre $R'' = R \sin \omega$, suivant OP perpendiculaire à OD. Le déplacement de la molécule O suivant OD se propagera dans tous les sens autour du point O, mais la direction du déplacement ne restera pas, en général, sur la ligne de propagation. Il faut excepter la direction

OP, dans laquelle les déplacements se feront toujours parallèlement à OD; car, la composante de l'élasticité suivant OP, étant perpendiculaire à la direction OD du déplacement, n'aura aucune influence pour en modifier, soit la direction, soit la vitesse. Cette composante R'' ne pourrait que rapprocher les molécules d'éther les unes des autres dans le sens OP, et engendrer ainsi des condensations, qui ne produisent pas d'effets lumineux. La vitesse de propagation dans cette direction privilégiée est donnée par la relation $R' = R \cos \omega = kdu^2$, d'où l'on tire, en remplaçant R et $\cos \omega$ par leur valeur,

$$u^2 = a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \cos^2 \beta + c^2 \cos^2 \gamma.$$

Mais, suivant une direction, telle que OP' , différente de OP, les vibrations se propagent en quittant la direction parallèle au premier déplacement. En effet, on peut décomposer la composante R'' en deux autres, l'une $R'' \cos \rho$ suivant OP' , qui ne peut modifier la direction des vibrations; l'autre $R'' \sin \rho$ perpendiculaire à OP' , et qui agit constamment pour modifier la direction du déplacement, en se combinant avec la composante suivant OD.

2026. Propagation d'une onde plane polarisée. — Considérons

maintenant, non plus une seule particule vibrante, mais une onde plane *polarisée*, c'est-à-dire dans laquelle les particules d'éther oscillent avec la même force et dans des directions parallèles. Fresnel fait voir que les élasticités mises en jeu par tous ces déplacements, suivent les mêmes lois que lorsqu'il ne s'agit que d'une seule particule :

1° Si le plan de l'onde est perpendiculaire à l'axe ox (*fig. 2063*), et si les mouvements vibratoires sont parallèles à l'un des deux autres axes, Oz , par exemple, ces mouvements se propageront suivant Ox , en restant constamment parallèles à Oz , et avec la vitesse c qui leur correspond. Cela revient à dire qu'une onde plane perpendiculaire à l'un des axes d'élasticité et polarisée parallèlement à l'un des deux autres, se propage sans se diviser et sans que son plan de polarisation change.

2° Si les déplacements des particules dans le plan zy ne se font pas parallèlement à l'un des axes Oz ou Oy , et s'ils font un angle δ avec l'axe Oz , le mouvement d sera l'effet résultant de deux mouvements partiels, l'un $d \cos \delta$ dirigé suivant Oz ; l'autre $d \sin \delta$, suivant Oy , et il y aura ainsi deux systèmes d'ondes polarisées à angle droit et se propageant dans la même direction Ox .

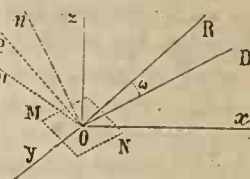


Fig. 2064.

3° Considérons maintenant le cas où l'onde plane MN passant par O (*fig. 2064*) est dirigée d'une manière quelconque par rapport aux axes d'élasticité. Soit On la direction de la propagation, normale au plan de l'onde, et par conséquent à la direction OD des déplacements. Dans ce cas, l'élasticité développée par le déplacement d'une particule n'est plus dirigée dans le sens du déplacement, qui se propage alors parallèlement à On , en se détournant de plus en plus de la direction qu'il avait d'abord. Si cependant la force élastique développée R était située dans le plan nOD , les vibrations conserveraient leur direction pendant la propagation; car la composante $R \cos \omega$ aurait seule de l'influence, l'autre, $R \sin \omega$, étant perpendiculaire à la direction des vibrations. Or, Fresnel a démontré qu'il existe toujours dans le plan de l'onde, quelle qu'en soit la position, deux directions du mouvement de l'éther pour lesquelles la force R se trouve dans le plan nOD ; et, par conséquent, telles que les déplacements se propagent en conservant des directions parallèles. Ces deux directions sont perpendiculaires entre elles. Pour les trouver, on considère l'intersection de la surface d'élasticité avec le plan de l'onde, et l'on construit le plus grand et le plus petit des rayons vecteurs contenus dans cette intersection. Les vitesses de propagation des déplacements dirigés suivant ces rayons, sont proportionnelles à leurs longueurs; elles doivent donc varier avec la position du plan de l'onde. Si l'on désigne par m, n, p les angles que fait la normale On avec les trois axes, ces deux vitesses sont données par l'équation

$$(v^2 - b^2)(v^2 - c^2) \cos^2 m + (v^2 - c^2)(v^2 - a^2) \cos^2 n + (v^2 - b^2)(v^2 - a^2) \cos^2 p = 0$$

Si le déplacement d n'est pas dirigé parallèlement au plus grand ou au plus petit rayon vecteur, et s'il fait un angle i avec l'un des deux, on peut le regarder comme l'effet résultant de deux déplacements, $d \cos i$ et $d \sin i$ dirigés suivant ces rayons vecteurs. Ces deux déplacements composants se propagent avec des vitesses proportionnelles aux rayons vecteurs, auxquels ils restent constamment parallèles; ils donnent les directions des vibrations de l'onde ordinaire et extraordinaire. On voit donc qu'une onde plane en O se décompose en deux autres polarisées à angle droit, et marchant avec des vitesses différentes dans la direction On . Si le point O appartient à la surface du milieu, de telle sorte que la vitesse change au point d'incidence, cette vitesse prenant des valeurs différentes pour les deux mouvements composants, les surfaces planes des ondes qui leur correspondent seront inclinées l'une sur l'autre, et les directions de la propagation dans le milieu seront différentes; comme cela résulte de l'explication de la réfraction (2840).

3027. Cas d'une onde plane naturelle. — Si les mouvements, au lieu de s'accomplir tous dans le plan de l'onde suivant une même direction, se succèdent dans des directions changeant à chaque instant, chacun des mouvements élémentaires pourra de même se décomposer en deux autres suivant les rayons vecteurs *maximum* et *minimum*, et nous aurons encore la décomposition de l'onde en deux autres polarisées dans des plans perpendiculaires au plus grand et au plus petit rayon vecteur.

3028. Axes optiques des cristaux. — La discussion de l'équation de la surface d'élasticité montre qu'il existe toujours deux plans diamétraux qui coupent cette surface suivant une circonférence. Ces deux plans ont pour intersection l'axe d'élasticité moyen, et sont placés symétriquement par rapport aux deux autres axes. Si b est l'axe moyen, et a le plus grand axe, ces plans forment avec les axes a et c , des angles dont la tangente est donnée par la formule $\tan \rho = \pm \sqrt{\frac{b^2 - c^2}{a^2 - b^2}}$.

Les ondes parallèles à ces sections circulaires ne peuvent avoir qu'une seule vitesse de propagation, puisque tous les rayons vecteurs sont égaux; et les déplacements se propagent parallèlement à leur première direction, quelle qu'elle soit. Si donc on taille dans un cristal une face parallèle à l'une de ces sections circulaires, et qu'on y introduise normalement une onde polarisée dans un plan quelconque, elle restera parallèle à la surface d'entrée, et n'éprouvera ni double réfraction ni changement dans la direction de son plan de polarisation. Les perpendiculaires aux sections circulaires coïncident sensiblement avec les axes optiques des cristaux à deux axes. L'axe moyen d'élasticité est perpendiculaire au plan de ces axes optiques, et les autres axes d'élasticité sont la ligne moyenne et la ligne supplémentaire, comme nous l'avons déjà vu (2946). Si les deux axes c et b sont égaux, on a $\tan \rho = \infty$, d'où $\rho = 90^\circ$; les deux sections circulaires se confondent donc en une seule perpendiculaire à la ligne moyenne: c'est le cas des cristaux à un axe. Il ne faudrait pas faire

$a = c$; car, b étant l'axe moyen, il en résulterait que les trois axes seraient égaux, ce qui reviendrait à supposer l'homogénéité, et alors $\tan \rho$ serait indéterminé, comme on pouvait le prévoir.

Les valeurs des trois axes a , b , c peuvent se déduire de celles des indices de réfraction $\frac{1}{a}$, $\frac{1}{b}$ et $\frac{1}{c}$, obtenus en taillant dans un même cristal trois prismes parallèles aux trois axes, dont les directions dans le cristal peuvent être connues par des moyens que nous indiquerons plus tard. C'est ce qui a été fait par Rudberg sur la topaze incolore et l'aragonite, et par Biot, de Sénarmont,..... sur divers autres cristaux. On a donc pu vérifier les relations qui existent entre les directions des axes optiques et celles des axes d'élasticité.

Comme les indices de réfraction sont différents pour les diverses couleurs simples, on voit que les axes d'élasticité, et par conséquent les directions des axes optiques, ne sont pas les mêmes pour les différentes couleurs, comme Herschel et Brewster l'ont remarqué dans plusieurs cristaux (2947).

3029. Surface de l'onde. — Nous avons considéré jusqu'à présent une onde plane, c'est-à-dire engendrée par des mouvements de l'éther s'accomplissant tous dans un même plan. Supposons maintenant que l'éther au point O (fig. 2064) soit animé *simultanément* de mouvements dans toutes les directions, comme cela aurait lieu en partie au foyer d'une lentille. Le lieu des points où arriveront tous les ébranlements après l'unité de temps, sera la surface de l'onde, dans la position où elle arrive au bout de ce temps. Tous les ébranlements dirigés dans un même plan donnant une onde plane, qui doit être, au bout de l'unité de temps, tangente à la surface de l'onde, on voit que celle-ci s'obtiendra en cherchant une surface tangente à toutes les ondes planes correspondant aux différentes directions des mouvements de l'éther en O ; la position de chaque onde plane étant déterminée comme il a été dit plus haut (3026). En suivant cette marche, Fresnel a trouvé pour l'équation générale de la surface de l'onde,

$$(a^2x^2 + b^2y^2 + c^2z^2)(x^2 + y^2 + z^2) - a^2(b^2 + c^2)x^2 - b^2(a^2 + c^2)y^2 - c^2(a^2 + b^2)z^2 + a^2b^2c^2 = 0$$

dans laquelle a , b , c sont les axes d'élasticité. Cette équation est du 4^e degré et représente une surface à deux nappes.

3030. Construction des rayons réfractés. — Soit ta (fig. 2065), l'intersection de la surface d'incidence avec le plan d'incidence sIt . Menons par le point I trois droites parallèles aux trois axes d'élasticité du cristal, et construisons la surface de l'onde, au moyen de son équation par rapport à ces axes, et en donnant à a , b et c les valeurs déterminées, comme il a été dit plus haut, en prenant la vitesse dans le vide pour unité. Si nous menons Ib perpendiculaire à sI , nous aurons le plan de l'onde incidente. Cette onde se propage dans le milieu, en donnant lieu à une ou deux ondes planes, qui arrivent, après t^2 , dans une certaine position qu'il s'agit de déterminer. Ces ondes planes coupent

l'onde incidente au point t , qu'elle atteint aussi après 1^s , suivant une droite située dans la face ta . Or, l'onde tb , après 1^s , vient en $t\beta$, et coupe la face ta suivant tz perpendiculaire au point d'incidence; le point t étant obtenu en abaissant sur la surface de l'onde tb , la perpendiculaire tb égale l'unité. Les plans des ondes réfractées devant, en outre, être tangents à la surface de l'onde, on les obtiendra en menant par la droite tz et au-dessous de la surface d'entrée ta , des plans tangents à la surface de l'onde¹. Les points de contact r , r' de ces plans tangents étant supposés déterminés, il suffira de les joindre au point I , pour avoir les deux rayons réfractés. On reconnaît ici la construction d'Huyghens (2936), mais plus générale, puisqu'elle s'applique aux cristaux à deux axes, et même aux corps non homogènes quelconques, comme le verre comprimé, trempé...., si la surface de l'onde, qui doit être très-irrégulière, pouvait être connue. On voit aussi qu'aucune des surfaces n'ayant la forme sphérique, aucun des deux rayons ne suivra la loi de Descartes. C'est ainsi que Fresnel découvrit qu'il n'y a pas, en général, de rayon ordinaire dans les biaxes; ce qu'il vérifia ensuite par l'expérience (2945).

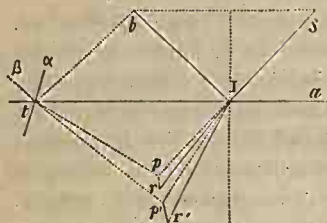


Fig. 2065.

Cas des uniaxes. — Si l'on a $b = c$, le cristal est à un axe, et l'équation de la surface de l'onde (3029) se décompose en deux autres :

$$x^2 + y^2 + z^2 - b^2 = 0,$$

$$\text{et } a^2 x^2 + b^2 (y^2 + z^2) - a^2 b^2 = 0.$$

La première représente une sphère de rayon b , et la seconde un ellipsoïde de révolution autour de l'axe a . Les rayons réfractés sont alors donnés par la construction d'Huyghens (2935). Si l'on suppose $a = b = c$, le milieu est homogène, la surface de l'onde se réduit à une sphère unique, et il n'y a plus qu'un rayon réfracté.

Remarques. — La surface de l'onde n'est pas, en général, normale aux rayons réfractés, et, par conséquent, les mouvements vibratoires ne sont pas exactement perpendiculaires aux rayons. C'est pourquoi l'on dit que les vibrations sont *transversales*, et non perpendiculaires. Il résulte aussi de là que les vitesses de propagation des deux ondes planes ne sont pas les mêmes que celles des rayons; car les dernières sont représentées par Ir et Ir' , et les premières, par les normales Ip , Ip' au plan tangent à la surface de l'onde.

3031. Direction des mouvements vibratoires. — Tous les mouvements vibratoires dans chacune des surfaces des ondes, sont parallèles entre eux, ces ondes étant polarisées. On démontre par le calcul que les directions de ces mouvements aux points, r et r' (fig. 2065) sont les projections des rayons

¹ La surface de l'onde étant du 4^e degré, il y a, en général, quatre plans tangents; mais les points de contact de deux d'entre eux sont en dehors du cristal et ne peuvent convenir.

sur les plans tangents en ces points. On obtient ces projections en menant les perpendiculaires Ip , Ip' aux intersections tp , tp' des plans tangents avec le plan d'incidence prolongé, et joignant rp et rp' . — Cette construction n'est plus possible quand le rayon est normal à la surface de l'onde; mais cela n'a lieu que pour des directions particulières des rayons transmis, pour lesquelles la direction des vibrations est connue d'avance.

3032. Plan de polarisation. — Les mouvements vibratoires étant obliques au rayon, on ne peut pas, en général, mener par le rayon un plan perpendiculaire à la direction de ces mouvements. Fresnel prenait pour plan de polarisation, le plan normal à la vibration et passant par la perpendiculaire Ip (fig. 2065). Mais on pourrait tout aussi bien adopter le plan passant par le rayon et perpendiculaire au plan du triangle Irp . Toute incertitude disparaîtrait, si l'on considérait, au lieu du plan de polarisation, le *plan du rayon* (2960). Du reste, les plans de polarisation, définis des deux manières, diffèrent très-peu dans tous les cristaux connus. On peut donc adopter l'une ou l'autre définition. Il est à remarquer que, dans les deux cas, les plans de polarisation des deux rayons ne sont pas rigoureusement perpendiculaires l'un à l'autre, si ce n'est pour certaines directions particulières, ou quand il s'agit de cristaux uniaxes.

La définition adoptée par Fresnel conduit à énoncer la position du plan de polarisation d'une manière différente de celle de Biot (3006); mais les résultats obtenus des deux manières ne diffèrent que de quelques minutes. On peut donc regarder les expériences de Biot comme vérifiant les résultats de Fresnel, et on ne sait lequel admirer le plus, de la perfection de la théorie, ou de la sagacité et de la dextérité qu'il a fallu, pour démêler par l'expérience des lois aussi compliquées.

3033. Vitesse de propagation. — Les vitesses de la lumière suivant les rayons réfractés, sont représentées par les rayons vecteurs Ir , Ir' (fig. 2065). Quand on considère deux rayons suivant la même direction et provenant de rayons incidents différents, leurs vitesses sont données par la formule

$$\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2} = \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{a^2} \right) \sin \alpha \sin \alpha',$$

en désignant par α et α' les angles que fait la direction commune de ces rayons avec les *axes optiques*. La différence $\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2}$ est donc proportionnelle au produit des *sinus* des angles α et α' ; ce résultat avait été antérieurement déduit de l'expérience par Biot et par Brewster; seulement $\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2}$ était remplacé par $v^2 - v'^2$ (2949), v et v' , dans le système de l'émission, alors admis, ayant la même signification que $1 : v$ et $1 : v'$ dans le système des ondulations (2862). On voit que, dans le cas des uniaxes, la formule s'applique aux deux rayons séparés provenant d'un même rayon incident, puisque la vitesse du rayon ordinaire reste la même dans toutes les directions.

3034. Discussion de la surface de l'onde. — Cherchons, en partant de l'équation de la surface de l'onde (3029), les particularités que présente cette surface dans le cas général où les trois axes sont inégaux, et voyons d'abord suivant quelles courbes elle est coupée par les plans des axes d'élasticité. En faisant successivement x, y, z nuls, on trouve

$$\text{Pour } x = 0, \quad (y^2 + z^2 - a^2)(b^2y^2 + c^2z^2 - b^2c^2) = 0$$

$$\text{Pour } y = 0, \quad (z^2 + x^2 - b^2)(c^2z^2 + a^2x^2 - c^2a^2) = 0$$

$$\text{Pour } z = 0, \quad (x^2 + y^2 - c^2)(a^2x^2 + b^2y^2 - a^2b^2) = 0$$

On voit que chacune des intersections est l'ensemble d'une *circonférence* et d'une *ellipse*. En supposant toujours $a > b$, et $b > c$, nous voyons que, dans le plan yOz , la circonférence est extérieure à l'ellipse, puisque son rayon a est plus long que le grand axe b de celle-ci. Dans le plan, xOy , c'est l'ellipse qui enveloppe la circonférence. Mais dans le plan xOz , c'est-à-dire dans le plan principal perpendiculaire à l'axe moyen, le rayon b de la circonférence ayant une valeur intermédiaire entre celle des axes a et c de l'ellipse, les deux courbes se coupent. C'est ce que nous avons représenté précédemment (*fig.* 2042) (2949); seulement l'axe moyen était dirigé suivant Oz , au lieu de l'être suivant Oy , comme nous venons de le supposer. La forme circulaire de l'intersection de l'une des nappes avec chacun des plans principaux, montre que l'un des rayons réfractés aura une vitesse constante dans ce plan, quelle que soit sa direction, et, par conséquent, que ce rayon suivra les lois de Descartes, comme nous l'avons déjà vu (2948). On trouvera ce rayon, ainsi que le rayon extraordinaire, au moyen de la construction d'Huyghens, en menant des *tangentes* à la circonférence et à l'ellipse d'intersection; car il est facile de voir que le plan tangent à la surface de l'onde en un point de l'ellipse, est perpendiculaire au plan principal; puisque, l'équation de la surface de l'onde ne contenant que les carrés des coordonnées, cette surface est partagée par chacun des plans principaux, en deux parties symétriques.

Si la surface d'incidence étant normale à l'un des axes, le rayon incident entrait normalement, les plans tangents servant à construire les rayons réfractés seraient parallèles, et leurs points de contact seraient situés sur la normale à la surface d'incidence. Les deux rayons réfractés suivraient donc la même direction, mais avec des vitesses différentes. Si en même temps le rayon était polarisé dans un plan perpendiculaire à l'un des axes parallèles à la face d'incidence, l'un des rayons transmis disparaîtrait, et toute la lumière serait rassemblée dans l'autre, dont le plan de polarisation coïnciderait avec celui du rayon incident.

Axes optiques. — Les vitesses des deux rayons sont égales, dans les directions des rayons vecteurs Oa, Oa' (*fig.* 2066), qui joignent, dans le plan principal perpendiculaire à l'axe moyen, les intersections a, a, a', a' des courbes elliptique et circulaire. Ces directions sont les *axes optiques*; ils font avec l'axe de

plus grande élasticité, des angles donnés par la formule $\tan \varphi = \frac{a}{c} \sqrt{\frac{b^2 - c^2}{a^2 - b^2}}$.

Il faut remarquer que ces axes optiques ne coïncident pas exactement avec les perpendiculaires aux sections circulaires de la surface d'élasticité (3028).

3035. Réfraction conique intérieure. — Considérons encore les courbes d'intersection des deux nappes de la surface de l'onde avec le plan principal perpendiculaire à l'axe moyen (fig. 2066). Ces deux courbes se coupent en quatre points, et l'on peut leur mener quatre tangentes communes mn , $m'n'$, m_1n_1 , $n'm_1$. Ces tangentes sont parallèles deux à deux, aux sections circulaires de la surface d'élasticité (3026). Or, M. Hamilton a reconnu, en discutant l'équation de la surface de l'onde, qu'un plan perpendiculaire au plan principal et passant par une quelconque de ces tangentes, est tangent aux deux nappes, non-seulement aux points m et n , mais encore à tous les points d'une courbe sensiblement circulaire, dont le plan est parallèle à l'axe moyen d'élasticité, et dont les divers points sont inégalement distants du centre de l'onde O . Si donc on taille dans un cristal biaxe une plaque dont les faces soient parallèles à deux de ces plans tangents, un rayon entrant normalement donnera une infinité de rayons réfractés, situés sur la surface d'un cône oblique passant par la courbe de contact, mn , parallèle à la face d'incidence. Le résultat serait le même, si, la face d'entrée étant oblique au plan mn , l'incidence était telle que le rayon réfracté entrât parallèlement à l'axe optique Oa .

Tube lumineux émergent. — Chaque rayon réfracté donnant à l'émergence un rayon parallèle au rayon incident, on voit que le faisceau émergent formera un cylindre creux parallèle au rayon incident. Cette conséquence curieuse de la théorie, qui avait échappé à Fresnel, a été vérifiée par M. Lloyd; sur une plaque d'aragonite taillée perpendiculairement à la ligne moyenne. Un pinceau très-fin de rayons solaires passant successivement par deux petits trous et tombant sur la plaque, donnait deux images; en inclinant peu à peu la plaque, on cherchait l'incidence pour laquelle le faisceau réfracté était parallèle à l'un des axes optiques, et alors on distinguait, avec une loupe, dans le faisceau émergent, un anneau brillant dont le diamètre, indépendant de la distance, était d'autant plus grand que le cristal était plus épais. On peut aussi rendre le faisceau tubulaire plus gros, en lui faisant traverser deux lentilles convergentes placées à une distance $f + F$ l'une de l'autre, f et F étant leurs longueurs focales. La première lentille concentre les rayons à son foyer, et la seconde les ramène à la forme de tube plus gros, si F est plus grand que f .

Ces résultats avaient échappé aux observateurs avant que la théorie ne les eût signalés, parce que les plaques employées étant trop minces, le tube lumineux avait un diamètre à peine supérieur à celui du faisceau incident; de plus, celui-ci était habituellement trop gros pour que le phénomène fût distinct.

Direction des mouvements vibratoires. — Menons la normale On au

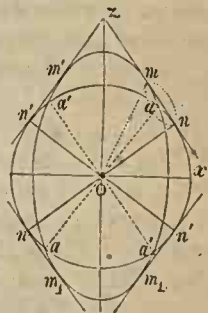


Fig. 2066.

plan tangent mn (fig. 2066), et joignons son pied au point où un rayon quelconque rencontre la courbe de contact; nous aurons la direction des mouvements vibratoires dans ce rayon (3032). Il résulte de là, que les plans de polarisation de deux rayons diamétralement opposés sont perpendiculaires l'un à l'autre; car mrr' (fig. 2067), étant la courbe de contact, et m le pied de la normale On (fig. 2066), les deux rayons aboutissant aux extrémités d'un même diamètre rr' (fig. 2067), auront pour projection sur le plan de l'onde plane, les droites mr, mr' perpendiculaires l'une à l'autre. Si l'on considère deux rayons quelconques aboutissant en r et r'' , on voit que l'angle des directions mr, mr'' de leurs mouvements vibratoires, est la moitié de l'angle ror'' que font entre eux des plans menés par ces rayons et par l'axe du cône oblique dont la base est $mr'n$.

Axes de réfraction conique. — Les deux perpendiculaires $nOn, n'On'$ (fig. 2066) aux plans tangents $mn, m'n'$, se nomment les *axes de réfraction conique*. On voit qu'ils sont situés dans le plan perpendiculaire à l'axe moyen, comme les axes optiques; mais ils ne se confondent pas avec ces derniers.

L'angle qu'ils forment avec l'axe de plus grande élasticité est donné par la formule $\text{tang } \rho' = \sqrt{\frac{b^2 - c^2}{a^2 - b^2}}$; tandis que, dans

la valeur de $\text{tang } \rho$ pour les axes optiques Oa, Oa' , le radical est multiplié par $a:c$ (3034). Mais comme, dans tous les cristaux connus, $a:c$ diffère peu de l'unité, ρ' diffère peu de ρ ; et les axes optiques et ceux de réfraction conique coïncident sensiblement. Par exemple, pour la chaux sulfatée anhydre, dont la double réfraction est des plus énergiques, on a

$c : a = 0,9725$; et pour la topaze, $0,9939$.

3036. Réfraction conique à l'émergence. — La découverte par la théorie, et la vérification expérimentale du phénomène curieux de la réfraction conique, ont apporté à la théorie de la double réfraction, et en particulier à l'hypothèse des vibrations transversales, une confirmation d'autant plus remarquable qu'elle était plus inattendue. M. Hamilton a découvert une autre particularité singulière qui se présente aux extrémités des axes optiques, et qui a été également vérifiée par l'expérience :

Nous avons défini les axes optiques des cristaux à deux axes, des directions suivant lesquelles les rayons réfractés ne se bifurquent pas; nous allons voir que cette définition ne leur convient pas; mais comme ils se confondent sensiblement avec les axes de réfraction conique, suivant lesquels les rayons ne se bifurquent pas, les premiers observateurs s'y sont trompés. Fresnel, guidé par la théorie, avait remarqué que, dans le plan perpendiculaire à l'axe d'élasticité moyen, on peut mener deux tangentes aux extrémités a, a', a', a' (fig. 2066) des axes optiques, et plus tard M. Hamilton a démontré que ces points sont des *ombilics*, c'est-à-dire qu'ils se trouvent au fond d'une cavité conoïde très-évasée en forme de pavillon de cor, de manière qu'il y a en ces points une



Fig. 2067.

infinité de plans tangents, dont les intersections deux à deux forment un cône oblique. Il résulte d'abord de là, que des rayons incidents situés sur un certain cône, pourront se réunir en un seul rayon réfracté suivant un des axes optiques. En effet, soit At (fig. 2068) une face taillée dans un cristal, à peu près perpendiculairement à l'un des axes optiques Ia , et Aat le plan perpendiculaire à l'axe moyen, sur lequel sont tracées les intersections de la surface de l'onde avec ce plan. Menons la tangente at au point a ; nous pourrons, en faisant en sens inverse la construction d'Huyghens (2936), trouver, en partant du point a , la direction d'un rayon incident sI donnant le rayon réfracté Ia . La tangente at fera connaître un second rayon incident $s'I$ se réfractant aussi suivant Ia . On pourra faire une construction analogue dans tous les plans passant par Ia : on mènera un plan tangent au point a , perpendiculairement au plan considéré, puis, du point I , une perpendiculaire, dans la face d'incidence, à l'intersection du plan tangent avec cette face; ce qui donnera le plan d'incidence, dans lequel on achèvera la construction à la manière ordinaire. On obtiendra ainsi un cône oblique de rayons incidents donnant des rayons réfractés marchant tous suivant Ia . Si le cristal est terminé par une seconde face parallèle à At , chaque rayon incident donnant un rayon émergent parallèle à sa direction, il se formera en E un cône creux de rayons ayant ses arêtes respectivement parallèles à celles du cône incident sIs' . Le plan de polarisation de chacun de ces rayons s'obtiendra en joignant au point a , le pied de la perpendiculaire au plan tangent qui lui correspond; ce qui donnera la direction du mouvement vibratoire auquel le plan de polarisation est normal.

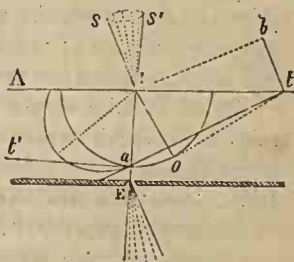


Fig. 2068.

3037. Vérification par l'expérience. — M. Llyod, qui a réalisé tous ces phénomènes, obtenait le faisceau conique incident sIs' au moyen de rayons solaires traversant une lentille dont l'axe était normal à la face At d'une plaque d'aragonite taillée perpendiculairement à l'un de ses axes optiques. Le foyer étant en I , le cristal était traversé par un faisceau normal aboutissant en E à une petite ouverture pratiquée dans un écran appliqué sur la seconde face de la plaque. On observait dans le faisceau émergent, soit à travers une loupe, soit sur un écran, un anneau lumineux, dont le diamètre augmentait avec la distance de l'écran au point E .

Si l'on observe le cône émergent, à travers un prisme de Nicol, l'anneau lumineux paraît interrompu dans la section principale de ce prisme; ce qui montre que les vibrations se font bien dans cette section principale, et par conséquent dans des plans passant par l'axe du cône.

Soleil a construit un petit appareil destiné à répéter ces diverses expériences. La lentille, la plaque cristallisée et la loupe sont fixées à une règle

articulée sur un pied, le cristal pouvant s'incliner autour d'un axe situé dans son plan. Il faut d'assez longs tâtonnements pour ajuster l'appareil, la plaque n'étant jamais exactement perpendiculaire à l'un des axes, et les résultats sont assez confus; ce qui provient de lumière étrangère au cône, entrant dans la pupille.

M. Lissajous fait disparaître cet inconvénient en plaçant l'écran troué, non plus sur la face de sortie du cristal, mais à l'ocillon de la loupe. M. Laurent a construit un petit appareil d'après ce même principe, dans lequel il emploie des loupes assez fortes pour que les phénomènes soient distincts avec une plaque d'aragonite de 6^{mm} seulement d'épaisseur.

L'aragonite paraît être l'espèce minérale la plus favorable à l'observation de la réfraction conique, mais il est difficile de trouver des plaques pures et suffisamment épaisses. M. Nodot a eu l'idée de chercher si parmi les cristaux d'espèce chimique, il ne s'en trouverait pas de préférables à l'aragonite. Ses recherches ont été couronnées de succès, et il a reconnu que le sucre et le bichromate de potasse, dont on obtient facilement des cristaux épais et très-limpides, et dont le premier a une face naturelle et le second une face de clivage perpendiculaire à l'un des axes, remplacent avantageusement l'aragonite. L'acide tartrique, dont il faut tailler par tâtonnement deux faces perpendiculaires à un des axes, lui a surtout donné des résultats remarquables; à égalité d'épaisseur, il produit un cône dont l'angle d'ouverture est double de celui que donne l'aragonite.

3038. Définition des axes optiques. — Il est à remarquer que chaque rayon incident, tel que *sl* (fig. 2068) donne, indépendamment du rayon réfracté suivant l'axe *la*, un autre rayon, tel que *lo*, que l'on obtient, en général, en menant par le point *l*, et par une droite menée par ce point perpendiculairement au plan d'incidence, un second plan tangent à la surface de l'onde. Par conséquent, les rayons qui suivent les axes sont généralement accompagnés d'un second rayon résultant d'une bifurcation qui a lieu au point d'incidence. La définition que nous avons donnée des axes optiques ne peut donc plus être conservée. Leur propriété caractéristique consiste en ce qu'ils peuvent être parcourus avec la même vitesse par des rayons polarisés dans des plans quelconques passant par leur direction, et c'est cette propriété qui doit leur servir de définition.

CHAPITRE XIII

POLARISATION CHROMATIQUE

« ... On peut, à l'aide d'une simple lame mince de mica et d'un cristal doué de double réfraction, séparer successivement de la lumière blanche les divers rayons colorés dont elle se compose. »

(ARAGO *Mém. sur la polaris.*, Œuvres, t. X, p. 48.)

§ 1. — RAYONS PARALLÈLES.

I. Couleurs produites par les lames cristallisées.

3039. Découverte de la polarisation chromatique. — Arago, ayant regardé à travers un spath d'Islande, une lame de mica qui se projetait sur un ciel serein, aperçut deux images de la lame, colorées de nuances différentes. Ayant remarqué que cet effet ne se produisait plus quand le ciel était couvert, il l'attribua à la polarisation de la lumière de l'atmosphère et entreprit de nombreuses expériences sur des rayons polarisés directement. Il découvrit alors une série de faits remarquables, qu'il publia en 1811, et que Brewster découvrait de son côté, à Édimbourg; mais les expériences de Brewster ne furent connues en France que plus tard. Aujourd'hui, l'étude de ces phénomènes forme une branche de l'optique, désignée sous le nom de *polarisation chromatique* ou *couleurs de la lumière polarisée*. Biot, Young, Brewster, Mitscherlich..., ont le plus contribué à en trouver les lois, et Fresnel en a donné la théorie dans le système des ondulations. Nous allons d'abord décrire les expériences.

3040. Méthodes d'observation. — Les résultats dépendant de l'angle de la lame cristallisée avec les rayons incidents, et de celui que fait sa section principale avec le plan de polarisation de ces rayons, il faut pouvoir faire varier ces angles de quantités connues. L'appareil de Biot (*fig.* 2048) remplit cette condition. La lame biréfringente est fixée au centre d'un anneau *n*, pouvant tourner sur lui-même, dans une bague qu'on peut incliner plus ou moins sur l'axe de l'instrument. Des cercles divisés indiquent les angles de rotation.

Appareil de Norremberg. — Cet appareil (*fig.* 2069) se prête facilement à toutes les expériences. La lumière incidente *sn* est polarisée partiellement par réflexion sur une glace sans tain, *vv*, pouvant basculer autour de l'axe *aa*, et qui la renvoie de haut en bas sur un miroir étamé *o*. Là, les rayons sont réfléchis verticalement de bas en haut; traversent la glace *vv*, et passent au milieu d'un

plateau *c*, dit *porte-cristal*, destiné à recevoir la lame cristallisée. Cette lame est posée sur une plaque circulaire qui peut tourner sur elle-même dans un anneau gradué, dont le zéro se trouve dans le plan de polarisation des rayons.

On peut substituer à cette plaque, un anneau *n* qui porte un disque de verre pouvant s'incliner plus ou moins, et sur lequel on pose la lame. Le polariscope placé en *p*, peut tourner sur lui-même de quantités mesurées par un cercle gradué. En *e*, est un écran qui empêche la lumière directe de frapper le plateau *cc*, et, en *l*, une lentille mobile dont nous verrons plus tard l'usage.

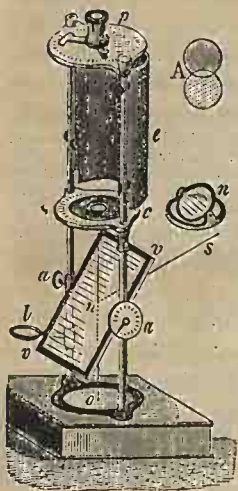


Fig. 2069.

Dans le passage des rayons réfléchis en *o*, à travers la glace *vv*, il se polarise un peu de lumière par réfraction, qui détruit une quantité égale de celle qu'a polarisée la réflexion. En outre, une partie de celle-ci est réfléchiée par la glace *vv*, en proportion d'autant plus grande que l'incidence est moins éloignée de l'angle de polarisation. On évite ces deux inconvénients en renvoyant, au moyen d'un miroir étamé placé à côté de l'appareil, la lumière du ciel sur la face supérieure de la glace *vv*, inclinée de manière que l'incidence sur cette glace soit voisine de l'angle de polarisation.

Quand on ne veut qu'observer les phénomènes, sans faire de mesures, on peut simplement regarder à travers la lame cristallisée et le polariscope tenu à la main, la lumière du ciel réfléchiée sur l'eau, ou sur une table de marbre ou de bois verni. Si la lame est fixée à un chevalet oblique posé sur la table, et le

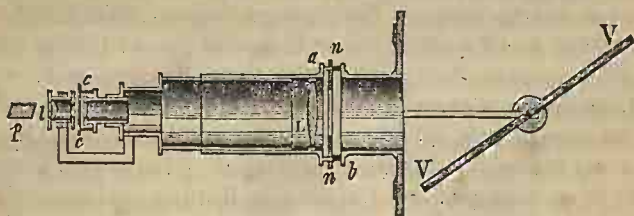


Fig. 2070.

polariscope, à un pied vertical, on a la disposition générale de l'appareil de M. Lebaillif. On peut enfin se servir d'une lunette de Rochon (2942), et viser, à travers la lame de cristal, la lumière réfléchiée par un miroir de verre; on verra deux images colorées.

3041. Appareils de projection. — Les images colorées peuvent être

projetées sur un écran, au moyen d'un appareil imaginé par Soleil, et qui ressemble beaucoup au microscope solaire (2542). VV (fig. 2070) est un miroir en verre noir à double mouvement, sur lequel les rayons solaires se polarisent par réflexion. La lame cristallisée est fixée à un diaphragme que l'on engage dans la coulisse *ab*, où elle est maintenue par une plaque trouée à ressorts, *nn*; les rayons modifiés en la traversant, sont rendus convergents par une lentille *L*, et vont faire en *cc*, une image circulaire dont une seconde lentille *l* placée à une distance un peu supérieure à son propre foyer principal, donne une nouvelle image sur un écran éloigné. Un polariscopé placé en *p* colore l'image, en la doublant s'il est biréfringent. Quand on adapte cet appareil à la lanterne de projection (2543), la lumière est polarisée par une pile de glaces, ou par un prisme biréfringent.

Appareil Duboscq.—

Cet appareil, au moyen duquel on peut montrer par projection tous les phénomènes de polarisation, consiste en une règle à coulisse horizontale (fig. 2071), portant un tube à polariseur *P*, et un système analyseur, *DA*, qui se fixent au moyen de vis de pression. L'ouverture *E* du tube *P* se place en face

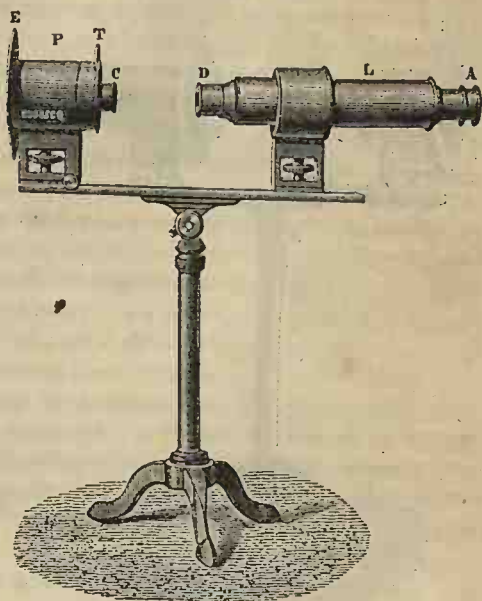


Fig. 2071.

recevant les rayons solaires, ou de celle de la lanterne à projections munie d'une lentille qui rend les rayons parallèles (2543). En *P*, sont deux prismes en spath d'Islande, à arêtes parallèles à leur axe optique et dont les effets s'ajoutent. Chacun d'eux est accompagné d'un prisme en crown qui détruit la déviation du rayon ordinaire polarisé dans la section principale, pendant que le rayon extraordinaire, dévié de 11° environ, est rejeté loin de l'axe de l'appareil. En *T* est un disque tournant à ouvertures variables, et en *C* une tubulure à laquelle on ajuste les lames cristallisées.

Le système analyseur *DA* contient en *L* une lentille convergente qui projette sur un écran éloigné l'image de l'ouverture *C*, et porte en *A* un spath à faces parallèles, qui donne deux images dont une, l'image ordinaire, se forme sur le prolongement de l'axe de l'appareil.

Si l'on enlève la lame cristallisée placée en C, et si l'on fait tourner l'analyseur A, on voit l'image extraordinaire tourner autour de l'image ordinaire et ces images varier d'intensité suivant les lois connues (3007). En superposant un second spath en A, après avoir enlevé les prismes polariseurs placés en P, on peut répéter l'expérience des spaths croisés (3009). Si enfin on place en C une lame mince parallèle à l'axe, d'un cristal biréfringent, on observe les effets de couleurs que nous allons décrire.

Quand on veut opérer sur une large lame, on remplace le système analy-

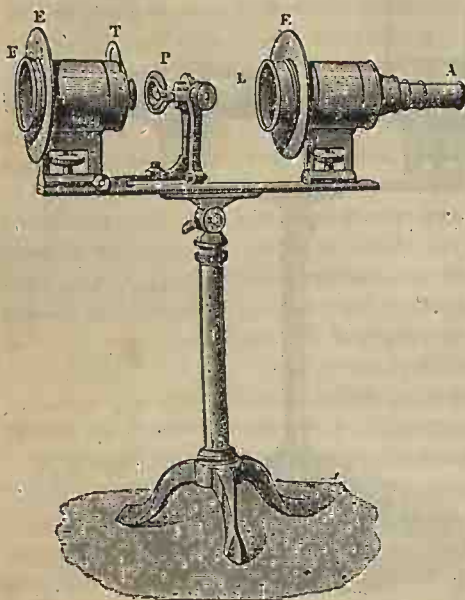


Fig. 2072.

seur P (fig. 2071) par le système EA (fig. 2072) et l'on rend divergents les rayons qui émanent du polariseur ET, de manière à éclairer toute la surface de la lame. La pièce P, dont nous verrons plus tard l'usage, étant enlevée, on adapte en F une lentille qui fait converger les rayons parallèles en un focus placé un peu au-delà du trou du disque tournant T, les rayons se croisent et viennent éclairer la lame placée en L. Cette lame est appliquée contre une lentille convergente qui joue le rôle de la demi-boule de la lanterne magique (2540), et une seconde lentille, placée en A un peu avant un prisme de Nicol, donne sur un écran,

une image de cette lame, que l'on rend nette en enfonçant plus ou moins le tube A, qui contient le nicol et sa lentille.

3042. DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES. — Si l'on reçoit un faisceau polarisé, dans un polariscope orienté de manière à éteindre ce faisceau, on voit, en général, la lumière reparaitre quand on place avant le polariscope, une lame taillée dans un cristal biréfringent. La chaleur éteinte dans les mêmes conditions, reparait également en partie. On exprime quelquefois ce résultat en disant que le cristal *dépolarise* le faisceau. Mais la lumière qui sort de la lame n'est pas neutre; car, si cette lame a une faible épaisseur, le faisceau est coloré. Nous verrons plus tard que ce n'est pas non plus de la lumière polarisée ordinaire. C'est avec un polariscope biréfringent que les phénomènes s'observent

le plus complètement, parce qu'on peut comparer deux images se formant dans des conditions différentes. Supposons donc qu'on fasse usage d'un prisme biréfringent achromatique, et désignons par α et β les angles que font les sections principales de la lame et du prisme avec le plan de polarisation des rayons incidents. Supposons enfin que la lame soit taillée parallèlement à son axe, et qu'elle soit placée sur le porte-cristal de l'appareil de Norremberg, ou en c ou D (fig. 2070), de manière que les rayons la traversent normalement.

1^o Quand la section principale du polariscope est *parallèle* au plan de polarisation des rayons incidents, c'est-à-dire quand on a $\beta = 0$, on voit, en général, deux images de l'ouverture du diaphragme qui limite le faisceau lumineux; et, si la lame est suffisamment mince, ces images présentent des couleurs qui dépendent de son épaisseur et de sa substance. Ces couleurs sont complémentaires; car, si les images empiètent l'une sur l'autre, A (fig. 2069), la partie commune est blanche. Les couleurs ont leur *maximum* d'éclat quand la section principale de la lame forme un angle de 45° avec celle du prisme. Si alors on fait tourner la lame, les couleurs pâlissent *sans changer de nuance*, jusqu'à ce que la section principale de la lame coïncide avec celle du prisme, alors il n'y plus que l'image ordinaire; ou lui soit perpendiculaire, alors on ne distingue plus que l'image extraordinaire. *L'image unique est blanche*, et si l'on dépasse la position pour laquelle elle se montre, les deux couleurs changent d'image jusqu'à une nouvelle extinction de l'une d'elles. De ces faits, résulte un moyen de trouver la section principale de la lame.

2^o Quand la section principale du prisme est normale au plan de polarisation, on observe des phénomènes semblables; seulement, la couleur de l'image ordinaire passe à l'image extraordinaire, et la première image disparaît, dans la position de la lame qui faisait disparaître la seconde, et *vice versa*.

3^o Supposons que, la lame étant fixe, on fasse tourner le prisme, on observera des résultats dont la plupart peuvent être prévus par ce qui précède. Quand la section principale du prisme sera parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame, les deux images seront blanches. L'une d'elles disparaîtra, si en même temps l'on a $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90^\circ$. Si $\alpha = 45^\circ$, les deux images blanches seront égales et auront leur *maximum* d'intensité. Si le prisme dépasse l'une des positions qui donnent les images blanches, les couleurs reparaitront, mais en changeant d'image.

4^o Quand on a $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90^\circ$, les deux images sont blanches, quel que soit β . Elles sont égales, pour $\beta = 45^\circ$; et disparaissent, comme on l'a vu plus haut, l'une pour $\beta = 0$, l'autre pour $\beta = 90^\circ$.

Si, au lieu d'un prisme biréfringent, on emploie un polariscope ne donnant qu'une image, cette image se comporte comme une image ordinaire, ou comme l'image extraordinaire, suivant l'espèce de polariscope employé.

Si l'on se sert d'une pile de glaces, on peut observer l'image transmise, ou celle qui est réfléchie sur la première glace, et l'on reconnaît que les couleurs de ces images sont complémentaires; ce qu'il était facile de prévoir, la réflexion

et la réfraction éteignant la lumière polarisée dans des azimuts perpendiculaires l'un à l'autre. — Enfin, il n'y a pas de couleurs quand la lame cristallisée est perpendiculaire à l'axe, sauf pour certaines substances, comme le cristal de roche, qui produisent la *polarisation rotatoire*, dont nous traiterons dans le dernier chapitre.

3043. Influence de l'épaisseur. — Tout restant dans le même état, si l'on fait varier l'épaisseur de la lame cristallisée, les couleurs des images changent, et Biot a reconnu qu'elles passent par des nuances qui suivent, relativement aux épaisseurs, les mêmes lois que les couleurs des lames minces. Chaque couleur peut donc être du premier, du deuxième, du troisième..., ordre, et si la lumière est simple, on observe des alternatives de lumière et d'obscurité. Mais, ici, les épaisseurs, qui varient avec la nature des lames, n'ont plus besoin d'être aussi petites. D'après Biot, si l'on prend pour unité l'épaisseur d'une lame mince d'air, celle qui donnerait la même couleur serait, avec le mica de Sibérie, 440; avec la chaux sulfatée et le cristal de roche, 230; avec le spath d'Islande, 13. Quand on place la lame sur le miroir *o* de l'appareil de Norremberg (*fig.* 2069), on obtient la couleur qui correspond à une épaisseur double, la lumière traversant deux fois cette lame.

Limite d'épaisseur. — On n'obtient d'images colorées qu'autant que l'épaisseur n'est ni trop grande ni trop faible. Les limites sont, pour le sulfate de chaux, 0^{mm},423 et 1^{mm},269, et à peu près les mêmes pour le quartz. Une lame de mica doit avoir moins de 0^{mm},085. Ces trois corps se prêtent donc facilement aux expériences. Mais le spath d'Islande ne devrait pas avoir plus de 0^{mm},025.

Applications. — Les changements de couleur avec les épaisseurs, peuvent servir à produire divers effets curieux : on colle sur une plaque de verre, une lame de sulfate de chaux dans laquelle on creuse une cavité sphérique à très-grand rayon, et on la met sur le porte-cristal de l'appareil de Norremberg, ou en L (*fig.* 2072). On voit alors des anneaux colorés qui suivent les mêmes lois que ceux qui se voient dans l'appareil de Hooke (2903). Si la lame de sulfate de chaux est taillée en prisme à angle très-aigu, les couleurs forment des franges parallèles aux arêtes. On peut encore former, en creusant plus ou moins la lame de sulfate de chaux, des dessins de fleurs, de papillons, etc., dont les différentes parties présentent des couleurs vives et variées, suivant l'épaisseur qu'on leur a laissée et la position de la lame quand on la fait tourner dans son propre plan. Si l'on remplit les cavités d'un baume de même réfrangibilité que le sulfate, les dessins sont invisibles dans la lumière naturelle. — Des lames de mica de différentes épaisseurs collées les unes à côté des autres, imitent des vitraux peints, etc.

3044. Lames inclinées. — Nous avons supposé la lame perpendiculaire aux rayons incidents. Si on l'incline peu à peu, les couleurs changent, tantôt comme si l'épaisseur augmentait, tantôt comme si elle diminuait, suivant le sens de l'inclinaison, comme la théorie nous l'indiquera (3052).

Teinte sensible. — Parmi les couleurs, il en est une qui est nommée *teinte sensible*, parce qu'une faible variation dans l'inclinaison suffit pour produire un changement sensible de nuance. Cette teinte est un *violet-bleuâtre*; d'après Biot, elle correspond à une lame d'air de $0^{\text{mm}},00053$ d'épaisseur. Une lame de mica traversée normalement par des rayons polarisés, donne la teinte sensible, quand son épaisseur est $0^{\text{mm}},248$; et des lames de gypse et de quartz, quand leur épaisseur est $0^{\text{mm}},130$ et $0^{\text{mm}},123$. Il y a une seconde teinte sensible, de couleur violette, mais moins fugitive que la première.

3045. Duplication des lames. — On peut obtenir des couleurs avec des lames épaisses, en en superposant deux de même espèce, de manière que leurs sections principales soient perpendiculaires. Alors l'effet est celui d'une lame unique ayant pour épaisseur la différence $e - e'$ des épaisseurs des lames. Si les sections principales étaient parallèles, l'effet serait celui d'une lame d'épaisseur $e + e'$. Si les lames sont de nature différente et de même signe, il faudra encore employer la *duplication croisée*, pour obtenir des couleurs. Si, au contraire, l'une appartient à un cristal positif, et l'autre à un cristal négatif, il faudra employer la *duplication parallèle*.

Ces lois donnent un moyen facile de reconnaître le signe d'un cristal : on y taille une lame épaisse parallèle à l'axe, qu'on pose sur une lame de spath d'Islande, et l'on voit si les couleurs apparaissent dans la duplication croisée, ou dans la duplication parallèle. Dans le premier cas, le cristal est négatif comme le spath, et dans le second, il est de signe contraire.

Fresnel a tiré parti de la duplication, pour étudier l'influence de la chaleur sur le sulfate de chaux (2950) : il croisa deux lames de cette substance ayant des épaisseurs un peu trop inégales pour donner des couleurs, il en chauffa une, et vit les couleurs apparaître et se succéder dans le même ordre que si la lame échauffée diminuait peu à peu d'épaisseur.

3046. DE L'EXPLICATION DE LA POLARISATION COLORÉE. — Aussitôt après la découverte de la polarisation chromatique, Biot chercha à l'expliquer, dans le système de l'émission, au moyen de l'hypothèse de la *polarisation mobile*, dont il a suivi toutes les conséquences avec une rare sagacité¹. Cette hypothèse consiste à admettre que les particules de lumière simple, dont les pôles sont tournés de la même manière dans le rayon polarisé incident, pénètrent d'abord dans la lame cristallisée, jusqu'à une certaine profondeur e , en conservant cette orientation, puis se mettent à osciller de part et d'autre de la section principale, de manière à accomplir une oscillation entière pendant le parcours d'un espace égal à $2e$. Si donc l'épaisseur de la lame est e , la lumière se comporte comme si cette lame était homogène; si cette épaisseur est $2e$, le plan de polarisation à l'émergence sera dévié d'une quantité égale à la demi-amplitude des oscillations des particules; si l'épaisseur devient $3e$, la déviation sera nulle. De là les différences d'intensité suivant l'épaisseur, quand on reçoit les rayons simples sur un

¹ *Traité de physique, etc.*, par Biot, t. IV, p. 317.

analyseur fixe. Les valeurs de e sont différentes pour les diverses couleurs simples; d'où résulte la coloration de la lumière blanche, l'intensité de chacun des rayons simples étant modifiée d'une manière différente. Cette théorie n'explique que difficilement un grand nombre de faits, et se trouve en défaut dans plusieurs cas importants.

Young, ayant remarqué que les deux faisceaux polarisés possèdent, en sortant de la lame cristallisée, les mêmes différences de marche que les rayons réfléchis à la première et à la seconde surface des lames minces donnant la nuance du même ordre, chercha à rattacher la polarisation chromatique au principe des interférences. Mais il laissa l'explication à l'état d'ébauche. Fresnel, adoptant le point de départ d'Young, parvint à établir une théorie très-satisfaisante de ces phénomènes.

30-17. Théorie de Fresnel¹. — Voici le principe de cette théorie : un faisceau polarisé qui traverse normalement une lame mince cristallisée parallèle

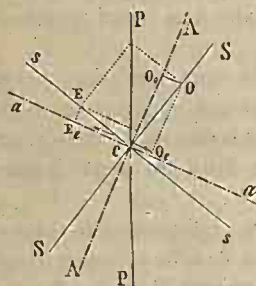


Fig. 2073.

à l'axe, se décompose en deux autres polarisés et d'intensités généralement différentes, qui suivent la même route, leur séparation étant insensible sous une faible épaisseur. Ces faisceaux possèdent des vitesses inégales, de manière que leurs ondulations ne sont plus d'accord à la sortie, celles des rayons qui marchent le plus lentement se trouvant en retard sur celles des autres rayons. Ces deux groupes de rayons ne peuvent cependant interférer, étant polarisés à angle droit. Mais, si on les amène à avoir le même plan de polarisation, au moyen d'un polariscope, ils pourront interférer, et le faisceau émergent présentera une intensité qui dépendra de la différence de marche qu'auront les deux rayons à la sortie de la lame. Quand on opère avec de la lumière blanche, les longueurs d'ondulation des divers rayons simples, et par conséquent les différences de marche qui leur correspondent étant inégales, leurs intensités à l'émergence se trouvent modifiées dans des proportions différentes, et la couleur de ceux qui ont été le moins affaiblis domine. Il reste à appliquer le calcul à ces considérations, pour en comparer les résultats à ceux que donne l'expérience.

30-18. Calcul des intensités des rayons émergents. — Soit PP (fig. 2073), la trace du plan de polarisation du faisceau incident sur un plan normal à ce faisceau; SS la trace sur le même plan de la section principale de la lame cristallisée, dont les faces sont parallèles à l'axe, et α l'angle de ces deux traces. Si 1 est l'intensité du faisceau incident polarisé, ce faisceau se divisera, dans la lame cristallisée, en deux autres, l'un d'intensité $O = \cos^2 \alpha$, polarisé dans la section principale; l'autre $E = \sin^2 \alpha$, polarisé dans un plan

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. XVII, pp. 102 et 267.

perpendiculaire, *ss* (3008). Chacun de ces faisceaux se partagera à son tour, dans l'analyseur biréfringent ; et, si nous désignons par β l'angle de la section principale AA de l'analyseur avec le plan primitif de polarisation PP, l'angle de cette section avec celle, SS, de la lame, sera $\alpha - \beta$, et les deux faisceaux O et E donneront quatre faisceaux, dont les intensités seront

$$\begin{cases} O_o = O \cos^2(\alpha - \beta) = \cos^2 \alpha \sin^2(\alpha - \beta), & \text{polarisé suivant AA.} \\ O_e = O \sin^2(\alpha - \beta) = \cos^2 \alpha \sin^2(\alpha - \beta), & \text{polarisé suivant aa perpendiculaire à AA.} \\ E_o = E \sin^2(\alpha - \beta) = \sin^2 \alpha \sin^2(\alpha - \beta), & \text{polarisé suivant AA.} \\ E_e = E \cos^2(\alpha - \beta) = \sin^2 \alpha \sin^2(\alpha - \beta), & \text{polarisé suivant aa.} \end{cases}$$

Ces quatre faisceaux ne sont pas sensiblement séparés, à cause de la faible épaisseur de la lame. O_o et E_o polarisés suivant AA, forment le faisceau ordinaire, et O_e et E_e , polarisés suivant aa, composent le faisceau extraordinaire. Les intensités des faisceaux O_o et E_o ne s'ajoutent pas, comme on pourrait le croire au premier abord. En effet, le premier a subi la réfraction ordinaire dans la lame et dans l'analyseur, et le second a éprouvé la réfraction extraordinaire dans la lame, et la réfraction ordinaire dans l'analyseur ; et, comme les vitesses ordinaire et extraordinaire sont inégales, les deux faisceaux, à leur sortie de l'analyseur, ne sont plus d'accord ; l'un d'eux se trouve en retard sur l'autre, et il en résulte qu'ils peuvent, en interférant, se détruire plus ou moins complètement, ou s'ajouter, suivant la différence de marche. Cette différence se produit tout entière dans la lame ; car, dans l'analyseur, ces deux rayons éprouvent la réfraction ordinaire.

Appelons d la différence de marche, et λ la longueur d'ondulation ; on démontre, par l'analyse, que l'intensité du faisceau résultant de la combinaison de deux faisceaux polarisés dans un même plan et ayant séparément les intensités v^2 et v'^2 , v et v' étant les vitesses de vibration, est donnée par la formule

$$v^2 + v'^2 + 2vv' \cos 2\pi \frac{d}{\lambda} = (v - v')^2 - 2vv' \left(1 + \cos 2\pi \frac{d}{\lambda}\right). \quad [1]$$

Remplaçant v^2 et v'^2 par les valeurs ci-dessus de O_o et E_o , il vient pour l'intensité I_o du rayon ordinaire émergent du polariscope,

$$\begin{aligned} & [\cos \alpha \cos(\alpha - \beta) - \sin \alpha \sin(\alpha - \beta)]^2 - 2 \sin \alpha \cos \alpha \sin(\alpha - \beta) \cos(\alpha - \beta) \left(1 - \cos 2\pi \frac{d}{\lambda}\right) \\ \text{ou} \quad I_o &= \cos^2 \beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda} \quad [2] \end{aligned}$$

De même, les deux rayons O_e et E_e ne s'ajouteront pas intégralement, et ils auront, à leur sortie, une différence de marche, d'où résultera une intensité donnée par la formule [1]. De plus, il faut remarquer que les plans de polarisation de ces deux rayons se sont écartés dans les deux réfractions, pour venir se placer suivant aa, de manière que leurs vitesses de vibration se trouvent, au

même moment, de signes contraires ; l'une de ces vitesses étant dans le sens de c à O_e (fig. 2073), pendant que l'autre a lieu de c à E_e , ce qui équivaut à un retard supplémentaire de $\frac{1}{2}\lambda$. Il faudra donc changer le signe d'une des vitesses O_e et E_e , et la formule [1] donnera, en faisant les mêmes transformations que pour le rayon ordinaire,

$$I_e = \sin^2 \zeta + \sin^2 \alpha \sin^2 (\alpha - \zeta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda} \quad [3]$$

Les formules [2] et [3] donnent les intensités des rayons ordinaire et extraordinaire de chaque espèce de lumière simple, en fonction de la longueur d'ondulation λ qui lui correspond, et de la différence de marche d . Pour évaluer cette différence, qui se produit dans le passage à travers la lame, il suffit de prendre la différence des indices de réfraction ordinaire et extraordinaire de la lumière considérée, et de la multiplier par l'épaisseur de la lame. On obtient ainsi la différence de chemin qu'aurait parcouru cette lumière dans l'air, avec la vitesse ordinaire et extraordinaire, pendant le temps qu'elle met à traverser la lame. On voit que l'épaisseur ne doit pas être trop petite, pour que la différence de route soit sensible.

Ce qui précède s'applique à une lame prise dans un cristal à deux axes ; seulement SS représente alors la *ligne moyenne*. Nous allons voir avec quelle fidélité les formules [2] et [3] représentent tous les phénomènes.

3049. Explication des couleurs. — 1° La somme des valeurs de I_o et I_e est égale à 1 ; les intensités des deux images sont donc complémentaires. Mais la différence entre ces intensités varie avec λ ; elle n'est donc pas la même pour les différentes couleurs simples ; d'où il résulte que, si l'on emploie la lumière blanche, les rayons simples se trouveront en proportion différente dans les deux images ; de là leur coloration, ou la *dispersion par double réfraction*. En outre, ces deux images réunies contenant toute la lumière incidente, puisque $I_o + I_e$ est égal à 1 pour toutes les couleurs, il se forme de la lumière blanche partout où il y a superposition ; les couleurs des deux images sont donc complémentaires.

2° La différence de route d varie d'une couleur à l'autre, puisqu'elle dépend de la différence des indices ; mais elle est très-petite, pour le sulfate de chaux, le cristal de roche et la plupart des autres cristaux. Si donc on suppose d constant et qu'on porte sa valeur dans les formules [2] et [3], ainsi que les différentes valeurs de λ , on obtiendra les intensités des faisceaux ordinaire et extraordinaire pour chaque couleur, et l'on pourra calculer, au moyen de la règle empirique de Newton (2598), la nuance formée, dans chaque faisceau, par le mélange de ces couleurs en proportions données par ces intensités. Les résultats ainsi obtenus sont d'accord avec ceux que Biot avait trouvés par l'expérience, dans ses recherches sur la polarisation mobile.

3° On voit que, pour obtenir des couleurs, il est nécessaire que la lumière incidente soit polarisée. Car la lumière naturelle pouvant être considérée comme

formée de rayons polarisés dans un plan qui prend toutes les directions dans un temps très-court (2959), les deux images passent pendant ce temps par les deux couleurs complémentaires et par toutes leurs intensités successives; ces deux images sont donc blanches et d'égale intensité.

4° **Images blanches.** — Il est évident que les deux images seront blanches, quand les valeurs de I_o et I_e resteront les mêmes quel que soit λ ; c'est-à-dire quand le terme qui contient cette quantité sera nul, ce qui aura lieu quand on aura $\sin 2x \sin 2(x - \beta) = 0$. On satisfait à cette condition en posant $\sin 2x = 0$, ou $\sin 2(x - \beta) = 0$. La première égalité donne

$$x = 0, \quad x = 90^\circ, \quad x = 180^\circ, \quad x = 360^\circ;$$

ce qui exprime que la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation. La seconde donne

$$\beta = x, \quad \beta = 90^\circ + x, \quad \beta = 180^\circ + x, \quad \beta = 360^\circ + x;$$

ce qui revient à dire que la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire à celle de l'analyseur. — Ces conditions auraient pu être trouvées *a priori*; car, dans le premier cas, la lame ne donne qu'un seul faisceau (3009) que l'analyseur ne peut par conséquent colorer, et qu'il ne dédouble même plus quand on a $\beta = 0$, ou $\beta = 90^\circ$. Dans le second, l'analyseur éteint un des faisceaux, et divise simplement celui qui reste.

5° **Constance des couleurs.** — Le second terme des valeurs de I_o et I_e n'a pas la même valeur pour les divers rayons simples; c'est pourquoi la couleur se manifesté quand ce terme n'est pas nul. Mais comme, pour chaque valeur de λ , l'intensité de la lumière est modifiée par le second terme, proportionnellement au facteur $\sin 2x \sin 2(x - \beta)$, on voit que la teinte restera la même quand x et β varieront; seulement cette teinte sera d'autant plus faible, c'est-à-dire d'autant plus lavée de blanc, que ce facteur sera plus petit, pour la valeur de I_e ; et d'autant plus prononcée qu'il sera plus grand, pour celle de I_o , dans laquelle le second terme est précédé du signe (—). Si x et β sont tels que le second terme soit négatif, le contraire aura lieu, c'est-à-dire que l'image ordinaire sera plus colorée, et l'extraordinaire plus pâle.

Le changement de signe a lieu au moment du passage par les images blanches, et c'est alors aussi qu'a lieu la *permutation des teintes*. Tout cela suppose que le premier terme est toujours plus grand que le second, ce qui a lieu effectivement, l'intensité de la lumière ne pouvant être négative.

6° **Coloration maximum.** — Les images présentent les couleurs les plus vives quand $\sin 2x \sin 2(x - \beta)$ est *maximum*; car ce produit est le coefficient du facteur qui contient λ , dans le second terme des valeurs de I_o et I_e , et il détermine les différences d'intensité des images correspondant aux diverses couleurs simples. Si d'abord x est constant et quelconque, le *maximum* du

produit $\sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta)$ a lieu quand $2(\alpha - \beta)$ est égal à 90° , ce qui suppose $\beta = \alpha + 45^\circ$, c'est-à-dire quand les deux sections principales font un angle de 45° . Si, en même temps, $\sin 2\alpha$ est *maximum*, ce qui a lieu quand $\alpha = 45^\circ$, on a le plus grand *maximum* d'éclat.

3050. Conséquences. — Il résulte de ce qui précède que : 1° Deux rayons polarisés à angle droit, et par conséquent incapables d'interférer, peuvent le faire quand on les ramène au même plan de polarisation au moyen d'un polariscope. — 2° Il faut, pour que cela ait lieu, que les deux rayons polarisés à angle droit proviennent d'un rayon unique polarisé, et non d'un faisceau naturel. Car nous avons vu que, dans ce dernier cas, on n'obtient pas les couleurs qui indiquent qu'il y a interférence (3049, 3°). Arago et Fresnel, dans les expériences de diffraction par lesquelles ils ont établi la direction transversale des vibrations de l'éther (2958), avaient constaté directement ce fait : les deux fentes étant couvertes par deux tourmalines dont les axes formaient un angle droit, les franges ne se manifestaient pas quand on faisait coïncider les plans de polarisation au moyen d'un polariscope. — 3° Quand le rayon primitif est polarisé, l'interférence résulte de la différence de marche des rayons ordinaire et extraordinaire dans la plaque cristallisée qui les polarise en sens inverse, augmentée ou non augmentée, suivant les cas, d'une demi-longueur d'ondulation (3048).

3051. Variation des couleurs avec l'épaisseur. — Si, α et β restant constants, on change l'épaisseur de la lame, à laquelle d est proportionnel, la valeur de d varie pour chaque espèce de lumière, et I_e et I_o variant d'une manière différente suivant la valeur de λ , la couleur des images change. Mais il est à remarquer que le facteur $\sin^2 \pi d : \lambda$ reprenant périodiquement les mêmes valeurs pour des augmentations d'épaisseur correspondant à un nombre entier de fois λ , les mêmes couleurs se reproduiront périodiquement quand l'épaisseur variera comme les nombres 1, 2, 3... Si cependant l'épaisseur était trop grande, les couleurs disparaîtraient, par suite de perturbations, comme dans les anneaux des lames minces.

On voit aussi que, pour obtenir une teinte d'un certain ordre, il faut que la lame soit d'autant plus mince que la différence entre les indices ordinaire et extraordinaire est plus grande; et que l'épaisseur *maximum* est d'autant plus petite que cette différence est aussi plus grande; c'est pourquoi ce *maximum* est très-petit pour le spath d'Islande (3043).

Duplications parallèle et croisée. — Si l'on superpose deux plaques de même substance parallèles à l'axe, il est évident qu'elles produiront le même effet qu'une seule plaque d'épaisseur égale à la somme de leurs épaisseurs, quand les axes seront parallèles. Si les axes sont perpendiculaires, et si le cristal est négatif, le rayon extraordinaire possédant une vitesse v_e plus grande que celle, v_o , du rayon ordinaire, la différence de marche de ces deux rayons sera $e(v_e - v_o)$; e étant l'épaisseur de la première lame. Le rayon extraordinaire, en pénétrant dans la seconde lame, ne donnera qu'un rayon ordinaire (3009),

qui marchera avec la vitesse v_o , tandis que le rayon ordinaire qui sort de la première lame, ne donnera qu'un rayon extraordinaire marchant avec la vitesse v_e ; et la différence de marche acquise par ces deux rayons dans leur trajet à travers la seconde lame, sera $e'(v_e - v_o)$, v_e étant plus grand que v_o . La différence de marche totale à travers les deux plaques s'obtiendra donc en retranchant ces deux différences, qui sont en sens contraire, le rayon qui va le plus vite dans la première, allant le plus lentement dans la seconde. La différence totale sera donc $(e - e')(v_e - v_o)$, comme si la lumière avait traversé une plaque d'épaisseur égale à la différence des deux plaques.

Si les deux plaques étaient de nature différente, et toutes deux de même signe, le résultat serait $e(v_e - v_o) - e'(v'_e - v'_o)$; v'_e et v'_o étant les vitesses des deux rayons dans la seconde lame. Si les lames étaient de signe contraire, le même rayon aurait la plus grande vitesse dans les deux, et le retard serait le même que si l'épaisseur était $e + e'$. Pour retrouver l'effet de l'épaisseur $e - e'$, il faudrait donc placer les axes parallèles.

Si l'on avait plus de deux plaques, il est facile de voir ce qu'il y aurait à faire pour calculer la différence de marche.

3052. Changement de couleur avec l'inclinaison. — Quand la lame cristallisée est inclinée par rapport aux rayons incidents, pour chaque inclinaison, les changements d'intensité et les permutations de couleurs, quand on fait tourner la lame sur elle-même, suivent les mêmes lois que pour l'incidence normale. Mais si, en inclinant la lame par rapport aux rayons, on fait varier l'angle d'incidence, la couleur change, d'abord parce que l'épaisseur traversée augmente, et aussi parce que les rayons formant avec les axes un angle qui varie, la différence de marche, à égalité d'épaisseur, est modifiée par cette circonstance.

Considérons, par exemple, une lame uniaxe, parallèle à l'axe. Si on l'incline en la faisant tourner autour de l'axe, les couleurs changent par l'influence seule de l'épaisseur traversée; car la différence de marche n'est pas alors modifiée par les variations de l'angle d'incidence (2935, 1°). Mais si la lame tourne autour d'une droite perpendiculaire à l'axe, à mesure qu'elle s'incline, les rayons réfractés se rapprochent de cet axe, ce qui tend à diminuer leur différence de marche (2935, 2°), pendant qu'elle augmente par l'effet du plus long trajet à travers la lame. Comme cette différence devient nulle, quelle que soit l'épaisseur, quand les rayons marchent suivant l'axe, on voit qu'il y a une certaine inclinaison pour laquelle une petite variation ne change pas la différence de marche, et à partir de laquelle l'augmentation d'inclinaison fait diminuer cette différence au lieu de l'augmenter. Jusque-là, les couleurs se succèdent comme si l'on augmentait l'épaisseur, et au delà, comme si on la diminuait.

Si les faces de la lame étaient inclinées sur l'axe, de manière qu'on pût amener ce dernier à avoir la direction des rayons incidents parallèles, il n'y aurait plus de différence de marche, et l'on ne verrait plus de coloration, ainsi que le montre l'expérience. — Si la lame et le polariscope sont tournés de manière à

donner une image blanche, cette image reste toujours blanche pendant qu'on incline la lame; le terme qui contient $d : \lambda$, dans les valeurs de I_0 et I_2 , étant alors nul.

Si la lame tourne autour d'une droite dirigée dans son plan obliquement à l'axe, les phénomènes se compliquent, et les effets participent de ceux qui se manifestent dans les deux cas particuliers que nous venons d'examiner.

Avec une lame à deux axes, les résultats sont encore plus compliqués. Ils sont cependant assez faciles à saisir dans certains cas particuliers : 1° Si l'on fait tourner la lame dans un sens quelconque autour d'une droite parallèle à la ligne moyenne, les couleurs changent comme si l'épaisseur augmentait, jusqu'à ce qu'elles passent au blanc. — 2° Si l'on fait tourner la lame autour d'une droite parallèle à l'axe moyen d'élasticité, qui est perpendiculaire au plan des axes, et si l'on suppose la lame perpendiculaire à la ligne moyenne, comme dans les feuilles de mica, on voit les couleurs changer comme si la lame diminuait d'épaisseur, jusqu'à ce que celui des axes optiques qui se rapproche des rayons parallèles incidents, coïncide avec leur direction; il y a alors obscurité, comme en l'absence de la lame. Si l'on dépasse cette position, les couleurs reparaissent et se succèdent comme si la lame devenait de plus en plus épaisse, et passent par tous les ordres, jusqu'à ce que la lumière devienne blanche.

3053. Colorigrades et cyanomètres. — Les changements de couleur des lames cristallisées quand on les incline, ont été appliqués par Biot à la construction d'un *colorigrade* destiné à donner une échelle des couleurs. Cet instrument consiste en une lame de mica, qu'on incline plus ou moins entre un polariseur et un polariscope, de manière à obtenir une succession de nuances, faciles à retrouver en observant, sur un cercle divisé, sous quelle inclinaison chacune d'elles se produit. Au lieu d'une seule lame, on peut en employer deux, qu'on incline plus ou moins l'une sur l'autre, et dont on croise plus ou moins les axes, de manière à obtenir une grande variété de nuances.

Cyanomètre de Biot. — Une lame de mica d'épaisseur convenable pour donner un bleu pur; mais plus ou moins lavé de blanc suivant l'angle que fait sa section principale avec celle du polariscope, forme un *cyanomètre*. Chaque ton est exprimé par l'angle des deux sections principales; le bleu le plus vif se montre à 45°, et il passe au blanc quand l'angle est nul ou de 90° (3049).

Cyanomètre d'Arago. — Cet instrument est disposé comme le *polarimètre* décrit plus haut (3022), auquel on ajoute une feuille de papier tendue perpendiculairement à son tube, derrière la pile de glaces. La lame de cristal de roche placée en *c* (fig. 2062) a 5^{mm} d'épaisseur, et la couleur qu'elle donne change avec l'angle des sections principales de la pile de glaces et du prisme biréfringent placé en *o*. Parmi les couleurs qu'on obtient en faisant tourner le prisme, se trouve la nuance bleu de ciel, et cette nuance est d'autant plus prononcée que la pile polarise une plus grande proportion de la lumière qu'elle transmet. Pour évaluer la teinte bleue d'un point du ciel, il suffira donc de diriger l'instrument vers ce point, et de faire varier l'inclinaison de la pile de glaces, jusqu'à

ce que le bleu observé dans l'instrument paraisse identique avec celui du ciel, que l'inclinaison de la pile servira à définir.

3054. Application à la photométrie. — Le même instrument peut être employé comme photomètre ; on dispose deux feuilles de papier, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle à son axe, et à égale distance du centre de la pile de glaces. On incline celle-ci de 45° sur l'axe, et l'on observe dans l'instrument les images superposées et de couleur complémentaire des deux feuilles de papier. Comme il y a la même proportion de lumière polarisée dans la réflexion et dans la réfraction (2992), si les deux feuilles de papier sont également éclairées, les deux images, en se superposant, formeront du blanc. On éclairera donc les deux feuilles, séparément, par les lumières à comparer, on éloignera la plus intense jusqu'à ce que les deux images forment du blanc, et l'on écrira que les intensités des lumières sont en raison directe des carrés de leurs distances respectives aux feuilles de papier. Le principe de cette méthode, qui ne convient évidemment qu'aux lumières incolores, a été appliqué par Babinet à la construction d'un photomètre que nous décrirons plus tard.

II. Couleurs produites dans la double réfraction accidentelle.

3055. Double réfraction accidentelle. — On nomme ainsi la double réfraction qui se développe dans les corps quand on trouble leur homogénéité (2929). Mais, le plus souvent, les rayons bifurqués s'écartent trop peu pour qu'on puisse les distinguer l'un de l'autre. La coloration que les corps biréfringents impriment à la lumière polarisée, fournit alors un moyen d'observation d'une sensibilité extrême, et c'est en partant de ces phénomènes que Fresnel a été conduit à attribuer la double réfraction à la structure non homogène des cristaux.

Les expériences se font ordinairement au moyen de l'appareil de Norremberg (*fig.* 2069) ; les résultats sont très-brillants quand la plaque est posée sur le miroir inférieur, les rayons polarisés le traversant alors deux fois. On peut aussi projeter l'image colorée, sur un écran, soit au moyen de l'appareil (*fig.* 2070), soit au moyen de l'appareil de M. Dubosq (*fig.* 2072), en plaçant la plaque en L. On peut même photographier l'image projetée, en ayant soin d'absorber les rayons chimiques obscurs au moyen d'une solution de sulfate de quinine.

3056. Verre trempé. — Une plaque épaisse de verre, trempée en la chauffant fortement et la faisant refroidir en l'agitant modérément dans l'air, acquiert la propriété de donner, dans la lumière polarisée parallèle, de vives couleurs formant des figures qui dépendent du contour des plaques, de la position du polariscope, et de la manière dont la plaque est tournée dans son propre plan. Ce phénomène a été découvert par Seebeck, en 1813, pendant que Brewster découvrait, de son côté, que les larmes bataviques dont on est parvenu à user la panse, donnent de vives couleurs dans la lumière polarisée. Les phénomènes

s'observent facilement avec les appareils que nous venons de citer. On peut aussi les observer sans polariseur, en recevant dans le polariscope la lumière des nues réfléchie obliquement en dedans sur la face inférieure de la plaque.

Les couleurs acquièrent la plus grande vivacité, quand le polariscope est placé de manière à éteindre la lumière polarisée incidente, et alors on remarque des espaces noirs. Si ensuite on tourne le polariscope de 90° , les parties noires sont remplacées par des parties blanches, et chaque couleur, par sa couleur complémentaire. Entre ces deux positions du polariscope, on voit les courbes colorées se contourner et se déplacer, de manière à passer graduellement d'une disposition à l'autre. La figure 2074 représente les dessins formés dans une plaque carrée placée sur le porte-cristal de l'appareil de Norremberg, et dont deux côtés sont parallèles au plan primitif de polarisation. Quand le polariscope est tourné à l'obscurité, on obtient l'aspect B, et si on le tourne de 90° , l'aspect A. Quand on amène une des diagonales de la plaque à être parallèle au plan de polarisation, on voit les bras de la croix noire, B, se recourber en forme d'S.



Fig. 2074.

Les lames de verre trempées par la méthode de M. de la Bastie (1, 546) produisent tous ces phénomènes. Si le verre trempé dans l'air a été refroidi avec ménagement, on peut le tailler comme le verre recuit; et, suivant la forme qu'on lui donne, obtenir des dessins d'une grande variété.

Ces divers résultats s'expliquent par les irrégularités de structure occasionnées par la trempe, dont les effets sont plus prononcés près de la surface et vers les angles, que dans les parties intérieures. L'irrégularité de distribution des molécules, et par suite de l'éther, fait que les rayons parallèles éprouvent, dans les différentes régions qu'ils traversent, la double réfraction à des degrés divers; d'où résulte une coloration variable. Les figures présentent une symétrie qui dépend de celle du contour de la lame, sur laquelle la trempe a agi de la même manière sur les parties qui présentent la même configuration. On peut modifier à l'infini la forme des courbes colorées, en recuisant certains endroits d'une même plaque de verre, par l'application de pièces de métal brûlant de différentes formes.

Une plaque circulaire, sur laquelle la trempe agit symétriquement tout autour de son axe, donne des anneaux concentriques irisés, avec une croix dont un bras est parallèle au plan primitif de polarisation. Cette croix, noire quand le polariscope est tourné à l'obscurité, s'explique en remarquant qu'il résulte de la régularité de distribution des molécules autour de l'axe de la plaque, que chaque plan diamétral est une section principale. Or, toute lumière disparaît dans la section principale parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation; car, s'il s'agit d'un polariscope ne laissant passer que le rayon extraordinaire, la valeur de I_e (3048) devient nulle quand on a $\beta = 0$ ou $\alpha = 90^\circ$. — Si le polariscope tourne de 90° , on a $I_e \sin^2 \beta = 1$, ce qui

explique la croix blanche qui remplace alors la croix noire. Souvent, les anneaux et la croix sont déformés; la trempe n'ayant pas agi régulièrement sur le contour.

Brewster a donné le moyen suivant, de reconnaître les points où le verre, rendu biréfringent par la trempe, est positif ou négatif. On pose sur la plaque une lame d'un cristal positif, de manière que son axe soit normal à la courbe colorée qui passe par le point considéré. Si la couleur pâlit, c'est que le verre en ce point est positif, comme le cristal. Si la couleur devient plus vive, il est négatif, d'après ce que nous avons vu plus haut (3051).

3057. Polariscopes de Babinet. — Cet instrument consiste simplement en une plaque de verre trempé ajustée à l'extrémité d'un tube dont l'autre extrémité porte une tourmaline ou un prisme de Nicol. La moindre proportion de lumière polarisée traversant cet instrument, est décélée par l'apparition de figures colorées qui changent quand on le fait tourner sur lui même. On s'en sert particulièrement pour étudier la polarisation de l'atmosphère.



Fig. 2075.

3058. Induration, etc. — Brewster ayant fait sécher de la colle de poisson dans des moules de verre, de manière à obtenir des plaques de différentes formes, obtint des figures analogues à celles que donnent des plaques de verre trempé de même forme. C'est que la colle, en se desséchant, éprouve un retrait différent près des bords et dans les parties centrales où la solidification se fait plus lentement. — Seebeck a obtenu des figures colorées avec des plaques de borax fondues et refroidies rapidement, de sel marin rapidement desséchées, et de gomme arabique obtenues par une prompte évaporation.

3059. Double réfraction temporaire. — On peut développer la double réfraction en altérant temporairement l'homogénéité d'un corps transparent, soit par des actions mécaniques, soit par la chaleur ou l'électricité.

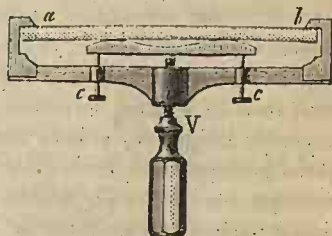


Fig. 2076.

Compression. — Si l'on comprime, au moyen d'une vis V, une plaque épaisse de verre, entre deux talons arrondis (fig. 2075), cette plaque traversée par de la lumière polarisée, et observée au moyen d'un analyseur, présente, autour des points de compression, des courbes diversement colorées. On voit en A, la figure formée quand la ligne de compression est inclinée de 45° sur le plan primitif de polarisation, et en P celle qui se forme quand elle est perpendiculaire à ce plan, l'analyseur étant tourné à l'obscurité. C'est au moyen de plaques formées de colle de poisson, de gelée de pied de veau, et surtout d'un mélange

de cire blanche et de résine, qu'il comprimait simplement entre ses doigts, que Brewster a fait ses premiers essais sur la double réfraction produite par la compression.

M. Maxwell, ayant plongé une spatule dans du baume de Canada très-fluide traversé par des rayons polarisés reçus dans un polariscope tourné à l'obscurité, vit la lumière apparaître sur les bords de la spatule quand il la déplaçait dans son propre plan, et disparaître aussitôt que le mouvement cessait.

Flexion. — L'expérience suivante, due à Brewster, montre à la fois l'effet de la compression et celui de la dilatation par traction. Une règle de verre *ab* (fig. 2076), appuyée en *a* et *b*, et légèrement courbée au moyen d'une vis *V*, donne des bandes colorées parallèles à sa longueur, dont le nombre et l'éclat changent avec la flexion et la direction par rapport au plan de polarisation. —

Brewster a reconnu, en appliquant une lame cristallisée (3051), que la compression communique à une lame de verre la double réfraction négative, et l'expansion, la double réfraction positive.

Vibrations. — Biot, ayant excité des vibrations longitudinales dans une bande de verre de 2^m de longueur placée entre le polariscope et le polariseur de son appareil (2962) disposé pour donner l'obscurité, vit, à chaque friction, jaillir une vive lumière, dont l'éclat et la couleur dépendaient du mode de frottement et de son énergie. Il avait soin d'observer à l'endroit d'un nœud, parce que c'est là que la densité change le plus: M. E. Mach a fait diverses expériences sur le même sujet.



Fig. 2077.

3060. Dilatation. — On fait chauffer régulièrement dans de l'huile bouillante une plaque de verre épaisse, et on la place dans un cadre métallique de même forme, qui la refroidit promptement sur son contour, de manière à en détruire momentanément l'homogénéité; ou bien, on fait chauffer le cadre tenu par un manche assez long (fig. 2077), et l'on y introduit la plaque de verre, qui s'échauffe par son contour. Dans les deux cas, on obtient avec la lumière polarisée, des figures irisées analogues à celles des plaques trempées de même forme, et qui disparaissent quand la température est devenue uniforme. Ces phénomènes ont été découverts par Seebeck et par Brewster. On peut reconnaître, en superposant une lame cristallisée, qu'un disque de verre échauffé par son contour est négatif, tandis qu'il est positif quand on procède par refroidissement. En superposant deux plaques de même forme, l'une chauffée, l'autre refroidie, les couleurs disparaissent; ce qui prouve que ces plaques sont de signe contraire, puisque la différence de marche acquise dans la première, est annulée par une différence en sens contraire, dans la seconde.

Une plaque rectangulaire allongée, posée sur une règle de fer très-chaude, donne des bandes irisées (fig. 2078) qui, chose singulière, sont disposées à peu près de la même manière près du bord échauffé et près du bord opposé; ce qui tient probablement à ce que l'écartement des molécules produit par la dilatation,

est accompagné d'une flexion qui rapproche celles du bord opposé. Ces bandes colorées, qui changent avec la position du polariscope, se déplacent et se modifient, pendant que la chaleur se propage dans la plaque.

3061. Électricité sur les diélectriques transparents. — On avait remarqué que les plaques de verre percées par une forte décharge électrique présentaient les propriétés optiques du verre trempé: M. J. Kerr a constaté, en outre, que l'électricité peut, par une action continue, modifier temporairement la structure du verre et lui donner la double réfraction¹. Il fore suivant la longueur, dans un petit barreau de verre, deux trous opposés de 2 à 3^{mm} de diamètre, laissant entre leurs deux extrémités un espace non foré de 6^{mm} environ. La longueur du barreau est 15^{cm} et les côtés de sa section ont 2 et 3^{cm}. Les deux trous sont remplis par des tiges de cuivre mastiquées à la gomme-laque. La partie du verre non forée est traversée par les rayons d'une lampe, polarisés par un nicol, puis reçus dans un second nicol analyseur dont la section principale est perpendiculaire à celle du premier. Cependant l'obscurité n'est pas complète, le verre présentant toujours un peu de trempé, mais on l'obtient par tâtonnement, en interposant une lame du même verre, de manière à établir la compensation. Le barreau étant incliné de 45° sur les sections principales des deux nicols, on fait communiquer les tiges de cuivre avec les pôles d'une bobine de Ruhmkorff ou d'une forte machine électrique. Un excitateur placé dans le circuit donne des étincelles de 15^{cm}, et la partie de verre comprise entre les électrodes est

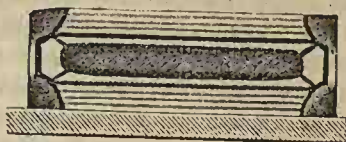


Fig. 2078.

fortement induite par l'électricité qu'elles reçoivent et qui ne peut traverser le verre. On voit alors la lumière reparaitre au bout de quelques secondes, et atteindre un *maximum* après 20 à 30 secondes. Si l'on supprime l'électricité, la lumière s'affaiblit peu à peu et disparaît après un temps d'autant plus long que l'induction a été plus énergique et plus prolongée, et qui peut atteindre près d'une heure. L'effet n'est sensible que jusqu'à une certaine distance de l'axe des électrodes et devient faible et irrégulier quand cet axe s'écarte de 45° avec les plans principaux des nicols. Le renversement alternatif des courants pendant les décharges ne modifie pas les résultats. Ces phénomènes prouvent que les molécules du verre prennent la polarisation électrique suivant les idées de Faraday (III, 1645), et s'arrangent en files, d'où résulte une modification de structure qui se manifeste par des effets lumineux dans la lumière polarisée. Le verre et le quartz soumis à l'induction sont négatifs comme le verre comprimé, tandis que la résine est positive.

Des expériences analogues faites sur divers liquides, sulfure de carbone, benzol, essence de térébenthine neutre, huile d'olive, ont donné des résultats

¹ *Phil. mag.* (3), t. L, p. 337, et *Journal de Physique*, t. IV, p. 376, et t. V, p. 98.

semblables, seulement la lumière apparaît et disparaît instantanément, au moment où l'on établit et où l'on supprime l'induction.

3062. Polarisation lamellaire. — Les cristaux appartenant au système régulier ne produisent pas la double réfraction; cependant Biot a reconnu, au moyen des couleurs dans la lumière polarisée, des indices de double réfraction dans des cristaux d'alun. Mais ces cristaux n'étaient pas homogènes, car on y distinguait des couches minces superposées, indiquant une cristallisation imparfaite. Bravais a aussi observé des phénomènes analogues dans divers cristaux appartenant au système régulier, et Brewster, dans des cristaux de spath-fluor, de sel gemme, de sel ammoniac, d'analcime, appartenant au même système; et ils s'expliquent également par un défaut de cristallisation. Biot a nommé *polarisation lamellaire* celle qui est produite dans ces conditions. Cette sorte de polarisation s'observe dans divers corps organisés à structure lamellaire ou fibreuse, par exemple dans le cristallin de l'œil, les tuyaux de plume, les appendices minéraux qui garnissent les téguments de certains animaux inférieurs.

Astérisme. — La structure fibreuse de certains cristaux donne lieu au phénomène de *l'astérisme*. Des lames de ces cristaux, taillées perpendiculairement à l'axe, peuvent présenter, quand on les place entre l'œil et une vive lumière naturelle, une étoile blanchâtre, le plus souvent à six rayons. Cette apparence, désignée sous le nom d'*astérie*, s'observe quelquefois par réflexion. L'astérisme ne se manifeste pas avec tous les cristaux d'une même espèce minérale, mais particulièrement avec ceux dont la transparence est troublée par quelque défaut de structure. De Saussure, puis Babinet l'ont expliqué par des stries régulières que présentent alors ces cristaux. Par exemple, dans les prismes hexagonaux du *saphir*, ces stries sont parallèles aux côtés de la section droite; elles réfléchissent la lumière dans un plan qui leur est perpendiculaire, et, par conséquent, dans trois directions qui, en se croisant, donnent une étoile à six rayons perpendiculaires aux milieux des côtés de la section. Le *corindon*, le *grenat* présentent assez souvent l'astérisme. L'*œil de chat*, composé de filaments d'asbeste parallèles à une seule direction, donne une ligne astérique transversale aux filaments. Il en est de même de la plupart des cristaux à structure fibreuse, comme le gypse, le zircon. On voit que ces phénomènes sont dus à un jeu de lumière analogue à celui qui produit les cercles parhéliques (2730).

3063. Remarques. — Plusieurs physiciens, principalement M. Neumann et M. E. Mach, ont appliqué le calcul à l'élasticité et à la distribution des modifications qu'elle éprouve dans les solides diaphanes de forme définie, quand ils présentent la double réfraction développée par la trempe ou par la compression; et ils ont fait de nombreuses expériences pour vérifier les résultats auxquels ils sont arrivés. M. Macé de Lépinay vient de publier un mémoire où il étudie la même question par l'expérience, et recherche la distribution des différences de marche dans des plaques de verre rectangulaires, trempées soit dans l'air, soit par le procédé de M. de la Bastie (I, 546). Il trouve que, pour les franges parallèles aux plus grands côtés, on peut représenter les différences de marche, y ,

par la formule empirique $y = A(K^x + K^{-x})$, dans laquelle A et K sont des constantes, et x la distance de la frange considérée, au milieu de la lame. Comme moyen d'expérience, il a, entre autres, employé la méthode des *spectres cannelés*, imaginée par MM. Fizeau et Foucault, pour étudier les interférences dans le cas des grandes différences de marche (2835)¹.

La double réfraction accidentelle a reçu diverses applications scientifiques et industrielles. Ainsi, M. Mascart s'en est servi pour étudier la trempe que conserve ordinairement le verre le mieux recuit, avant de l'employer aux instruments d'optique ou à la fabrication des glaces. Il évalue le degré de trempe en cherchant l'épaisseur d'une lame de quartz capable d'annuler la double réfraction sur un fragment de verre détaché de la masse².

306-1. Application à l'étude de l'élasticité. — Les couleurs qui naissent dans une masse de verre comprimée, traversée par la lumière parallèle polarisée, étant en rapport avec l'élasticité développée, Wertheim en a tiré parti pour étudier, par un nouveau moyen, les lois de l'élasticité, en comparant les effets optiques aux actions qui la développent³.

La figure 2079 représente la presse à poids employée dans ces expériences. p est la pièce transparente à comprimer, placée entre un prisme de Nicol servant de polariseur et un analyseur biréfringent; elle est appuyée sur une table de bronze aa , et supporte une bande métallique c , tirée par deux tiges t, t passant, à frottement doux, par deux trous de la table aa . Ces tiges

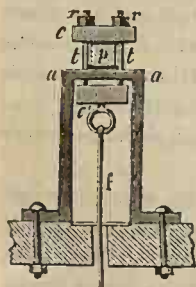


Fig. 2079.

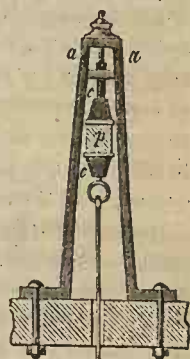


Fig. 2080.

sont réunies en dessous par une autre bande c' , à laquelle on suspend, par la tringle f , une caisse à vis calantes destinée à recevoir des poids. Les surfaces en regard de c et de aa sont garnies de caoutchouc et de carton, pour rendre la pression bien régulière; ce qu'on reconnaît à l'uniformité de la couleur produite dans la lumière polarisée, et ce qu'on obtient en agissant sur les écrous r, r .

Pour les tractions, le parallépipède transparent p est collé au mastic rouge, sur les bases de deux pyramides c, c (fig. 2080), dont une est soutenue par les montants a, a et dont l'autre supporte la charge.

Ces appareils permettent d'étudier l'élasticité par les effets optiques, sur des masses assez petites pour qu'on soit certain de leur homogénéité, et aussi

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XIX, p. 5.

² *Journal de physique* de M. d'Almeida, t. III, p. 439.

³ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XL, p. 156.

sur des cristaux du système régulier. La sensibilité du procédé est telle, qu'une surcharge de 1 kilogr. suffit pour déterminer un changement de teinte dans un cube de verre de 500 millimètres carrés de base. Supposons, pour plus de sûreté, qu'il faille 2 kilogr.; on voit qu'une charge de 4 grammes par millimètre carré produirait un effet sensible et mesurable, tandis que l'allongement ou le raccourcissement correspondants seraient moindres que $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ de la hauteur, en supposant le coefficient d'élasticité égal à 5000.

Couleurs successives. — Quand on augmente peu à peu la charge, on obtient une suite de teintes plate, dont Wertheim a formé le tableau, en les mettant en regard de la charge qui leur correspond et de l'épaisseur de la lame mince d'air capable de les donner d'après Newton. Parmi ces teintes, on remarque la *teinte sensible* violet bleuâtre (3044) qu'une différence de charge de $\frac{4}{300}$ suffit pour modifier sensiblement.

Pour comparer les charges aux différences de marche exprimées en longueurs d'ondulation, on emploie la lampe monochromatique, dont la lumière jaune voisine de la raie D de Fraunhofer donne $\frac{1}{2} \lambda = 294,5$ millièmes de millimètre. Les deux prismes biréfringents de l'appareil ayant leurs sections principales parallèles et inclinées de 45° sur la direction de la charge, il y a extinction de l'*image ordinaire* toutes les fois que la différence de marche est un multiple impair de $\frac{1}{2} \lambda$, et de l'*image extraordinaire*, quand ce multiple est pair. Remarquons que la lampe monochromatique donne un peu de violet, visible quand il y a extinction.

Quand la charge agit par traction, elle doit être modérée, le mastic cédant assez facilement. Il faut user de la même précaution quand on comprime certains sels, qui se fendillent en produisant la *polarisation lamellaire* (3062). Mais alors les nombres que l'on compare sont trop faibles pour qu'on puisse obtenir une précision suffisante. C'est pourquoi Wertheim place près du corps à étudier, un cube de verre chargé de manière à donner la teinte sensible. Cette teinte est modifiée quand on regarde à travers les deux pièces, dont la seconde reçoit la faible charge qu'elle peut supporter; et l'on modifie la charge du cube de verre de manière à rétablir la teinte sensible. La charge enlevée ou ajoutée représente l'équivalent de celle qui agit sur l'autre pièce, et cette charge peut être très-grande, si l'on donne à la pièce de verre une grande section transversale.

Voici les principaux résultats trouvés par Wertheim : A partir d'une certaine pression, qu'il faut atteindre pour faire disparaître les anomalies, les poids nécessaires pour produire une certaine différence de marche, sont : 1^o Indépendants de la hauteur du parallépipède; 2^o indépendants de la longueur comptée suivant la direction des rayons lumineux, la plus grande étendue du trajet compensant le plus faible rapprochement des molécules; 3^o proportionnels à la largeur; 4^o proportionnels à l'allongement ou au raccourcissement mécanique. — Ces lois ont été constatées sur divers crowns et flints, sur l'alun, le sel gemme, le spath-fluor et le borosilicate de plomb.

Enfin, Wertheim a démontré la loi de l'égalité du raccourcissement et de

l'allongement produits par des charges égales (I, 500). Dès que la charge est assez forte pour qu'il n'y ait plus d'anomalies dans la proportionnalité des changements de longueur aux charges, les tractions et compressions de même intensité produisent la même nuance.

Dynamomètre chromatique. — Cet appareil consiste en un parallépipède de verre, maintenu entre deux plaques d'acier garnies de bandes de carton et de caoutchouc. Deux tubes munis, l'un d'un polariseur, l'autre d'un polariscope, sont soutenus par une des plaques. Ce système étant comprimé donne une certaine couleur, dont on déduit l'intensité de la compression en consultant une table contenant les pressions en poids, capables de produire les différentes teintes successives.

Le dynamomètre chromatique peut servir à évaluer les effets des presses, étaux, balanciers; machines auxquelles on ne peut appliquer les dynamomètres ordinaires. En comparant l'effet calculé d'une presse hydraulique à l'effet mesuré au moyen de ce dynamomètre, Wertheim a constaté que les frottements des pistons font perdre une partie de l'effet, qui est loin d'être négligeable.

§ 2. — LUMIÈRE CONVERGENTE

I. Anneaux colorés dans les cristaux à un axe.

3065. Nous avons considéré jusqu'à présent des rayons polarisés parallèles, c'est-à-dire parcourant tous le même espace dans la lame interposée entre le polariseur et le polariscope. Nous allons maintenant nous occuper des rayons passant obliquement suivant les arêtes d'un cône ayant son axe perpendiculaire à la lame. Les rayons les plus éloignés de cet axe parcourant alors un plus grand espace dans l'intérieur de la lame, la couleur observée à travers un polariscope ne peut plus être uniforme. Considérons d'abord les cristaux à un axe.

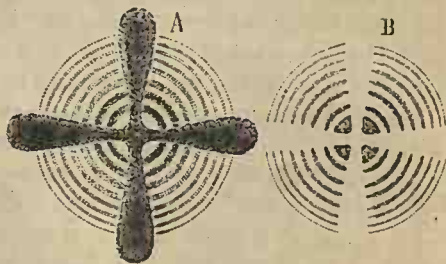


Fig. 2081.

3066. Anneaux autour de l'axe. — Supposons une plaque de spath d'Islande taillée perpendiculairement à l'axe, et recevant un cône de rayons polarisés qui entrent dans l'œil après avoir traversé un prisme de Nicol ou une tourmaline. Si le polariscope est tourné à l'obscurité, dès qu'on interpose la lame cristallisée, on aperçoit, avec la lumière homogène, une série d'anneaux concentriques alternativement noirs et brillants, qui sont d'autant plus écartés les uns des autres, et dont les

diamètres sont d'autant plus grands que la lame est plus mince. Si la lame est trop épaisse, on ne voit pas d'anneaux; mais on peut encore en apercevoir avec la lumière de la lampe monochromatique, avec laquelle ils présentent, dans tous les cas, une netteté supérieure.

Les anneaux de même ordre sont aussi, *en général*, d'autant plus grands que les rayons sont plus réfringibles. Il en résulte qu'on voit, avec la lumière blanche, des anneaux irisés dont le violet est le plus souvent à l'extérieur. Ces anneaux sont traversés par une épaisse croix noire, dont un des bras est parallèle au plan primitif de polarisation, et dont les bords sont diffus et les extrémités épanouies A (fig. 2081).

Si l'on tourne le polariscope sur lui-même, les anneaux lumineux s'étendent graduellement, et prennent la place des anneaux obscurs; en même temps, la croix noire tourne dans le même sens, en s'effaçant peu à peu, et est remplacée par une croix blanche, quand la rotation est de 90° , B (fig. 2081).



Fig. 2082.

Avec la lumière blanche, les couleurs des anneaux sont complémentaires de celles qu'ils présentaient aux mêmes points dans la première position; car avec un polariscope biréfringent, l'image est double, et l'on voit du blanc aux points de croisement de deux anneaux de même ordre.

Ces phénomènes ont été découverts par Brewster, dans l'émeraude, le rubis, la topaze..., et même dans les lames de glace taillées horizontalement dans une couche formée sur une eau tranquille; Wollaston les a observés dans le spath d'Islande, qui donne les plus beaux résultats. Tous les cristaux uniaxes, sauf quelques-uns, comme le cristal de roche, qui possèdent la *polarisation rotatoire* que nous étudierons dans le dernier chapitre, donnent les mêmes résultats. Cependant la croix est souvent contournée, les anneaux déformés; ce qui provient d'irrégularités dans la cristallisation, d'autant plus sensibles que la double réfraction est très-faible dans le voisinage de l'axe.

3067. Appareils et mode d'observation. — Pour obtenir un faisceau polarisé convergent, on emploie divers moyens que nous allons examiner.

On peut d'abord observer les phénomènes au moyen de l'appareil de Norrenberg (fig. 2069), en plaçant la lame cristallisée tout près de l'analyseur, ou en la posant sur le miroir étamé *o*, et amenant au-dessus, la lentille convergente *e* à une hauteur égale à son foyer principal. Les rayons réfléchis par la glace *vv*, tombent en convergeant sur le cristal et en sortent avec un degré égal de divergence.

Pince à tourmaline. — Ce petit appareil (fig. 2082), souvent attribué à Biot, consiste simplement en deux lames de tourmaline pouvant tourner sur elles-mêmes dans deux anneaux *a*, *b*, fixés aux extrémités d'un ressort *cab* en forme de pince, et entre lesquels est pressée la lame cristallisée encastrée dans un disque de liège. Si l'on regarde la lumière du ciel à travers ce système, on voit les anneaux avec la croix noire, quand les axes des tourmalines sont perpen-

diculaires, et avec la croix blanche quand ces axes sont parallèles. La tourmaline extérieure sert à polariser les rayons, qui convergent vers la pupille placée très-près de la seconde tourmaline.

M. Bertin a perfectionné la pince à tourmaline de manière à l'approprier à diverses sortes d'expériences. Un cercle divisé sert à évaluer la quantité dont on fait tourner une des tourmalines, et dans l'anneau qui la reçoit tourne un second anneau auquel est adaptée la lame cristallisée, que l'on peut ainsi faire tourner facilement sur elle-même, ce qui est utile dans certaines expériences (3074).

Appareil d'Herschel. — Deux tubes *mn* et *aa* (fig. 2083), peuvent tourner l'un dans l'autre. En *c* et *t* sont des tourmalines servant de polariseur et de polariscope. La lame cristallisée *ll* est fixée à un anneau qu'on peut tourner sur lui-même, au moyen d'un bouton extérieur dont la tige passe par une fente, qui occupe 120° du contour du tube *mn*. Une lentille *L*, vissée dans l'intérieur du tube *aa*, et dont le foyer tombe sur la lame *ll*, égalise l'éclat du champ visuel, quand on emploie une lumière artificielle. Les rayons qui partent du foyer, situé dans la lame, entrent dans l'œil en divergeant, et la lumière ne traversant qu'un espace très-étroit, on peut choisir un point où il n'y a pas de défaut de cristallisation.

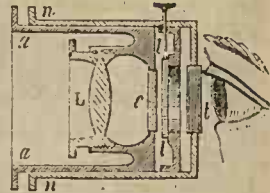


Fig. 2083.

Appareil de Soleil. — La lumière polarisée par réflexion sur le miroir *V* (fig. 2084) que l'on incline convenablement au moyen du genou *o*, traverse une lentille *l*, *l*, et va faire son foyer sur la lame cristallisée *c*. Les rayons sortent de cette lame en divergeant, après que chaque pinceau a été modifié suivant la longueur de son trajet dans la lame, longueur qui varie avec l'obliquité. Les pinceaux traversent ensuite un oculaire d'Huyghens *l''*, *l''* (2804). Ils

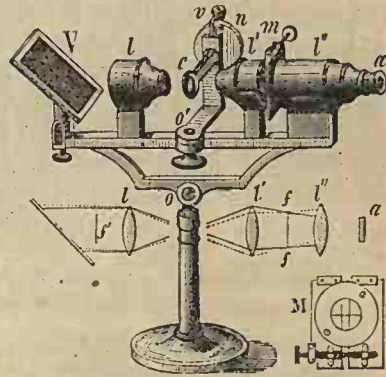


Fig. 2084.

forment chacun un foyer sur le plan focal *ff* de la lentille *l''*, où il se produit une image des courbes engendrées par la lame *c*, image que l'on regarde à travers la loupe *l''* et l'analyseur *a*, *a*. En *ff* est disposé un micromètre *m*, vu à part en *M*; il peut tourner sur lui-même et porte trois fils, dont deux sont parallèles et peuvent être plus ou moins éloignés l'un de l'autre au moyen d'une vis à deux pas inverses, pour mesurer les diamètres des courbes dans différentes directions. La lame, *c*, est prise dans une pince qui peut tourner autour d'un axe

horizontal, de quantités mesurées par une tête divisée n . Le support de la pince peut aussi tourner en o' , pour qu'on puisse régler facilement la position de la lame.

3068. Projection des images. — L'appareil qui précède peut servir à projeter les images des franges produites dans la lumière convergente, en plaçant la lame cristallisée en ff . La lentille l'' en donne alors une image réelle, sur un écran éloigné.

L'appareil de M. Duboseq (*fig.* 2072) est très-commode pour la projection. La lame cristallisée est maintenue par une pince P à plusieurs mouvements, que l'on pousse contre l'ouverture du diaphragme tournant T, dont on choisit le trou le plus petit, de manière que les rayons convergents fournis par la lentille placée en F se croisent dans l'épaisseur de la lame. Ces rayons sont ensuite rapprochés par une lentille convergente à court foyer appliquée contre la pince, et vont frapper la lentille placée en L, qui, avec ou sans la lentille qui précède le nicol contenu en A, donne sur un écran éloigné une image des franges, que l'on rend nette en éloignant plus ou moins le système LA, de la pince P.

L'appareil (*fig.* 2070) se prête aussi à la projection des couleurs produites dans la lumière convergente. La lame, placée en cc , reçoit le faisceau polarisé rendu convergent par la lentille L; et la lentille a donne l'image des courbes engendrées par cette lame.

3069. EXPLICATION DES ANNEAUX AUTOUR DE L'AXE. — Les phénomènes de polarisation chromatique dans la lumière convergente ont été découverts par plusieurs physiciens, indépendamment les uns des autres, Brewster, en 1813; Wollaston, en 1814; Biot, Seebeck, en 1815. M. Airy, en 1830, a publié la théorie complète des phénomènes produits dans les lames normales à l'axe.

1° Supposons que le polariscope soit tourné à l'obscurité; par exemple, si c'est une tourmaline, que son axe soit parallèle au plan primitif de polarisation, on apercevra seulement l'image extraordinaire venant de la lame cristallisée normale à son axe, on aura $\beta = 0$, et la formule [3] (3048), qui donne l'intensité I_e de cette image, deviendra

$$I_e = \sin^2 2\alpha \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

Si nous considérons les rayons incidents situés dans un plan parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation, la section principale qui les contient sera dans le même cas; on aura donc $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90^\circ$, et la valeur de I_e deviendra nulle; ce qui explique la croix noire.

La valeur de I_e devient aussi nulle, quel que soit α , quand d est tel que $d : \lambda$ soit égal à un nombre entier quelconque, 1, 2, 3... Or, $d : \lambda$ reste constant pour tous les rayons également inclinés par rapport à l'axe; on aura donc des anneaux noirs dont les diamètres seront d'autant plus grands qu'il faudra, pour obtenir une même valeur de d , s'écarter davantage de l'axe, c'est-à-dire que la lame sera plus mince. Du reste, les diamètres ne varient pas suivant les mêmes lois que ceux des anneaux dans les lames minces; car l'épaisseur

traversée n'est pas seule à modifier la différence de marche, cette différence croissant aussi avec l'obliquité, à partir de l'axe, sur lequel elle est nulle (3044). Cependant l'expérience avait indiqué que les anneaux suivaient les lois de ceux des lames minces; ce qui montre que la seconde influence est trop faible pour produire des effets appréciables sur des anneaux à contours diffus.

Pour les valeurs de $d : \lambda$ comprises entre 1, 2, 3..., la valeur de I_e n'est pas nulle; on aura donc, entre les anneaux noirs, des anneaux lumineux, dont l'intensité sera *maximum* pour $\alpha = 45^\circ$, et ira en diminuant, de cet azimut à $\alpha = 0$ et $\alpha = 90^\circ$; ce qui explique la diffusion des bords de la croix noire. Les valeurs de $d : \lambda$ étant différentes pour les diverses couleurs, les anneaux seront irisés, avec la lumière blanche.

2^o Supposons $\beta = 90^\circ$, c'est-à-dire que le polariscope soit tourné de manière à donner le *maximum* de lumière en l'absence de la lame. Le faisceau ordinaire passera seul, et son intensité sera

$$I_o = 1 - I_e = 1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

Si $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90^\circ$, on a $I_o = 1$; ce qui explique la croix blanche. Dans les azimuts intermédiaires, l'intensité étant, pour les anneaux brillants, l'unité diminuée de l'intensité trouvée dans la première position du polariscope, les couleurs seront complémentaires de celles qu'on observe alors.

3^o Si, à partir de la position pour laquelle on a $\beta = 0$, on fait tourner peu à peu le polariscope, et si l'on considère ce qui se passe dans son plan principal, pour lequel on a $\alpha - \beta = 0$, l'intensité du faisceau émergent donnée par la formule [3] (3048), devient $I_e = \sin^2 \beta$, valeur qui augmente en même temps que β ; ce qui indique que la croix noire va en s'effaçant, tout en suivant le mouvement du polariscope, pour se changer en une croix blanche, dont l'éclat augmente jusqu'à ce que l'on ait $\beta = 90^\circ$.

Si la plaque, au lieu d'être perpendiculaire à l'axe, lui était un peu oblique, les différences de marche ne seraient pas égales pour des distances égales à la normale, et les courbes prendraient la forme d'ovales dont le grand axe serait dans le plan normal passant par l'axe.

3070. Remarques. — 1^o Il résulte de la théorie, que les résultats sont les mêmes avec des cristaux positifs et négatifs. Mais le signe des cristaux intervient quand on superpose deux lames normales à l'axe. Si ces lames sont de même signe, l'effet est le même que si, à la première, d'épaisseur e , on en superposait une autre de même substance et d'épaisseur e' capable de donner des anneaux de même diamètre que la seconde. Mais si celle-ci est de signe contraire, le résultat sera celui que produirait une lame d'épaisseur $e - e'$. Car le rayon qui a la plus grande vitesse dans la première plaque, possède la plus faible dans la seconde, et *vice versa*. Si les deux lames de signe contraire donnent séparément des anneaux de même diamètre, ces anneaux disparaissent dans la lumière blanche, quand on les a superposées.

Il résulte de là un nouveau moyen de trouver le signe d'un cristal : on en sépare une lame normale à l'axe, et on l'applique sur une lame de spath d'Islande. Si les anneaux formés par celui-ci dans la lumière simple sont rétrécis, le cristal est *négalif* comme lui; s'ils sont agrandis, il est *positif*.

2^o Les anneaux dont nous nous occupons ressemblent beaucoup à ceux que produisent des disques de verre trempés ou échauffés sur leur contour. Mais il ne faut pas oublier que les premiers se manifestent également dans tous les points de la lame cristallisée, tandis que les autres ne se produisent qu'avec des rayons parallèles, et dans des points particuliers de la plaque; l'axe autour duquel les molécules sont arrangées symétriquement étant une ligne unique, et non une simple direction, comme dans les cristaux.

3071. Distribution des couleurs dans les anneaux. — Plusieurs physiiciens avaient admis que les couleurs des anneaux autour de l'axe étaient distribuées de la même manière que dans les anneaux entre deux lentilles, et il paraît en être ainsi pour le spath d'Islande, la glace, le béril, la tourmaline. Mais ce que nous avons dit ci-dessus de la double cause qui détermine les diamètres des anneaux (3069), prouve que cette loi ne peut être vraie; et, en effet, un assez grand nombre de cristaux s'en éloignent, par exemple l'hyposulfate de chaux. Il en est même avec lesquels l'ordre des couleurs est renversé. L'*apophyllite* de Cipit (silicate hydraté de chaux et potasse), présente à cet égard des résultats curieux. Avec la lumière blanche, les anneaux ne présentent que les teintes violet-sombre et jaune-verdâtre, et quand on opère avec les différentes lumières simples, on obtient des anneaux sensiblement égaux. On trouve aussi des échantillons assez rares, qui ne donnent pas d'anneaux avec la lumière jaune. Quand on emploie des rayons de plus en plus réfrangibles, on voit les anneaux grandir rapidement, devenir infinis pour les rayons jaunes, puis reparaitre en allant en diminuant, les anneaux violets restant plus grands que les rouges. Avec la lumière blanche, l'ordre des couleurs est donc inverse de celui que présentent les anneaux des lames minces. Ces résultats se conçoivent facilement quand on sait que l'*apophyllite*, très-peu biréfringente, est négative pour les rayons d'une des extrémités du spectre, et positive pour ceux de l'autre; de manière qu'elle n'exerce pas la double réfraction sur les rayons moyens.

3072. Anneaux et couleurs per se. — On peut observer des anneaux colorés dans des lames cristallisées, sans faire usage de polariseur ni de polariscope. Par exemple, si l'on pose une lame de topaze sur un fond noir, et qu'on reçoive dans l'œil, de plus en plus obliquement et en faisant tourner la lame sur elle-même, la lumière réfléchie à sa seconde surface, on finit par apercevoir des anneaux irisés. Ce phénomène est de la nature de ceux que nous venons d'étudier : ici, la lumière incidente est polarisée soit par l'atmosphère, soit par réflexion sur des vitres, des surfaces vernies, etc. Le rayon entre dans la direction d'un des axes, et la réflexion à la surface inférieure remplace le polariscope; les plaques de verre trempées, les lames de gypes gravées (3043)

produisent ce résultat. Avec la lumière directe du soleil, ou celle d'un point neutre de l'atmosphère, il n'y a plus d'anneaux.

On peut obtenir des anneaux avec de la lumière incidente parfaitement neutre réfléchi à la seconde surface de la lame, en recevant cette lumière dans un polariscope. Dans ce cas, la lumière est polarisée par réflexion, et la lame agit sur le rayon réfléchi, qui la traverse avant d'émerger.

On trouve des échantillons de certains cristaux qui donnent des couleurs quand ils sont traversés par de la lumière entrant à l'état neutre. Le spath d'Islande présente souvent cette particularité; il renferme alors des lames *hémitropes*, c'est-à-dire dans lesquelles l'ordre de la cristallisation est renversé. Ces lames sont perpendiculaires à la section principale du rhomboèdre, et parallèles à ses arêtes. Un rayon qui les traverse suivant l'axe, est d'abord polarisé dans son trajet à travers la partie antérieure du cristal, puis il rencontre une autre portion de cristal, qui fait fonction de polariscope.

II. Courbes colorées des cristaux à deux axes.

3073. Anneaux autour des axes. — En étudiant dans un grand nombre de cristaux les couleurs formées par la lumière polarisée, Brewster, en 1814, en trouva qui lui donnèrent des anneaux dans deux directions différentes, et c'est ainsi qu'il découvrit les cristaux à deux axes (2945).

Supposons d'abord que l'on taille dans un cristal de cette espèce une lame sensiblement perpendiculaire à l'un des axes, et qu'on la place entre un polariseur et un polariscope tourné à l'obscurité, on verra autour de l'axe, des anneaux alternativement noirs et brillants dans la lumière simple, et irisés dans la lumière blanche. Ces anneaux ont une forme ovale (*fig. 2085*) d'autant plus prononcée, que l'angle des deux axes est plus grand; ils marquent en se rétrécissant, un pôle situé sur l'axe, et plus éloigné de leur contour du côté de l'autre axe, que du côté opposé. Par ce point, passe une bande noire à extrémités épanouies, dont la position dépend de celle du plan des axes. Si ce plan est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, la bande est droite et dirigée dans le plan des axes (*fig. 2085*). Si alors on fait tourner la plaque sur elle-même, la bande noire tourne en sens contraire avec la même vitesse, et elle se courbe légèrement en forme d'hyperbole tangente par le sommet à la perpendiculaire au plan des axes, et présentant sa convexité du côté de l'autre axe.



Fig. 2085.

Si le polariscope est tourné de 90° , la bande noire est remplacée par une bande blanche, et les couleurs des anneaux, par leurs couleurs complémentaires. Le mica, dont la ligne moyenne est perpendiculaire aux lames obtenues par clivage, se prête bien à l'observation de ces phénomènes.

3074. Courbes autour des deux axes. — Quand la lame est perpendiculaire à la ligne moyenne, et que l'angle des axes est suffisamment petit, comme dans le nitre, pour lequel cet angle est de 5° à 6°, on aperçoit simultanément les anneaux formés autour des deux axes. Ces anneaux sont allongés du côté de la ligne moyenne; et ceux qui sont d'un certain ordre, d'autant moins élevé que la lame est plus mince, se réunissent de manière à former une seule courbe (fig. 2086). Quand, le polariscope étant tourné à l'obscurité, le plan des axes est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, les bandes noires se réunissent et sont traversées par une seconde bande noire très-diffuse, formant une croix avec la première (fig. 2086). Si l'on fait tourner la lame sur elle-même, le système des courbes tourne avec elle dans le même sens, la croix noire se sépare en deux parties, dont l'angle s'arrondit de plus en plus (fig. 2087), et qui forment deux branches hyperboliques quand le plan des axes fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation (fig. 2088). Il est à

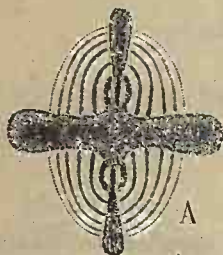


Fig. 2086.

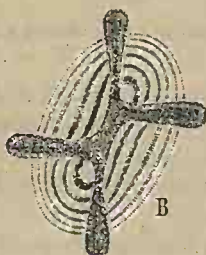


Fig. 2087.

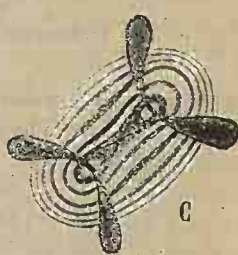


Fig. 2088.

remarquer que les extrémités des branches des bandes noires sont toujours parallèles ou perpendiculaires au plan primitif de polarisation. Au-delà de 45°, on retrouve les mêmes apparences que de 0° à 45°, et dans les quatre angles droits, les résultats sont les mêmes.

Si le polariseur et la lame restent fixes, on fait tourner le polariscope, on voit les bandes noires se déplacer dans le sens de la rotation, s'affaiblir et disparaître, pour être remplacées par de la lumière blanche occupant la même place quand on a tourné de 90°. Pendant ce mouvement, l'ensemble des courbes reste dans la même position, mais les couleurs deviennent complémentaires.

3075. Forme des courbes isochromatiques. — Herschel ayant projeté sur un écran l'image des courbes formées par la lumière simple, en dessina le contour avec soin, et trouva que le produit de deux rayons vecteurs menés des pôles à un point quelconque d'une même courbe était sensiblement constant. Cette propriété appartient à la *lemniscate*, courbe dont l'équation, rapportée à des axes rectangulaires, dont un passe par les pôles et qui se coupent à égale distance de ces points, est $(x^2 + y^2 + a^2)^2 = a^2(b^2 + 4x^2)$; $2a$ représente

la distance des pôles, et b un paramètre qui change d'une courbe à l'autre. Le produit ab est égal au produit de deux rayons vecteurs quelconques. Ce produit, et par conséquent b , varie d'une courbe à l'autre suivant la série des nombres 0, 1, 2, 3, 4.... pour les lignes lumineuses, et suivant la série $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ pour les lignes noires. Quand on considère les courbes d'un même ordre, le produit ab varie en sens inverse de l'épaisseur des lames.

Pour une même distance $2a$ des pôles, la courbe présente différentes figures suivant la valeur de b (*fig.* 2088); d'abord formée de deux parties séparées, quand b augmente, elle forme un 8, puis une courbe fermée présentant deux parties opposées se rapprochant vers la ligne des pôles, puis enfin une courbe, convexe en tous ses points.

La valeur de a change avec l'angle des axes optiques. Quand cet angle est nul, les lemniscates deviennent des circonférences traversées par une croix noire, de quelque manière qu'on tourne la lame dans son propre plan. L'équation de la lemniscate devient, dans ce cas, $x^2 + y^2 = 0$, qui représente un point; et le paramètre a disparaît. Il en faut conclure que les courbes n'ont qu'à peu près la forme de lemniscates; elles s'en éloignent notablement quand les axes sont très-écartés, et il faudrait, pour obtenir des lemniscates, projeter les courbes sur une sphère ayant son centre sur la pupille. Dans ce cas, on peut, avec l'appareil Soleil (3067), observer successivement les deux systèmes d'anneaux, en plaçant le plan des axes verticalement et inclinant plus ou moins la lame au moyen de la pince qui la soutient. On peut encore rapprocher les systèmes d'anneaux, en collant sur les faces opposées de la lame, des prismes de même angle réfringent.

3076. Détermination des axes. — C'est par la forme des courbes et des bandes noires qui les croisent, qu'on reconnaît le plus facilement les cristaux à deux axes. Pour trouver la position du plan des axes optiques, on taille dans le cristal une lame à faces parallèles; on la place entre un polariseur et un polariscope tournés à l'obscurité, et l'on fait tourner la lame sur elle-même jusqu'à ce que sa présence n'amène aucune lumière. On trouve ainsi deux positions, pour lesquelles on marque sur la lame, les traces du plan primitif de polarisation. Ces deux traces forment un angle de 90° , et l'une d'elles se trouve dans le plan des axes. On tourne ensuite la lame dans son plan, de manière que chacune des traces fasse un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, puis on cherche, en l'inclinant successivement autour de ces traces, à apercevoir les anneaux autour des axes. Le plan des axes est perpendiculaire à la ligne autour de laquelle on a fait tourner la lame pour voir les anneaux.

3077. Mesure de l'angle des axes. — L'angle des axes se mesure facilement avec l'appareil de Soleil (*fig.* 2084). La lame étant taillée à peu près perpendiculairement à la ligne moyenne, on la fixe dans la pince c , de manière que le plan des axes soit vertical, et l'on fait tourner la pince sur elle-même, de manière à faire coïncider successivement les pôles des deux systèmes

d'anneaux avec le point de croisement des fils du micromètre. La quantité angulaire dont on tourne la pince, donne l'angle *apparent* des axes. On tient compte de la réfraction, au moyen de la loi de Descartes, vraie dans les sections principales (2331); ou bien on opère dans un mélange d'alcool et de sulfure de carbone de même indice que le cristal, comme le fait M. Grailich.

On reconnaît, par ce moyen, que l'angle des axes est différent pour les divers rayons simples, comme l'avait reconnu Herschel. Ce fait, d'où résulte que l'ordre des couleurs est troublé dans les anneaux, peut aussi se constater sans faire de mesures précises, en projetant sur un écran les lemniscates formées autour des deux axes, et en interposant successivement des verres de différentes couleurs; on voit les foyers des courbes changer de position: tantôt l'angle des axes diminue quand la réfrangibilité des rayons augmente, comme pour le *carbonate de plomb*; tantôt il augmente, comme pour le *nitre*, et surtout le *sel de la Rochelle* (tartrate de potasse et de soude), pour lequel l'angle des axes est de 76° dans la lumière rouge, et de 56° seulement dans la lumière violette; et les anneaux rouges sont plus grands que les anneaux violets. D'après Brewster, la *glauvélite* présente deux axes, inclinés de près de 5° dans la lumière rouge, et un seul axe dans la lumière violette.

En général, le plan des axes et la ligne moyenne sont les mêmes pour toutes les couleurs. Cependant, Norremberg a vu certains cristaux, par exemple le *gypse*, donner des axes dans des plans différents, et même, avec le *nitrate de mercure*, la ligne moyenne changer de position avec les couleurs. Dans le borax, les axes se déplacent de manière que les pôles dans les différentes couleurs soient placées sur des droites parallèles. Ces anomalies, difficiles à concevoir théoriquement, ne proviendraient-elles pas de quelques irrégularités de structure dans les cristaux employés?

3078. Franges hyperboliques des lames parallèles à l'axe des uni-axes. — Nous avons considéré, dans ce qui précède, des lames perpendiculaires à un axe ou à la ligne moyenne ou supplémentaire, auquel cas l'on obtient des anneaux ou des lemniscates, avec des bandes noires épanouies quand le polariscope est tourné à l'obscurité. Nous allons, dans ce qui suit, considérer des lames taillées dans des directions différentes.

Quand on projette sur un plan, les lemniscates d'une lame perpendiculaire à la ligne moyenne d'un biaxe, on voit ces courbes se rapprocher, près du centre, de la forme de branches d'hyperbole, à mesure que l'angle des axes est plus grand; et, si cet angle est égal à 180° , ce qui revient à dire que *le cristal est uni-axe*, et que la lame est taillée parallèlement à cet axe, on observe avec la lumière simple convergente polarisée, deux systèmes de franges ressemblant à des hyperboles ayant mêmes asymptotes, et dont un des axes coïncide avec l'axe cristallographique du cristal. Les branches conservent leur forme, quand on fait tourner la lame, et tournent avec elle en variant d'éclat. Cet éclat est *maximum* quand l'axe fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation. Ces courbes ne sont distinctes, avec la lumière blanche, qu'autant que la lame est très-mince,

mais alors l'axe transverse est tellement long, qu'il est difficile de les apercevoir. Quand on peut y parvenir, on remarque que les couleurs sont disposées en ordre inverse dans les deux angles des asymptotes, ce qui provient de ce que les différences de marche croissent en s'approchant du centre pour une des séries de courbes, et diminuent, pour l'autre. Delezenne a fait beaucoup d'observations sur ce sujet. Il montre que, si l'épaisseur de la lame est telle qu'une des hyperboles se confonde avec ses asymptotes, les carrés des axes de ces courbes croissent comme les nombres 0, 1, 2, 3..., et que ces carrés sont proportionnels à λ , en raison inverse de la différence des indices ordinaire et extraordinaire, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame.

3079. De la théorie des courbes isochromatiques. — La formation des courbes autour des axes des biaxes se rattache à la même théorie que les anneaux formés dans les uniaxes. Il est facile de concevoir comment l'obliquité des rayons divergeant d'un point de la surface d'incidence détermine des variations d'intensité par interférences dans chaque couple de rayons bifurqués, et donne lieu à des courbes isochromatiques enveloppant les axes et ayant deux pôles qui correspondent à ces axes. Mais quand on veut préciser les détails du phénomène, les calculs se compliquent beaucoup, et les équations des courbes ne sont établies qu'en apportant successivement diverses approximations qui laissent des doutes dans l'esprit.

Surface isochromatique. — M. Bertin est parvenu à simplifier considérablement la question, et a imaginé un moyen très-ingénieux de déterminer avec facilité la forme générale des courbes, en considérant la *surface isochromatique*¹. Si nous imaginons un point O de la surface d'incidence d'une lame biréfringente, point d'où partent en divergeant des couples de rayons bifurqués et suivant sensiblement la même route, une surface isochromatique sera le lieu des points pris sur tous ces rayons, pour lesquels la différence de marche est la même. Cette surface étant supposée construite autour du point O, d'où partent les rayons divergents, pour une différence de marche donnée, son intersection avec la seconde face de la lame sera une *courbe* isochromatique. M. Bertin a calculé l'équation de la surface isochromatique, rapportée aux trois axes d'élasticité du cristal (3024) et au point O comme origine. Cette équation est

$$[1] \quad [(\beta^2 + \gamma^2)x^2 + (x^2 + \gamma^2)y^2 + (x^2 + \beta^2)z^2 - \delta^2]^2 \\ = 4(x^2 + y^2 + z^2)(\beta^2\gamma^2x^2 + x^2\gamma^2y^2 + x^2\beta^2z^2),$$

dans laquelle α , β , γ sont les trois indices principaux, et δ la différence de marche considérée. Cette équation étant du 4^e degré, les courbes isochromatiques sont également du 4^e degré; comme elle est homogène en x , y , z et δ , les surfaces correspondant aux diverses différences de marches sont semblables. La figure 2089 représente cette surface dans un cristal à deux axes; elle

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LXIII, p. 57.

à la forme d'une croix à bras obliques et cylindriques parallèles aux axes optiques.

M. Bertin a fait construire en bois ou en plâtre un modèle de cette surface, pour un retard $\delta = 1^{\text{mm}} = 2000 \lambda$, correspondant, par conséquent, à la

courbe de 2000^e ordre. Les dimensions linéaires de la figure sont le quart de celles du modèle. Au moyen de ce modèle, on peut connaître la forme de la courbe donnée par l'intersection de la surface isochromatique avec la face de sortie d'une lame taillée dans le cristal suivant une direction connue par rapport à la ligne moyenne, en coupant la surface par un plan parallèle à cette direction, et éloigné du point O d'une quantité égale à l'épaisseur de la lame.

Considérons, par exemple, une lame perpendiculaire à la ligne moyenne et ayant pour épaisseur Om , on aura

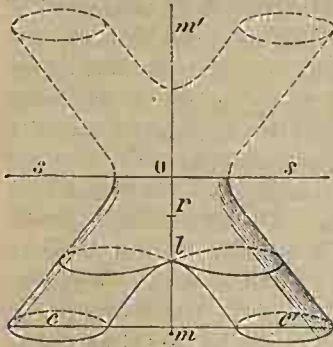


Fig. 2089. — $1/4$.

deux courbes séparées c, c' ; pour l'épaisseur Ol , une courbe ressemblant à une lemniscate; et pour une épaisseur moindre, Or , une courbe fermée avec concavités opposées, ou partout convexe, suivant l'épaisseur.

— Si la lame est parallèle au plan des axes on obtiendra une courbe formée de 4 branches ressemblant à des branches d'hyperboles, à sommets d'autant plus rapprochés que l'épaisseur sera plus grande. Si enfin la lame est inclinée sur la ligne moyenne, on aura des courbes ovales, ou des espèces d'hyperboles suivant l'inclinaison et l'épaisseur. — Il ne faut pas oublier que pour une même épaisseur les courbes isochromatiques de différents ordres pourront donner simultanément les différents aspects que présente successivement une courbe d'un ordre donné quand on fait varier l'épaisseur.

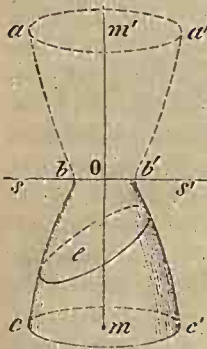


Fig. 2090. — $1/2$.

Passage aux uniaxes. — Si l'on suppose deux des axes d'élasticité égaux, par exemple $\beta = \gamma$, dans l'équation [1], l'on passera au cas d'un cristal

à un axe: β est alors l'indice de réfraction ordinaire n_o , et α , l'indice extraordinaire, n_e , et l'équation devient

$$(n_e^2 - n_o^2)(y^2 + z^2)^2 - 2\delta^2(n_e^2 + n_o^2)(y^2 + z^2) - 4n_o^2\delta^2x^2 + \delta^4 = 0,$$

qui représente une surface de révolution autour de l'axe des x . On voit (fig. 2090) la forme de cette surface, dont la courbe méridienne ressemble à une hyper-

bole, mais elle est du 4^e degré, et n'a pas d'asymptotes. Le point de divergence étant en O, on voit que : 1^o les lames perpendiculaires à l'axe donnent des circonférences dont le rayon augmente avec l'épaisseur Om ; 2^o les lames parallèles à l'axe donnent des courbes ressemblant à des hyperboles; et 3^o les lames obliques à l'axe donnent, suivant l'angle formé avec cet axe, et suivant l'épaisseur, des courbes ressemblant à des ellipses e , ou à des hyperboles.

III. Lames croisées. Dichroïsmes. Houppes.

3080. Lames superposées parallèles à l'axe. — Quand deux parties séparées d'une même lame parallèle à l'axe d'un cristal uniaxe, sont superposées de manière que ces axes soient perpendiculaires, on aperçoit avec la lumière convergente, deux systèmes d'hyperboles équilatères (fig. 2091), dont les asymptotes sont formées par une croix noire quand le polariscope est tourné à l'obscurité; et par une croix blanche quand on le fait tourner ensuite de 90°, et les teintes sont alors complémentaires de ce qu'elles étaient. Si l'on fait tourner le système des lames sur lui-même, les hyperboles tournent dans le même sens en conservant leur forme. L'éclat seul change; il est *maximum* quand une des asymptotes est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et la lumière disparaît quand elle est inclinée de 45° sur ce plan. Des lames de quartz de 5 à 6^{mm} d'épaisseur conviennent bien pour l'observation de ces phénomènes.

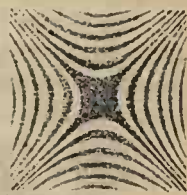


Fig. 2091.

3081. Lames superposées, à axes obliques aux rayons. — Nous allons examiner quelques cas dans lesquels les axes des lames ne sont plus perpendiculaires à la direction générale des rayons.

1^o Expérience des quartz croisés.

— Supposons deux lames de cristal perpendiculaires à l'axe, recevant de la lumière polarisée qui converge dans l'œil après avoir traversé une tourmaline dont il est très-rapproché; les lames étant parallèles, on aperçoit des anneaux irisés, mais sans croix noire, particularité propre au quartz, sur laquelle nous reviendrons. Si l'on incline les lames de manière que leurs axes restent dans la section principale de la tourmaline, on aperçoit deux systèmes d'anneaux qui s'écartent l'un de l'autre à mesure que l'inclinaison augmente, et des franges irisées perpendiculaires à la ligne des centres (fig. 2092). Ces franges sont déformées près des anneaux, qu'elles coupent en partie, et deviennent sensiblement droites et équidistantes quand l'angle des lames dépasse 30°; elles sont alors à peine visibles près de la ligne



Fig. 2092.

des centres. Au milieu, on voit une bande noire entre deux blanches, ou *vice versa*, suivant que la tourmaline est tournée à l'obscurité ou à 90° de cette position. Dans les positions intermédiaires, les franges changent de teinte tout en conservant leur forme.

Les expériences se font avec le petit appareil (*fig. 2093*). Les lames de quartz *c, c* sont mobiles autour d'un axe horizontal *oo*, et on peut les faire tourner, au moyen du bouton *b*, autour d'un axe vertical, de manière à voir les franges dans leurs parties latérales. En *t*, est la tourmaline, mobile sur elle-même.

2^o On taille dans un cristal de quartz, une lame de 4 à 5^{mm} d'épaisseur, prise parallèlement à l'une des faces de la pyramide terminale du cristal naturel; on coupe cette lame en deux parties, que l'on superpose de manière que les bords suivant lesquels a été faite la séparation, soient perpendiculaires l'un à l'autre. Ce système, donne dans la pince à tourmaline ou dans l'appareil (*fig. 2093*), des franges hyperboliques très-brillantes, dont on ne voit que les parties éloignées des sommets, de manière qu'elles paraissent rectilignes et parallèles. Quand les tourmalines sont croisées, on voit au milieu, une bande noire entre



Fig. 2093.

deux blanches suivies de bandes irisées. Quand les axes des tourmalines sont parallèles, on voit les couleurs complémentaires, et au milieu une bande blanche entre deux noires. Quand les axes des tourmalines font un angle de 45° , tout disparaît. — Si l'on fait tourner le système des lames, les franges tournent avec lui, et elles ont leur *maximum* d'éclat quand elles sont parallèles ou perpendiculaires au plan primitif de polarisation; alors les sections principales des lames forment un angle de 45° avec ce plan. Si l'on fait ensuite tourner les lames de 45° , les franges s'effacent.

3082. Polariscope de Savart. — Le système de quartz obliques dont nous venons de parler, monté dans un anneau métallique, avec une tourmaline dont l'axe fait un angle de 45° avec les sections principales des lames, constitue le *polariscope de Savart*. On trouve le plan de polarisation des rayons incidents, en faisant tourner l'instrument jusqu'à ce qu'on obtienne l'éclat *maximum* des franges. Ce plan est perpendiculaire à l'axe de la tourmaline, s'il y a au milieu, une bande noire entre deux blanches; et parallèle à cet axe, s'il y a une bande blanche entre deux noires. Ce polariscope composé est d'une exquise sensibilité, et il offre l'avantage d'indiquer directement la position du plan de polarisation; on l'emploie souvent à l'étude de la polarisation de l'atmosphère.

Les quartz obliques produisent avec la lumière de la lampe monochromatique, d'autres phénomènes, invisibles avec la lumière blanche. C'est ainsi que, suivant la position relative des tourmalines, on distingue une foule de lignes formant comme des mailles ou des alvéoles. Delezenne a décrit avec soin ces apparences curieuses, dont l'aspect est très-varié. Le même physicien a étudié les franges qui se forment quand on superpose des lames donnant isolément

des anneaux, des lemniscates, des hyperboles, ou des franges linéaires. Ces phénomènes sont très-brillants, et il est facile de comprendre combien ils doivent être variés, et combien seraient compliqués les calculs au moyen desquels on tenterait de les expliquer en détail.

Citons enfin le *kaléïdopolariscope* de M. Pétrina, polariscope des plus sensibles, consistant en un kaléïdoscope (2442) muni d'un analyseur, et contenant de petites plaques de quartz, gypse ou mica de différentes épaisseurs qui, superposées ou non, se colorent de différentes nuances quand elles sont traversées par les plus faibles quantités de lumière polarisée.

3083. Dichroïsme des cristaux. — Certains cristaux colorés biréfringents, traversés par la lumière blanche *naturelle*, présentent des couleurs différentes suivant la direction des rayons par rapport à leur axe; c'est ce qui constitue le *dichroïsme des cristaux*. Par exemple, suivant que les rayons passent parallèlement ou normalement à l'axe, l'*ïolithe* ou *dichroïte* est d'un blanc jaunâtre tirant sur le brun, ou d'un beau bleu azuré; le chlorure de potassium et de palladium est rouge foncé, ou d'un beau vert; quelques variétés de saphir sont bleues, ou vert jaunâtre; l'idocrase est jaune orangé, ou vert jaunâtre; le sous-oxy-sulfate de fer est rouge-sang foncé, ou vert. Quelques tourmalines vertes sont rouge-brun foncé suivant l'axe.

Absorption de la lumière par les cristaux. — C'est à Brewster que nous devons presque tout ce que nous savons sur le *dichroïsme des cristaux*. Pour expliquer ce phénomène, on le rattache à la propriété qu'ont les milieux biréfringents d'absorber les rayons *polarisés*, en différentes proportions, suivant leur direction par rapport aux axes. Nous avons vu de fréquents exemples de cette variation d'absorption. Ainsi, une lame de tourmaline absorbe les rayons polarisés dans un plan parallèle à son axe, et les laisse passer en proportion plus ou moins grande quand on incline cet axe sur le plan de polarisation, et les rayons simples qui composent le faisceau blanc incident, étant tous absorbés en mêmes proportions, la lumière ne change pas de teinte. Mais quand les coefficients d'absorption des divers rayons simples varient dans des rapports différents quand on change leur direction dans le cristal, la nuance formée par le mélange des rayons non absorbés change également. Or, ces variations différentes des coefficients d'absorption s'observent directement sur la lumière simple traversant normalement des lames de même épaisseur de certains cristaux, suivant qu'elles sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe.

Explication. — Cela posé, quand des rayons pénètrent dans un cristal biréfringent normalement à une des faces, ils se divisent en général en deux parties polarisées à angle droit, et qui subissent une absorption qui varie suivant leur direction par rapport aux axes optiques, et suivant leur longueur d'ondulation. Si l'absorption varie dans le même rapport pour toutes les couleurs simples, il n'y a pas dichroïsme; c'est ce qui a lieu pour la plupart des tourmalines vertes. Si l'absorption est inégale, le dichroïsme se manifeste.

Dichroïsme artificiel. — L'influence de la couleur des cristaux sur le

dichroïsme est confirmée par les expériences de de Sénarmont, qui a obtenu le dichroïsme de certains cristaux incolores fortement biréfringents, en les colorant au moyen de matières organiques chimiquement inertes et n'altérant pas leur forme géométrique; telles que des teintures d'orseille, de bois de campêche et de Fernambouc. Les sels hydratés se colorent plus régulièrement que les sels anhydres. L'azotate de strontiane a donné les meilleurs résultats; il s'assimile presque toutes les teintures¹.

Loupe dichroscopique. — Le dichroïsme s'observe au moyen de la *loupe dichroscopique*, qui se compose d'un prisme biréfringent achromatisé, sur lequel est appliquée une loupe fixée au bout d'un tube. A l'autre bout de ce tube est un diaphragme, sur le trou duquel on place le cristal coloré. Les deux images, polarisées à angle droit, peuvent ainsi être facilement comparées.

Trichroïsme. — La théorie indique la possibilité du *trichroïsme* dans les cristaux à deux axes; et, en effet, M. Soret l'a observé dans certaines topazes du Brésil, dont la teinte était rose un peu jaunâtre, dans la direction de la ligne moyenne; violette, suivant la ligne complémentaire; et d'un blanc jaunâtre, perpendiculairement au plan des axes.

308-1. Absorption inégale des rayons ordinaire et extraordinaire. — Babinet a remarqué que, des deux rayons qui se séparent à l'entrée d'un milieu biréfringent à un axe, celui qui marche le moins vite est le plus absorbé. Ce sera donc le rayon ordinaire, dans les cristaux positifs, comme la tourmaline; et le rayon extraordinaire, dans les cristaux négatifs, comme le cristal de roche enfumé.

Cette loi, vraie dans le plus grand nombre de cas, souffre cependant d'assez nombreuses exceptions. Ainsi, M. Haidinger a trouvé que l'ordre des absorptions des deux rayons n'est pas le même dans les variétés jaune et bleue de béryl, qui sont toutes deux négatives. M. Beer a constaté la même exception dans le bichromate de potasse, la cyanite, certaines variétés de topaze, et a vu que l'idocrase et l'acétate de cuivre suivent la loi pour les rayons bleus, et s'en écartent pour les rayons jaunes, orangés et rouges.

M. Hagen a étudié la question méthodiquement, en mesurant les coefficients d'absorption des divers rayons simples suivant différentes directions dans un même cristal, par la méthode suivante²: un faisceau de lumière simple, polarisé par un nicol, traverse un spath d'Islande, où il se bifurque en deux autres, qui traversent la lame de cristal, dont la section principale est parallèle à celle du spath. On fait tourner le plan de polarisation du faisceau incident jusqu'à ce que les deux images soient égales. Si o et e sont les proportions de lumière des rayons ordinaire et extraordinaire non absorbées par la lame, α l'angle du plan de polarisation primitif avec la section principale du spath ou de la lame, on a $o \cos^2 \alpha = e \sin^2 \alpha$; d'où $o : e = \tan^2 \alpha$, pour le rapport des intensités des

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLI, p. 330.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LVI, p. 367.

rayons simples. — La lumière venait d'un spectre pur, obtenu au moyen de rayons solaires renvoyés par un héliostat et ayant traversé deux fentes étroites éloignées l'une de l'autre. Une nouvelle fente placée devant le nicol isolait une portion étroite du spectre. La lumière incidente était rendue diffuse par du papier huilé tendu sur un anneau, qu'on faisait tourner pour détruire l'effet des inégalités du papier.

M. Hagen a d'abord vérifié la loi générale du décroissement des intensités en progression géométrique quand les épaisseurs croissent en progression arithmétique, en constatant que le rapport $o : e$ satisfait lui-même à cette loi. Il opérait sur une même lame dont il modifiait successivement l'épaisseur en conservant une des faces, à laquelle il rendait l'autre bien parallèle. Il a ensuite cherché comment le rapport ab varie avec la longueur d'ondulation λ . Les expériences, faites sur le cyanoferrure rouge de potassium, la topaze enfumée, la cordiérite, la topaze jaune, la cyanite et diverses tourmalines, l'ont conduit aux résultats suivants :

1^o Le rapport $o : e$ est une fonction continue de λ , présentant, dans chacun des cristaux observés, un *maximum* ou un *minimum*.

2^o Les variations de $o : e$ sont égales de part et d'autre du *maximum* ou du *minimum*; de manière que s'ils ont lieu pour la longueur particulière λ' , les valeurs de $o : e$ sont égales, pour $\lambda' + n$ et $\lambda' - n$.

3^o La valeur et la position du *maximum* et du *minimum* dépendent de la direction de la lame par rapport aux axes du cristal.

4^o D'après la manière dont varie la fonction $o : e$, il est probable que, dans les cristaux qui font exception à la loi de Babinet, l'exception ne s'applique qu'à une partie des rayons du spectre.



Fig. 2094.

3085. Houppes des cristaux dichroïques. — Si l'on reçoit dans l'œil des rayons de lumière neutre, venant par exemple d'un ciel brumeux, et si ces rayons ont traversé une lame perpendiculaire à l'un des axes d'un *biaxe dichroïque*, on voit souvent, plus ou moins nettement, deux secteurs sombres opposés, sur fond brillant, que l'on nomme des *houppes*, H, H (fig. 2094). Les contours des secteurs ressemblent à des branches d'hyperbole dont l'axe transverse serait perpendiculaire au plan des axes optiques du cristal, et le centre sur l'axe auquel la lame est normale. Ces faits curieux, découverts en 1818 par Brewster, dans la cordiérite, l'épidote, l'azinite, le mica et la topaze, ont été ensuite étudiés, entre autres, par Haidinger, Herschel, qui appelait *idiocyclophanes* les cristaux qui les produisent, et de Sénarmont, qui a obtenu de belles houppes dans l'azotate de strontiane rendu dichroïque par la teinture de campêche (3083). Ces phénomènes étaient peu connus, lorsque M. Bertin publia, en 1878, une étude suivie des cristaux qui les produisent ¹. Parmi les 11 espèces qui lui ont donné

¹ Ann. de chim. et de phys., 5^e série, t. XV, p. 396, et Journ. de phys., t. VIII, p. 217.

des houpes, on distingue, comme donnant les résultats les plus remarquables, l'andalousite et l'épidote, dont les deux axes optiques sont presque perpendiculaires l'un sur l'autre.

M. Bertin a aussi expérimenté dans la lumière polarisée. Quand le plan de polarisation est perpendiculaire à la ligne des houpes, on a l'aspect de la figure 2094, complétée par des arcs noirs concentriques sur les parties sombres. Si le plan de polarisation est parallèle à la ligne des houpes, on a l'aspect de la figure 2095, dans laquelle la bande sombre est perpendiculaire à la ligne des houpes. L'andalousite, par exception, produit des effets inverses, la figure 2095 correspondant au plan de polarisation perpendiculaire aux houpes.

On a cru longtemps que les houpes ne se montraient que dans les biaxes dichroïques; mais M. Em. Bertrand en a observé dans des lames perpendiculaires à l'axe, de cristaux uniaxes dichroïques; par exemple la tourmaline et le platinocyanure de magnésium¹.

3086. Houpes d'Haidinger. — Quand on reçoit directement dans l'œil de la lumière polarisée, par exemple, la lumière du ciel ayant traversé un prisme de Nicol, on aperçoit une croix formée de quatre houpes, très-diffuses à leurs extrémités, et souvent peu distinctes; deux, dirigées dans le plan de polarisation, sont jaunes, et les deux autres, beaucoup plus vagues, sont violettes. Ce phénomène, découvert par M. Haidinger, permet de constater à l'œil nu si la lumière est polarisée. — Comme la lumière atmosphérique est le plus souvent polarisée, on peut observer les houpes et trouver son plan de polarisation, sans le secours d'aucun instrument; cependant tous les yeux ne paraissent pas propres à



Fig. 2095.

l'observation de ces phénomènes.

Pour expliquer les houpes, Silbermann supposait que la cornée et le cristallin étaient biréfringents; la cornée et les parties antérieures du cristallin joueraient le rôle d'une lame mince cristallisée, les parties postérieures faisant l'office de polariscope; et il cite à l'appui les couleurs obtenues par Brewster, au moyen du cristallin de divers animaux placé entre un polariseur et un polariscope. Néanmoins, la théorie suivante, due à M. Jamin, semble plus plausible².

Si l'on fait tourner une pile de glaces autour d'un rayon polarisé qui la rencontre obliquement, l'intensité du rayon émergent dépend de l'angle de la section principale de la pile avec le plan de polarisation. Si l'on forme une pile avec des lentilles superposées, tous les plans passant par l'axe commun de ces lentilles seront autant de sections principales, et un faisceau polarisé présentera,

¹ Journal de physique de M. d'Almeida, t. VIII, p. 227.

² Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. XXVI, p. 197.

dans chacun de ces plans, une intensité dépendant de l'angle qu'il fait avec le plan de polarisation, comme cela a lieu avec le cône de M. Guérard (2962). Il y aura donc un *maximum* et un *minimum*; le premier, perpendiculaire au plan de polarisation, formera deux houppes épanouies brillantes; le second, parallèle à ce plan, formera deux houppes sombres. Un système de lentilles, alternativement convergentes et divergentes pour ne pas imprimer de déviation aux rayons, donne également ces houppes. Or, l'œil est composé de milieux superposés présentant la forme de lentilles : la cornée, l'humeur aqueuse, les couches du cristallin. Lors donc qu'il recevra de la lumière polarisée, il s'y formera des houppes, qui se peindront sur la rétine.

§ 3. — ÉTUDE DES CRISTAUX, PAR LA POLARISATION CHROMATIQUE.

3087. Application à la cristallographie. — La polarisation chromatique offre à la cristallographie des moyens précieux d'investigation, en lui fournissant une méthode prompte et facile pour reconnaître si un cristal appartient au système régulier, à l'un des deux systèmes symétriques autour d'un axe, ou à un de ceux qui ne présentent pas cette symétrie. On peut aussi trouver, au moyen des anneaux et des courbes isochromatiques, la position des axes, celle de leur plan, l'angle qu'ils font entre eux; et, dans le cas des uniaxes, reconnaître s'ils sont positifs ou négatifs. Parmi les moyens qui servent à ce dernier usage, nous rappellerons celui qu'ont imaginé MM. Moigno et Soleil (2950), et qui consiste à faire naître par compression deux axes dont on reconnaît le plan par la position des pôles des lemniscates.

Dans beaucoup de cas, on n'a à sa disposition que des cristaux ou fragments de cristaux, trop petits pour qu'on puisse les étudier avec les appareils que nous avons décrits. On emploie alors des microscopes spéciaux, avec lesquels on peut expérimenter soit dans la lumière parallèle, soit dans la lumière convergente.

3088. Microscope polarisant d'Amici. — En *co* (fig. 2096) est le corps du microscope, pouvant se déplacer le long d'une règle verticale quand on agit sur le pignon denté *n*. En *o*, *o*, est l'objectif et en *cv*, *cv* un oculaire d'Huyghens

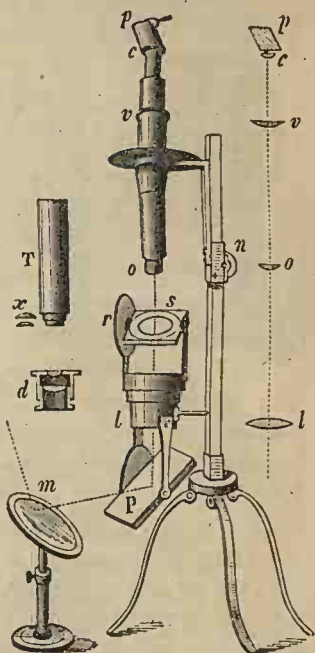


Fig. 2096.

(2803). Les grossissements sont faibles, de 12 à 55 diamètres, pour lesquels la distance frontale est de 105^{mm} à 16^{mm} . Le cercle de Ramsden (2802) se forme assez loin de l'oculaire pour qu'on puisse interposer un spath d'Islande p, p . L'objet est remplacé par la lame cristallisée posée sur un disque de verre s mobile sur lui-même et autour d'un axe horizontal, avec limbes gradués s, r . Cette lame reçoit en-dessous des rayons polarisés énergiquement par réflexion multiple sur une pile de glaces P formant un angle de 35° avec les rayons incidents. Cette pile reçoit la lumière du soleil, des nuées ou d'une lampe, renvoyée

par un miroir de glace m articulé sur son support. De chaque point du cristal partent des couples de rayons superposés et présentant partout la même différence de marche, le champ étant très-étroit, comparativement à la distance so . Le spath p donne deux images; un écran percé de deux trous, que l'on peut fermer à volonté, permet de n'en observer qu'une, ou d'observer presque simultanément, par un léger déplacement de l'œil, les deux images complémentaires.

Pour expérimenter, dans la lumière convergente, on adapte au-dessous du porte-cristal s , un système de lentilles d , qui rassemble en un foyer très-rapproché, les rayons parallèles venant de la pile de glaces. Les rayons croisés à ce foyer traversent ensuite la lame en divergeant. Comme la petitesse de l'objectif ne permettrait d'admettre dans l'instrument qu'une très-petite partie des rayons divergents, on adapte au corps du microscope un tube auxiliaire, T , muni de deux lentilles x qui forment une image de la lame assez petite et assez rapprochée de l'objectif o , pour que les rayons

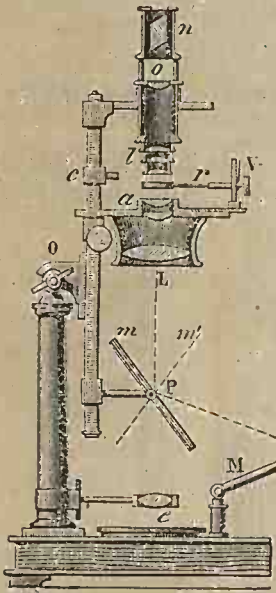


Fig. 2097. — 1/8.

qui partent de cette image ne sortent pas du champ. On peut ainsi observer des anneaux avec les plus petits fragments de cristaux, et reconnaître s'ils sont uniaxes, biaxes, ou du système régulier.

Le microscope polarisant a reçu divers perfectionnements de M. de Norremberg et de divers constructeurs. La figure 2097 représente le modèle combiné par M. J. Duboscq. La est le système éclairant, et ol le microscope proprement dit, surmonté d'un nicol n . La lumière renvoyée par un miroir plan M , se polarise par réflexion sur la pile de glaces mP . Quand on veut opérer dans la lumière convergente émergeant de la lentille a , on place la lame biréfringente sur le porte-cristal a qui peut tourner sur lui-même. En r est une pince dont on mesure l'inclinaison sur l'axe du microscope, au moyen d'un

secteur gradué V. Pour opérer dans la lumière parallèle, on met la lame en *o*, entre l'oculaire et l'analyseur. — L'instrument peut se placer horizontalement, en le faisant basculer autour du genou O. On peut alors fixer en *e* une petite auge en verre, dans laquelle on plonge la pince, quand on veut expérimenter dans un liquide, par exemple, pour mesurer l'angle des axes (3077).

En ne laissant qu'une glace en *mP* et l'inclinant suivant *m'*, après avoir enlevé les lentilles *a*, L et remplacé le microscope *nl* par un simple analyseur, on transforme l'instrument en un appareil de Norremberg ordinaire, dont le miroir étamé est en *e* (3040).

Dans le microscope de M. Nodot (fig. 2098), représenté tel que le construit M. Ducretet, l'analyseur N est placé entre l'oculaire L et le système objectif A5. La lumière, renvoyée par un miroir plan, se polarise sur la pile de glaces G et traverse en convergeant la lame placée entre les lentilles 5 et 6, et que l'on peut fixer dans une pince, au moyen de laquelle on mesure son inclinaison. Quand on veut opérer dans la lumière parallèle, on place la lame en A. On peut renverser l'appareil horizontalement et plonger la lame dans une auge de verre contenant un liquide; on peut aussi projeter les images sur un écran, après avoir enlevé la lentille L, et introduit une nouvelle lentille au-dessous de l'analyseur.

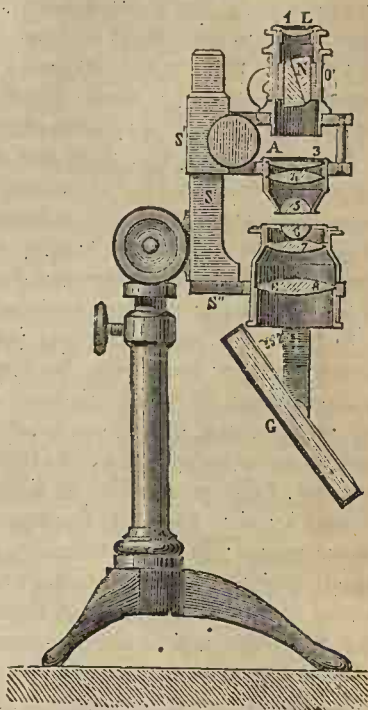


Fig. 2098.

3089. Application à l'étude de l'isomorphisme. — De Sénarmont s'est proposé de comparer les propriétés optiques des cristaux *isomorphes*, pour savoir jusqu'à quel point ces propriétés

restent constantes quand la forme géométrique et la constitution chimique sont les mêmes. Il remarque d'abord qu'il y a des cas où l'isomorphisme chimique et géométrique réalisés dans certains composés, ne le sont pas dans d'autres formés des mêmes éléments. D'autres fois, des composés isomorphes chimiquement et géométriquement refusent de s'unir par cristallisation, à cause d'une dissemblance moléculaire, attestée seulement par certains caractères optiques et par des particularités de forme qu'on pourrait croire accidentelles. Il était donc important de comparer les propriétés biréfringentes des cristaux isomorphes. Mais il ne suffisait pas d'étudier les phénomènes optiques dans le micros-

cope polarisant; il fallait encore, autant que possible, trouver les indices de réfraction et les directions des axes, par des procédés qui durent varier suivant les espèces. Voici les résultats les plus importants trouvés par de Sénarmont¹.

1° Dans un grand nombre de groupes de cristaux isomorphes à un ou à deux axes, les propriétés optiques sont semblables au même degré que la forme géométrique et la constitution chimique. La presque identité de propriétés optiques est surtout remarquable dans le groupe nombreux des sels doubles, formés par l'union des sulfates de potasse et d'ammoniaque avec presque tous les oxydes de la famille magnésienne, qui sont réductibles au prisme oblique symétrique. Non-seulement les trois élasticités principales conservent à peu près le même rapport, mais les axes d'élasticité homologues ont à peu près la même direction dans le cristal, quoique cette direction ne soit pas, ici, une conséquence forcée de la symétrie géométrique.

2° Il y a des sels qui, ayant des propriétés optiques identiques, ne sont cependant *isomorphes* ni géométriquement, ni chimiquement; car ils peuvent se combiner, avec dégagement de chaleur, pour former des composés différant de chacun d'eux par la cristallisation et les propriétés chimiques. Tels sont les *levotartrates* et les *dextrotartrates d'ammoniaque*, de *soude* et *ammoniaque*, de *soude* et *potasse*; les acides *levotartrique* et *dextrotartrique*.

3° Il y a des sels parfaitement isomorphes par l'identité de leur forme géométrique, par leur composition chimique et leur aptitude à s'allier en cristallisant, et qui cependant présentent des propriétés optiques tout opposées. Par exemple, dans les groupes formés l'un du *spath calcaire*, de l'*azotate de soude* et du *sulfate de potasse*, l'autre des *hyposulfates de chaux*, de *strontiane*, de *plomb*, l'axe optique donne la direction du plus grand axe d'élasticité chez les deux premiers sels, et la direction du plus petit axe chez le dernier sel de chaque groupe; en d'autres termes, les deux premiers sont négatifs, et le dernier positif. — Dans les cristaux à deux axes, le *chromate* et le *sulfate de potasse* ont leur axe d'élasticité moyenne situé de la même manière; mais dans le premier, la ligne moyenne donne la direction du plus grand axe d'élasticité, et dans le dernier, celle du plus petit axe. Dans le groupe de l'*aragonite*, du *plomb carbonaté* et de l'*azotate de potasse*, la ligne moyenne est l'axe de plus grande élasticité; mais dans les deux premiers, les axes de plus petite et de moyenne élasticité sont situés dans des plans différents perpendiculaires l'un à l'autre. Les *tartrates de soude et potasse* (sel de seignette), de *soude et ammoniaque*, présentent des différences analogues; de plus, les axes optiques, différents pour les diverses couleurs, et également écartés les uns des autres dans les deux sels, sont situés dans des plans diamétraux rectangulaires.

Il résulte de ces faits que l'élasticité de l'éther présente, dans certains cristaux isomorphes, une inversion complète de grandeur relative; ce qui indique dans la valeur de la résultante des actions moléculaires qui modifient cette élasticité,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIII, p. 391.

une inversion semblable, pendant que l'enveloppe géométrique reste presque identiquement la même. Les causes déterminantes de la forme géométrique sont donc d'un autre ordre que celles qui président aux propriétés optiques, une même cause ne pouvant se manifester en même temps par des effets géométriques semblables et par des effets optiques opposés.

Depuis les recherches dont nous venons de parler, plusieurs physiciens se sont occupés du même sujet et ont, en général, confirmé les conclusions de de Sénarmont. Le travail le plus étendu a été publié par MM. Haldor, Topsoe et C. Christiansen, qui se sont appliqués principalement à la détermination des indices de réfraction principaux de plus de 60 espèces appartenant à diverses séries de substances isomorphes. Les nombreux résultats qu'ils ont rassemblés, ne pourront manquer d'être utilisés avec profit dans les recherches à venir¹.

3090. Mélanges de sels isomorphes. — L'opposition entre les propriétés optiques sous la même forme extérieure est confirmée par les expériences qu'a faites de Sénarmont sur les cristaux obtenus par le mélange de sels isomorphes. Ayant fait cristalliser de l'*hyposulfate de strontiane*, qui est négatif, avec diverses quantités d'*hyposulfate de plomb*, qui est positif, il vit les anneaux autour de l'axe s'étendre à mesure que la proportion du second sel était augmentée, puis être remplacés par une teinte violette uniforme coupée d'une croix noire, ce qui indique que les actions inverses des deux substances se contre-balançaient et faisaient disparaître la double réfraction. Les anneaux reparaissaient ensuite en se resserrant de plus en plus. — Si l'on fait cristalliser le sel de seignette mélangé avec des proportions croissantes de *tartrate double de soude et ammoniacque*, dont le plan des axes optiques est dirigé perpendiculairement à celui du premier sel, l'angle des axes diminue, en même temps que les axes dans la lumière rouge se rapprochent de ceux de la lumière violette placés en dedans des premiers. Les axes de ces deux couleurs finissent par se confondre, et alors les courbes isochromatiques sont nettes et régulières. Les axes rouges passent ensuite en dedans des axes violets, et se réunissent en un seul, de manière que le cristal est à un axe pour les rayons rouges. Ces axes se séparent ensuite, mais dans un plan perpendiculaire à leur plan primitif, de sorte que les axes violets et les axes rouges se trouvent dans des plans rectangulaires, et que le cristal se trouve être à un axe, pour une des couleurs intermédiaires. Les axes de toutes les couleurs se réunissent enfin dans le plan des axes rouges, l'influence du sel ammoniacal l'emportant alors sur celle du premier sel. — Nous avons vu (2950) comment les variations des angles des axes dans les substances isomorphes mélangées, ont conduit de Sénarmont à expliquer les différences que présentent ces angles dans certains cristaux, comme les topazes et les micas.

M. Dufet a publié, en 1878², un travail sur les variations des indices de

¹ *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. I, p. 5.

² *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. VII, p. 325.

réfraction dans des mélanges de sulfates de la série magnésienne; et, entre autres résultats, il a trouvé que les différences entre les indices d'un mélange de deux sels isomorphes, et ceux des sels composants, sont en raison inverse des nombres d'équivalents des deux sels qui entrent dans le mélange.

CHAPITRE XIV

POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE

« C'est lui (Fresnel) qui, le premier, a fait voir qu'un rayon peut avoir les mêmes propriétés sur tous les points de son contour, et n'être pas cependant de la lumière naturelle. »

(ARAGO, *Biographie de Fresnel.*)

§ 1. — CARACTÈRES ET ORIGINE DE LA POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE.

3091. Définitions. — Nous avons vu que la lumière polarisée, après avoir traversé une lame biréfringente, n'est, en général, ni polarisée dans un plan, ni à l'état neutre (3042); car cette lumière ne peut s'éteindre complètement en traversant un polariscope, de quelle manière qu'il soit orienté, et en même temps, vue à travers le polariscope, elle présente, quand la lame est suffisamment mince, des couleurs que la lumière naturelle ne produit pas dans les mêmes circonstances. La lumière qui a éprouvé la réflexion totale dans un milieu transparent, celle qui a été réfléchie par un métal poli, et même par la plupart des substances non métalliques, présente aussi des propriétés qui montrent qu'elle n'est ni naturelle ni polarisée dans un plan. Quel est donc l'état de cette lumière, et dans quelles directions les vibrations s'y accomplissent-elles? Fresnel a répondu à ces questions par la théorie de la *polarisation circulaire et elliptique*, qui va nous occuper.

Lumière polarisée circulairement. — Quand un faisceau de rayons lumineux reçu dans un analyseur présente la même intensité dans tous les azimuts comme la lumière naturelle, et que, en même temps, ce faisceau se colore quand on interpose une lame cristallisée, ce qui n'a pas lieu avec la lumière naturelle, il est dit *polarisé circulairement*, et l'on remarque que la couleur obtenue avec la lame mince est différente de celle que donnerait un rayon polarisé dans un plan.

Polarisation elliptique. — Quand un faisceau présente des intensités

maximum et minimum dans deux positions rectangulaires de l'analyseur, comme la lumière *partiellement* polarisée dans un plan, et que, en même temps, il se colore par l'interposition d'une lame cristallisée, il est dit avoir reçu la *polarisation elliptique*; les couleurs qu'il donne à travers la lame diffèrent de celles que donnerait un rayon polarisé partiellement dans un plan.

3092. État des rayons polarisés circulairement. — L'expérience prouve que la polarisation circulaire ou elliptique prend naissance dans les groupes formés de deux rayons polarisés à angle droit, et ayant une certaine différence de marche l'un par rapport à l'autre. Cherchons donc quel peut être l'état de mouvement des molécules d'éther dans un semblable groupe. Soit OZ (fig. 2099) la direction commune des deux rayons verticaux marchant de haut en bas, ayant même longueur d'ondulation, et polarisés, l'un dans le plan XOZ, l'autre dans le plan YOZ perpendiculaire au premier. Représentons par les ordonnées horizontales d'une courbe sinuieuse, les vitesses qui animent les molécules d'éther à un instant donné, dans ces deux rayons. Ces courbes seront situées, l'une dans le plan YOZ, l'autre dans le plan XOZ. Supposons que le rayon dont les mouvements s'accomplissent dans le plan XOZ soit en avance sur l'autre, de $\frac{1}{4} \lambda$; alors le point *c* se trouve au milieu de l'espace OA. Au point O, la molécule d'éther est animée, dans le plan XOZ, d'une vitesse représentée par l'ordonnée de la courbe dirigée suivant O ω . Au point *a*, la molécule d'éther reçoit une vitesse qui est la résultante *aa'* des vitesses représentées par les ordonnées des deux courbes, partant du point *a*; en *b*, cette vitesse est représentée par la résultante *bb'*; et en *c*, par *cc'* parallèle à OY. En *n* et en *r*, elle est dirigée suivant *nv* et *rp*, et en A, suivant A λ parallèle à OX. Dans les points intermédiaires à ceux que nous avons considérés, les directions des vitesses sont aussi intermédiaires aux directions $\omega, \alpha, \beta, \gamma, \nu, \rho, \lambda$; et l'on voit que ces directions auront tourné de 180° , dans l'espace OA = $\frac{1}{2} \lambda$; et, par conséquent, de 360° , dans l'espace OZ = λ . Les différentes directions des vitesses forment donc les génératrices d'un *héliçoïde* ayant pour axe OZ.

On démontre par l'analyse, que toutes ces vitesses sont égales, quand la différence de marche est égale à $\frac{1}{4} \lambda$ et quand les deux rayons ont la même intensité. Il en résulte que les molécules distribuées dans l'espace OZ se trouvent situées au même instant sur une hélice dont le pas est λ .

Il est évident que les résultats seraient les mêmes si la différence de marche était d'un nombre impair de fois $\frac{1}{4} \lambda$. Si le nombre était pair, les deux courbes couperaient l'axe OZ aux mêmes points, et toutes les résultantes seraient dirigées dans le plan bissecteur, qui serait le nouveau plan de *polarisation rectiligne*.

Mouvement d'une molécule. — Considérons maintenant une même molécule

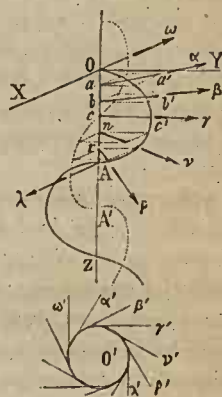


Fig. 2099.

d'éther, O, à différentes époques; elle recevra pendant la progression du système considéré, les vitesses successives aa' , bb' , cc' ... Soit donc O', la projection sur un plan horizontal, de cette molécule; elle marchera d'abord suivant ω' parallèle à ω , puis sera sollicitée suivant α' parallèle à az , suivant β' parallèle à bz ;... Les changements de directions se succédant d'une manière continue, et les vitesses étant constantes, la particule d'éther décrira pendant la durée d'une ondulation, une circonférence parallèle à la surface de l'onde. Le diamètre de cette circonférence dépend de l'intensité commune des deux rayons, ou de l'amplitude des vibrations, et il est excessivement petit, comme cette amplitude.

Toutes les molécules du rayon OZ parcourant dans le même temps des circonférences égales, on imite leur état de mouvement en marquant des points disposés en hélice sur un gros tube de verre que l'on fait tourner sur lui-même. Si l'on projette sur un plan horizontal, puis sur un plan vertical l'ombre de ce tube en repos, les ombres des points forment des courbes sinueuses dont les ordonnées représentent, pour un instant donné, les vitesses des molécules d'éther des deux rayons polarisés dans deux plans à angle droit, qui ont donné naissance au rayon polarisé circulairement. On constate que les ordonnées *maximum* d'une de ces courbes correspondent aux points où l'autre courbe coupe son axe de symétrie.

3093. État des rayons polarisés elliptiquement. — Si les deux rayons polarisés à angle droit ne sont pas de même intensité, la courbe décrite par chaque molécule d'éther n'est plus une circonférence, mais une *ellipse*; et comme les vitesses résultantes reprennent périodiquement les mêmes valeurs, cette ellipse a son grand axe dans une direction constante, de sorte que les molécules successives sont distribuées sur une courbe hélicoïdale tracée sur un cylindre à base elliptique. On démontre par le calcul que la vitesse de chaque molécule varie aux divers points de la courbe qu'elle décrit.

La différence entre les axes de l'ellipse est d'autant plus grande que les intensités des rayons diffèrent davantage, et la direction du grand axe se rapproche d'autant plus du plan du rayon le plus intense, ou du plan de polarisation du plus faible, que la différence est plus grande. Si la différence est nulle, l'ellipse devient une circonférence. Si l'un des rayons a une intensité nulle, l'autre conserve sa polarisation rectiligne.

On voit que la *polarisation rectiligne* et la *polarisation circulaire* ne sont que des cas particuliers de la *polarisation elliptique*, et que le cas général des vibrations parallèles à la surface de l'onde est celui où les molécules d'éther décrivent des ellipses.

La polarisation *elliptique* se produit encore avec deux rayons d'intensité égale polarisés à angle droit, quand la différence de marche n'est pas d'un nombre *impair* exact de fois $\frac{1}{4} \lambda$, et les deux axes de l'ellipse diffèrent d'autant plus, que la différence de marche s'approche davantage d'un nombre pair de fois $\frac{1}{4} \lambda$, auquel cas la polarisation devient rectiligne (3092). — Nous trouvons une représentation matérielle des mouvements de la molécule d'éther, dans les

courbes de M. Lissajous, produites par deux diapasons à l'unisson vibrant dans des plans rectangulaires : la ligne lumineuse est une droite, une ellipse ou une circonférence, suivant la différence de phase des vibrations (I, 668).

3094. Sens du mouvement giratoire. — Pour trouver le sens du mouvement de la molécule d'éther sur la courbe qu'elle décrit, considérons l'angle dièdre YOZ (fig. 2099) placé en avant, et deux portions de courbes Oc'a et cA' placées également dans les parties antérieures des plans de polarisation YOZ, XOZ. Supposons d'abord que les nœuds des deux courbes coïncident, c'est-à-dire que A se confonde avec A', et c avec O, et qu'ensuite on fasse avancer de $\frac{1}{4}\lambda$, l'onde du plan YOZ, comme dans la figure ; le mouvement de chaque molécule se fera de droite à gauche, en avant, et les molécules d'éther seront distribuées sur une hélice *dextrorsum*. Si, au contraire, on retardait le rayon du plan YOZ, de $\frac{1}{4}\lambda$, on reconnaîtrait facilement, en cherchant comme ci-dessus les directions des vitesses aux différents points du rayon OZ, que l'hélice serait *sinistrorsum*, et que le mouvement d'une même molécule aurait lieu de gauche à droite en avant.

3095. Propriété des rayons à vibrations circulaires ou elliptiques.

— Du mouvement giratoire qui anime les molécules d'éther, découlent les caractères qui nous ont servi à définir la polarisation circulaire et elliptique (3091).
 1° Si l'on fait tomber obliquement sur un miroir un rayon *polarisé circulairement*, l'intensité du rayon réfléchi sera indépendante de l'azimut de réflexion ; car il se présentera à la surface du miroir et dans un temps imperceptible θ , des molécules d'éther animées de vitesse prenant successivement toutes les directions, comme cela a lieu pour un rayon naturel. Seulement, ici, ce temps θ est déterminé, et égal à celui que met la molécule à faire un tour entier. Ce résultat pouvait aussi se déduire de l'identité du rayon en tous les points de son contour.
 — 2° Si le rayon tombe sur un polariscope biréfringent, chacune des vitesses que possède la molécule dans les directions successives, se décomposant en deux autres parallèles et perpendiculaires à la section principale, ces composantes passent, dans le temps θ , par toutes les valeurs, depuis 0 jusqu'à 1, de manière que les deux images ont la même intensité constante. — 3° Un faisceau polarisé circulairement donne des couleurs avec les lames cristallisées. Remarquons d'abord que, si un rayon polarisé dans un plan donne deux images de couleurs complémentaires quand il passe à travers une lame cristallisée et un prisme biréfringent, un autre rayon polarisé en sens inverse donnerait aussi deux images de mêmes couleurs que les deux premières, mais dans une position inverse ; de manière que les images superposées deux à deux formeraient deux images blanches, si toutefois les deux rayons primitifs polarisés à angle droit, étaient en coïncidence de marche en arrivant à la lame ; mais s'il y avait un retard préalable entre ces deux rayons, les deux images définitives seraient évidemment colorées. Cela posé, nous pouvons remplacer le rayon polarisé circulairement par les deux rayons polarisés à angle droit qui l'ont engendré, rayons qui sont précisément dans le cas que nous venons de supposer. Ils donneront donc des couleurs

à travers une lame cristallisée et un analyseur; et l'on voit que ces couleurs seront différentes de celles que donnerait un rayon unique polarisé dans un plan, le retard n'étant plus le même, puisqu'il est modifié de $\frac{1}{4}\lambda$.

Ce que nous venons de dire s'applique à la polarisation elliptique; mais dans ce cas, les rayons n'ont plus une intensité constante quand ils sortent d'un analyseur qui les a reçus directement, les vitesses de la molécule d'éther aux différents points de l'ellipse n'étant plus constantes; et le rayon se comportera, quant aux intensités, comme un rayon polarisé partiellement dans un plan perpendiculaire au grand axe de l'ellipse.

3096. Application à la lumière émergent d'une lame biréfringente. — La lumière polarisée ayant traversé une lame cristallisée parallèle à l'axe, nous offre un exemple des différents cas de polarisation *linéaire, circulaire et elliptique*. Reprenons les formules qui donnent l'intensité des deux rayons reçus dans un polariscope (3048) :

$$I_o = \cos^2 \beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

$$I_e = \sin^2 \beta + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

La valeur de β qui annule un des deux termes de chacune de ces valeurs, ne peut annuler l'autre; et si ce dernier n'est pas nul d'avance, aucun des rayons ne peut s'éteindre complètement quand on fait varier l'angle β de la section principale du polariscope avec le plan primitif de polarisation. Si le second terme était nul, on aurait $I_o = \cos^2 \beta$, $I_e = \sin^2 \beta$. Le rayon extraordinaire s'éteindrait pour $\beta = 0^\circ$ ou 180° ; et le rayon ordinaire, pour $\beta = 90^\circ$ ou 270° . Un des rayons s'annulerait donc quand la section principale du polariscope serait parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et le faisceau qui émerge de la lame posséderait, comme le rayon incident, la polarisation rectiligne et dans le même plan. Or, le second terme des valeurs de I_o et I_e devient nul quand l'épaisseur de la lame est telle que la différence de marche d soit égale à un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$; car alors $\sin^2 \pi (d : \lambda)$ est nul. — Si d était égal à un nombre impair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, les valeurs de I_o et I_e deviendraient

$$I'_o = \cos^2 \beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta); \quad I'_e = \sin^2 \beta + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta).$$

La première est nulle pour $\beta = 90^\circ + 2\alpha$, et la seconde, pour $\beta = 2\alpha$. La lumière est donc, dans ce cas, polarisée dans les azimuts $90^\circ + 2\alpha$, ou 2α .

Cas où la lumière est polarisée circulairement. — Supposons maintenant $\alpha = 45^\circ$, auquel cas les deux faisceaux séparés par la lame sont de même intensité, et supposons que leur différence de marche soit d'un nombre impair de fois $\frac{1}{2}\lambda$. Le facteur $\sin^2 \pi (d : \lambda)$ devient égal à $\frac{1}{2}$, quel que soit β , et les valeurs de I_o et I_e deviennent

$$I'''_o = \cos^2 \beta - \frac{1}{2} \cos 2\beta = \frac{1}{2}, \quad \text{et} \quad I'''_e = \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \cos 2\beta = \frac{1}{2};$$

elles sont donc égales, quel que soit β , ce qui est le propre de la lumière polarisée circulairement.

Pour remplir les conditions que nous venons de supposer, l'axe de la lame cristallisée faisant un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, on l'incline en la faisant tourner autour d'une droite prise dans son plan et perpendiculairement à l'axe, jusqu'à ce que le faisceau donne deux images égales dans toutes les positions de l'analyseur; et alors le faisceau est polarisé circulairement. Si ensuite on engage une nouvelle lame biréfringente entre la première et l'analyseur, les images sont colorées; ce qui n'aurait pas lieu si la seconde lame recevait de la lumière naturelle. En faisant varier ensuite l'inclinaison de la première lame, on obtiendra des rayons *elliptiques* à différents degrés, et en la faisant en même temps tourner sur elle-même, on pourra passer par tous les degrés d'ellipticité compris entre les polarisations circulaire et rectiligne.

3097. Lames quart d'onde. — On peut obtenir tous ces résultats au moyen d'une lame normale aux rayons, en lui donnant une épaisseur convenable. Quand la section principale de cette lame fait un angle de 0° ou de 90° avec le plan primitif de polarisation, la lumière reste polarisée dans ce plan; si l'angle est de 45° , la polarisation *peut être* circulaire; elle est elliptique pour tous les autres angles. Une lame qui remplit la condition de donner aux deux rayons qu'elle sépare une différence de marche égale à $\frac{1}{4}\lambda$, se nomme *lame quart d'onde*. Avec le quartz et le gypse, l'épaisseur doit être de $0^{\text{mm}},0158$ pour les rayons moyens du spectre. — Une lame de mica quart d'onde aurait $0^{\text{mm}},032$; elle donne, entre deux polariscope, les teintes complémentaires *gris bleuâtre* et *blanc jaunâtre*; et quand on la pose sur la glace inférieure de l'appareil de Norremberg, ce qui revient à en doubler l'épaisseur, les teintes *jaune-paille* et *rouge intense*. Ces couleurs permettent de reconnaître les micas quart d'onde, sans mesurer les épaisseurs. Le mica doit être à un axe et taillé parallèlement à cet axe. — Un mica quart d'onde transformera évidemment un polarisé rectiligne en polarisé circulaire. Il fournit le moyen le plus simple d'obtenir de la lumière *polarisée circulairement*.

3098. Polariscope circulaires et elliptiques. — Une lame quart d'onde constitue un polariscope propre à faire reconnaître la lumière polarisée *circulairement*. En effet, une semblable lame apportant un retard de $\frac{1}{4}\lambda$ dans les rayons polarisés à angle droit qui engendrent le faisceau polarisé circulairement et possèdent déjà un retard égal, le retard total devient $\frac{1}{2}\lambda$; de sorte que ces deux rayons combinés donnent un rayon polarisé dans un plan, reconnaissable au moyen des polariscope ordinaires; on dit que la lame *a restauré* le rayon. — Si le faisceau est polarisé *elliptiquement*, le quart d'onde le transformera en polarisé rectiligne, si sa section principale est parallèle à l'un des axes de l'ellipse de vibration. Si le faisceau donné était naturel, la lame quart d'onde le laisserait naturel; s'il était polarisé dans un plan, elle lui donnerait la polarisation circulaire ou elliptique, et il semblerait *naturel* dans les polariscope ordinaires. On formera donc un *polariscope circulaire*, en

superposant une lame quart d'onde et un polariscope ordinaire, ajustés dans des anneaux pouvant tourner l'un dans l'autre.

On voit que la réciprocity entre les polariseurs et les polariscopes s'étend à la polarisation circulaire ; car, ce qui a lieu pour les lames quart d'onde, aurait lieu de même pour tout appareil capable d'apporter une différence de marche de $\frac{1}{4} \lambda$ dans les deux composantes d'un rayon polarisé rectiligne. Cet appareil restaurerait un rayon polarisé circulaire et formerait un polariscope circulaire.

Polariscope ou compensateur à franges, de Babinet. — Cet appareil très-sensible, et qui peut aussi s'appliquer à la polarisation rectiligne, donne des franges colorées même avec la lumière parallèle¹. Il se compose de deux lames prismatiques de quartz, dont on voit la coupe en *abc, adc* (fig. 2101, p. 672), se présentant l'une à l'autre par la face hypothénuse. Les faces *ab, dc* sont parallèles à l'axe, qui dans l'une est parallèle à l'arête *a*, et dans l'autre, lui est perpendiculaire, de manière que les axes des deux lames sont croisés à angle droit. L'une des lames est fixe et l'autre peut s'avancer au moyen d'une vis micrométrique, représentée en *V* (fig. 2101), telle que l'a disposée M. Jamin dans des expériences que nous citerons bientôt. Deux fils, *n, n*, tendus parallèlement aux arêtes des prismes, limitent l'espace dans lequel on observe.

Introduisons normalement par la face *ab*, un rayon polarisé dans un plan incliné de 45° sur les axes des lames. Ce rayon se divisera dans la première lame en deux autres : l'ordinaire devient l'extraordinaire dans la seconde, et *vice versa*, de manière que si les trajets dans les deux lames sont égaux, les différences de marche se compensent. C'est ce qui a lieu dans la position figurée des deux lames, et ce que l'on reconnaît quand, l'analyseur étant tourné à l'obscurité en l'absence du compensateur, cette obscurité persiste entre les fils *n, n* quand celui-ci est interposé. De chaque côté de cette bande noire, se trouvent deux bandes blanches, puis des franges irisées dont on n'a pas à s'occuper ici. Si l'on fait avancer l'une des lames au moyen de la vis *V*, les épaisseurs des deux lames deviendront inégales entre les fils *n, n* ; un des rayons conservera une différence de marche, qu'on pourra rendre égale à $\frac{1}{2} \lambda$, et la lumière sera polarisée dans l'azimut de -45° ; on retrouvera donc l'obscurité en tournant l'analyseur, de 90° . Entre ces deux limites, on aura des différences de marche *d*, qui se déduiront du déplacement *x*, du prisme, comparé à celui, *a*, qui donne la différence $\frac{1}{2} \lambda$, par la proportion $x : a = d : \frac{1}{2} \lambda$.

Pour appliquer le compensateur à un rayon elliptique, on reçoit ce rayon dans le compensateur muni de son analyseur ; la frange noire du milieu ne se trouve plus entre les fils *n, n*, à cause de la différence de marche des deux rayons polarisés à angle droit dans lesquels on peut décomposer le rayon elliptique, et on le ramène entre ces fils en agissant sur la vis ; le rayon elliptique est restauré, et la différence de marche que donne alors le compensateur est égale et de signe contraire à celle du rayon qu'il a restauré.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XLVI, p. 240.

§ 2. — POLARISATION ELLIPTIQUE PAR RÉFLEXION

I. Réflexion totale et réflexion métallique.

3099. I. RÉFLEXION TOTALE. — Les formules qui représentent les intensités des rayons polarisés dans les azimuts principaux, après leur réflexion (2981, 2982), s'appliquent au cas où le second milieu est moins réfringent que le premier, tant que l'angle d'incidence ne dépasse pas l'*angle limite*. Mais quand cet angle est dépassé, les formules se compliquent d'imaginaires. En effet, si l'on remplace n par $1:n$, et $\sin r$ par $n \sin i$, elles contiennent le radical $\sqrt{1 - n^2 \sin^2 i}$. Quand i est égal à l'angle limite, on a $\sin i = 1:n$ (2485), et les intensités sont égales à 1. Quand on a $\sin i > 1:n$, la quantité sous le radical devient négative, et les valeurs des intensités sont imaginaires. D'un autre côté, Fresnel avait observé depuis longtemps, que la réflexion totale fait subir à la lumière polarisée une *dépolarisation* partielle, qui devient complète dans le verre, après deux réflexions intérieures sous l'angle de 54° . Il conclut de là que les valeurs imaginaires proviennent de ce que quelques-unes des suppositions servant de base au calcul ne sont plus vraies au-delà de l'angle limite. Parmi ces suppositions se trouve celle de la coïncidence de phase dans les ondes incidente et réfléchie. Fresnel admit alors qu'un rayon polarisé tombant sous une incidence intérieure plus grande que l'*angle limite*, donne deux rayons, polarisés dans le plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire, qui sont en retard l'un sur l'autre; soit qu'ils se réfléchissent à des profondeurs différentes, soit qu'ils éprouvent dans l'acte de la réflexion, des modifications différentes dans les périodes de leurs vibrations. Il prouva qu'une semblable différence de phase doit, en effet, introduire des termes imaginaires dans des formules calculées en supposant que le retard n'existe pas; et, considérant le cas où cette différence de phase est de $\frac{1}{4} \lambda$, il étudia l'état des molécules d'éther dans le rayon résultant, et découvrit ainsi la polarisation circulaire et elliptique, qu'on retrouva plus tard dans d'autres circonstances.

La discussion attentive des formules et l'interprétation des imaginaires qu'elles renferment, conduisirent Fresnel à une formule qui représente la différence de phase des deux rayons, suivant l'incidence. Cette formule indique, ce qui est conforme à l'expérience, que la différence est nulle quand l'angle d'incidence est égal à l'angle limite, ou égal à 90° . Entre ces deux termes, la différence varie d'une manière continue, et passe par un *maximum* qui, pour le verre de Saint-Gobain, est sensiblement égal à $\frac{1}{8} \lambda$, et correspond à l'incidence de $54^\circ 30'$. Deux réflexions successives donneront donc une différence de marche de $\frac{1}{4} \lambda$, et, si le plan d'incidence fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, le rayon sera polarisé circulairement.

3100. Parallépipèdes de Fresnel. — Fresnel a vérifié ce résultat au

moyen d'un parallépipède en verre de Saint-Gobain mn (fig. 2100), dont les arêtes sont un angle de $54^{\circ} 30'$ avec la base, et dans lequel le rayon s , polarisé dans l'azimut de 45° , subit deux réflexions totales en m et n , en entrant et

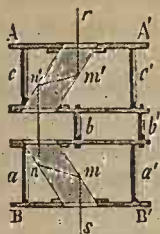


Fig. 2100.

sortant normalement. Ce rayon présente tous les caractères d'un polarisé circulaire. Si on le fait réfléchir deux autres fois dans un second prisme $m'n'$ pareil au premier, un nouveau retard de $\frac{1}{4} \lambda$ se produit entre les deux rayons composants, le retard total est de $\frac{1}{2} \lambda$, les nœuds coïncident, et le rayon émergent r est restauré dans un plan à 45° du plan d'incidence dans le second prisme, quelle que soit la position de ce plan d'incidence par rapport à celui du premier prisme. Pour vérifier ce point, les prismes sont disposés comme on le voit dans la figure; leurs montures peuvent se déplacer, en changeant de trous les tiges b, b' ,

de manière à faire varier l'angle des sections principales. On peut aussi séparer les deux prismes pour examiner le faisceau qui n'a subi que deux réflexions.

Fresnel a aussi calculé l'incidence qui donne les différences $\frac{1}{4} \lambda$ après trois et quatre réflexions, et les résultats de l'expérience se sont trouvés d'accord avec ceux de la théorie.

En ne dépassant pas deux réflexions, et faisant varier l'angle d'incidence, de l'angle limite à $54^{\circ} 30'$, on obtient toutes les différences de marche comprise entre 0 et $\frac{1}{2} \lambda$; et par conséquent des rayons elliptiques présentant tous les degrés d'ellipticité entre les polarisations rectiligne et circulaire.

On voit que l'un des parallépipèdes de Fresnel forme un *polariscope circulaire*, et que ce polariscope indique le sens du rayon; car, si le plan de polarisation, après la restauration, forme un angle de 45° à droite du plan d'incidence, le circulaire est dextrorsum; il est sinistrorsum si l'angle de 45° est formé à gauche.

On voit que l'un des parallépipèdes de Fresnel forme un *polariscope circulaire*, et que ce polariscope indique le sens du rayon; car, si le plan de polarisation, après la restauration, forme un angle de 45° à droite du plan d'incidence, le circulaire est dextrorsum; il est sinistrorsum si l'angle de 45° est formé à gauche.

3101. Expériences de M. Jamin.

— M. Jamin s'est proposé de compléter et d'étendre les expériences de Fresnel,

et il a pu comparer les résultats qu'il a obtenus à ceux des formules nouvelles trouvées par Cauchy. Il s'est servi de prismes de verre travaillés depuis longtemps; et ayant perdu cette sorte de trempe superficielle que communique au verre la pression qu'il subit pendant qu'on le polit¹.

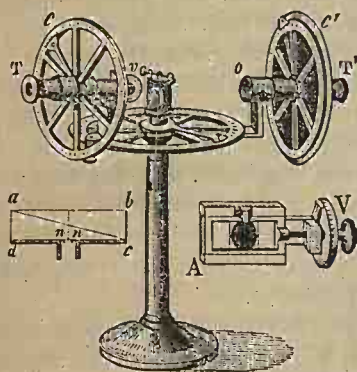


Fig. 2401.

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXX, p. 257.

La figure 2101 représente l'appareil employé dans ces nouvelles expériences. La partie principale consiste en un goniomètre de Babinet (2447) dont les collimateurs sont remplacés par des tubes Tv, oT' contenant des prismes de Nicol qu'on peut faire tourner sur eux-mêmes de quantités angulaires mesurées sur des cercles gradués c, c' . Sur la plate-forme centrale de l'appareil, se fixe la pièce sur laquelle la lumière polarisée doit se réfléchir. Cette lumière, avant d'arriver au polariscope, traverse un compensateur de Babinet (3098) placé en v , figuré à part en AV, et dont on voit la coupe en abd .

Voici comment cet appareil a été appliqué à l'étude de la réflexion totale : le rayon polarisé en T (fig. 2101) dans l'azimut de 45° se décompose par réflexion totale sur la face hypoténuse d'un prisme BAC (fig. 2102), et forme un rayon elliptique que l'on restaure au moyen du compensateur, en faisant produire à ce dernier une différence de marche égale et de signe contraire à celle des rayons qu'il reçoit. Le cercle gradué horizontal (fig. 2101) fait alors connaître l'incidence sur la face d'entrée, et l'on en déduit l'angle de réflexion totale, l'indice de réfraction étant connu.

Une partie de la différence de marche pouvant être due aux deux réfractions, et à des défauts d'homogénéité de la substance, on évalue cette partie en appliquant sur le prisme BAC une portion BDC du même prisme coupé en deux perpendiculairement à ses arêtes, de manière à constituer un parallépipède rectangle. Les surfaces sont réunies par de l'essence de cassia mêlée d'une quantité de térébenthine convenable pour donner à ce mastic le même indice que le verre. Le rayon suit alors la route $smIn'e'$, en restant soumis à toutes les mêmes causes de retard que le rayon $smIne$; on mesure la différence de marche au moyen du compensateur, et on la retranche de celle qu'on avait trouvée pour le rayon $smIne$.

Pendant que se faisaient ces expériences, Cauchy reprenait la théorie de la réflexion totale, plus généralement que Fresnel, reconnaissait, comme ce dernier, que toute la lumière est réfléchie, et exprimait la différence de phase d , en appelant I l'angle limite, par la formule

$$\frac{\tan \frac{1}{2} d}{\cos i} = \varepsilon + \frac{\sin^{\frac{1}{2}}(i - I) \sin^{\frac{1}{2}}(i + I)}{\sin^2 I},$$

dans laquelle ε est une constante qu'il nomme *coefficient d'ellipticité*. — Les expériences faites, de l'incidence de 40° à celle de 83° , ont donné des résultats d'accord avec cette formule, et aussi avec celle de Fresnel, qui n'en diffère que par l'absence du terme ε qui est excessivement petit pour le verre.

3102. II. POLARISATION ELLIPTIQUE DANS LA RÉFLEXION MÉTALLIQUE. — Malus avait annoncé d'abord que la lumière réfléchie par les métaux n'était pas polarisée, et il trouva plus tard qu'elle semblait polarisée dans différents plans. On remarqua ensuite que la réflexion métallique paraissait *dépolariser* la lumière préalablement polarisée. Brewster, en 1815, étudia la question en détail par

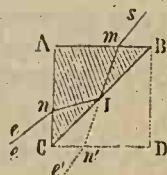


Fig. 2102.

l'expérience, et découvrit de son côté la polarisation dans différents plans. Il faisait réfléchir la lumière entre deux lames de métal parallèles, dont il changeait la distance, de manière à faire varier le nombre de réflexions qu'un rayon éprouvait sous une incidence donnée, avant de les quitter. Voici les principales lois auxquelles il est arrivé :

1° La lumière *naturelle*, réfléchi sur les métaux, est polarisée plus fortement dans le plan d'incidence que dans tout autre plan. L'excès de la quantité polarisée dans ce plan, sur celle qui l'est dans le second azimut, varie avec les métaux suivant l'ordre de la liste ci-dessous, le plus faible correspondant à l'argent. Cet excès augmente aussi avec le nombre de réflexions et avec l'angle d'incidence. Sous l'incidence de 75°, la lumière d'une bougie, placée à 3^m de distance, était entièrement polarisée après 36 réflexions sur l'argent poli, et 8, sur l'acier.

2° Un rayon *polarisé* dans l'un des azimuts principaux, reste polarisé dans cet azimut après la réflexion métallique.

3° Quand les rayons sont polarisés dans l'azimut de 45°, il y a une incidence, variable avec les métaux, pour laquelle le rayon, réfléchi un *nombre impair* de fois, présente tous les caractères de la polarisation circulaire. Cet angle est, pour les métaux suivants :

argent	or	étain	cuivre	mercure	platine	zinc	acier	cobalt	plomb
39° 48'	35°	32°	29°	26°	22°	19°	17°	12° 30'	11°

Quand les incidences sont différentes, ou les azimuts de polarisation autres que 45°, le rayon réfléchi présente la polarisation *elliptique*.

4° Le rayon polarisé circulairement est *restauré*, c'est-à-dire ramené à la polarisation rectiligne, par un nombre pair de réflexions sous la même incidence sur le même métal, et il est à remarquer que l'angle des plans de réflexion, dans les deux transformations, peut être quelconque.

5° Mais si l'angle d'incidence avec lequel s'est faite la première transformation, n'est pas celui de la polarisation circulaire, l'angle d'incidence nécessaire pour restaurer le rayon après un nombre pair de réflexions, change avec l'angle des deux plans de réflexion, et varie comme les diamètres d'une ellipse. De là le nom de *polarisation elliptique* donné par Brewster à l'état des rayons réfléchis qu'on cherche à restaurer, mot auquel il n'attribuait pas le sens théorique que nous lui donnons aujourd'hui. Du reste, ces rayons se distinguent toujours par les couleurs qu'ils donnent dans le polariscope. Ces couleurs, au *maximum* dans l'azimut de 45°, disparaissent dans les azimuts principaux, et dépendent de l'angle d'incidence.

Malgré l'importance des expériences de Brewster, l'étude de la réflexion métallique était loin d'être complète; elle n'avait été faite qu'au point de vue expérimental, et plusieurs lois restaient à trouver. De Sénarmont a fait des recherches étendues sur le même sujet¹, et a publié un très-grand nombre de

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

résultats numériques obtenus avec divers métaux. Il établit qu'un rayon polarisé dans un azimut quelconque, se décompose en deux autres polarisés dans les azimuts principaux; ce qui conduit à étudier les effets de la réflexion métallique sur ces deux espèces de rayons; et comme, d'après Brewster, le plan de polarisation de semblables rayons ne change pas pendant la réflexion, les modifications qu'ils subissent ne peuvent être que des variations d'intensité ou des changements de phases. On est donc amené à étudier les intensités et les phases des rayons réfléchis polarisés dans les azimuts principaux. C'est aussi la marche qu'a suivie M. Jamin dans un grand travail sur la réflexion métallique.

3103. Expériences de M. Jamin ¹. — Ces expériences ont été faites au moyen de l'appareil (*fig.* 2101).

Mesure des intensités des rayons réfléchis. — Pour étudier les intensités des rayons polarisés dans les azimuts principaux, après leur réflexion sur une lame métallique, on la fixe bien verticalement au centre de l'appareil, juxtaposée à une lame de verre, de manière que les surfaces polies de métal et de verre soient bien exactement dans le même plan. Le faisceau polarisé tombant sur le double miroir, une partie est réfléchi par le verre, et l'autre par le métal, et l'on compare les quantités de lumière réfléchies par le métal et par le verre, celle-ci étant calculée au moyen des formules de Fresnel. Quand l'analyseur à sa section principale horizontale ou verticale, il ne donne qu'une seule image pour chaque demi-faisceau. Si on le fait tourner ensuite d'une quantité β , on obtient deux images de chaque demi-faisceau. Soit J^2 l'intensité des rayons polarisés dans le premier azimut et réfléchis par le métal, et J'^2 l'intensité des mêmes rayons réfléchis par le verre; les intensités des quatre faisceaux sortant de l'analyseur seront, pour les rayons ordinaires $J^2 \cos^2 \beta$ et $J'^2 \cos^2 \beta$; et pour les rayons extraordinaires, $J^2 \sin^2 \beta$ et $J'^2 \sin^2 \beta$. Si l'on fait varier β , on trouve une position de l'analyseur pour laquelle l'image ordinaire du métal est égale à l'image extraordinaire du verre. On a alors $J^2 \cos^2 \beta = J'^2 \sin^2 \beta$. Or, d'après la formule de Fresnel (2981), J^2 est égal à $\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$; on a donc $J^2 = \tan^2 \beta \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$. On pourrait de même chercher la valeur β' qui rend l'image extraordinaire du métal égale à l'image ordinaire du verre, et l'on aurait $J^2 = \cos^2 \beta' \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$. Les angles β et β' sont complémentaires, et se mesurent sur le limbe *c* (*fig.* 2101).

La même méthode s'applique à la lumière incidente polarisée dans le second azimut, et l'intensité I^2 du rayon réfléchi par le métal, est donnée (2982) par la formule $I^2 = \tan^2 \beta \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)}$; seulement les expériences ne sont pas possibles pour les incidences très-voisines de l'angle de polarisation sur le verre, la réflexion étant alors nulle ou peu sensible.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XIX, p. 296.

Les expériences étaient faites dans l'obscurité, sur la lumière d'une lampe Carcel, rendue parallèle par une lentille. La valeur de i se mesurait sur le cercle horizontal, et r s'en déduisait au moyen de l'indice du verre.

Ces expériences, faites sur l'acier, le métal des miroirs et le cuivre, ont prouvé que l'intensité des rayons réfléchis polarisés dans le plan d'incidence, varie peu et va en diminuant, de 90° à 0° . Quand les rayons sont polarisés dans le second azimut, l'intensité diminue, de 90° à l'angle de polarisation *maximum*, et augmente ensuite jusqu'à l'incidence normale.

Les nombres obtenus se sont trouvés d'accord, autant qu'on pouvait le désirer, avec ceux que donnent les formules nouvelles de Cauchy, exprimant les intensités des rayons réfléchis par les corps opaques.

310-1. Différences de phase. — Voici d'abord comment M. Jamin prouve l'existence d'une différence de phase, après la réflexion métallique, entre deux rayons polarisés dans les azimuts principaux.

1° On choisit une lame de sulfate de chaux donnant la teinte sensible dans la lumière polarisée; on place son axe parallèlement au plan d'incidence des rayons solaires réfléchis par le métal, rayons qui sont polarisés dans un azimut voisin de 90° . S'il ne s'établissait pas de différence de phase entre les rayons composants polarisés dans les azimuts principaux, la teinte de la lame resterait la même, l'azimut seul changerait. Mais l'on voit que la teinte est modifiée. On en conclut que, à la différence de marche produite par la lame, vient s'en ajouter une autre, due à la réflexion, et qui augmente, de l'incidence normale à l'incidence rasante, comme l'indiquent les variations de teinte. Cette méthode peut servir à prouver l'existence d'une différence de marche dans le cas de la réflexion totale.

2° La seconde méthode s'applique aux couches minces d'oxyde déposées sur les métaux¹. M. Jamin a opéré sur l'acier coloré par l'oxyde qui se produit pendant le recuit, et sur des lames de maillechort recouvertes d'oxyde de plomb par le procédé de Becquerel (III, 2030). Ces lames présentaient des séries de franges parallèles, dont les couleurs dépendaient de l'épaisseur de l'oxyde déposé. Les épaisseurs aux différents points, étaient mesurées directement, et représentées par une courbe. En opérant d'abord sous diverses incidences, avec de la lumière simple polarisée dans le second azimut, on a vérifié la formule $e' = e : \cos r$, qui donne le rapport des épaisseurs e , e' , produisant une même frange, pour l'incidence normale et pour l'incidence dont l'angle de réfraction est r dans la couche d'oxyde (2919)².

Il n'en est plus de même quand la lumière est polarisée dans le plan d'inci-

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXI, p. 430.

² Pour connaître l'angle r d'après l'angle d'incidence donné, il faut connaître l'indice de réfraction de la couche d'oxyde. Cet indice se détermine en cherchant l'incidence d'un rayon polarisé dans l'azimut 0° , qui donne les franges les moins marquées. L'indice de réfraction se déduit alors de la formule $\tan i = n$ (2965).

dence; les positions d'une frange donnée ne sont plus les mêmes qu'avec le rayon polarisé dans le second azimut. On en conclut qu'il se produit dans la réflexion un retard qui s'ajoute à celui qui provient de la différence des chemins parcourus. Ces chemins, pour une même frange noire, étant $2E \cos r$, et $2e \cos r$, pour les rayons polarisés dans le plan d'incidence et dans l'azimut de 90° sous la même incidence, $2(E - e) \cos r$ sera la différence de phase due à l'action seule de la réflexion; et il suffira, pour la connaître, de mesurer r et les épaisseurs E et e . On a trouvé ainsi que la différence de phase due à la réflexion, est nulle pour l'incidence normale; que le rayon polarisé dans l'azimut de 90° est ensuite d'autant plus en retard sur l'autre, que l'angle d'incidence est plus grand; et que le retard devient $\frac{1}{4} \lambda$ sous l'angle de polarisation, et $\frac{1}{2} \lambda$ sous l'incidence rasante.

Cette dernière méthode ne peut s'appliquer aux métaux; mais Brewster ayant trouvé que les métaux et les oxydes agissent de la même manière sur la lumière polarisée, et d'un autre côté, deux réflexions sur une surface métallique sous l'incidence de la polarisation *maximum* restaurant le rayon (3102), ce qui indique une différence de phase de $\frac{1}{2} \lambda$, entre les deux rayons composants, ou de $\frac{1}{4} \lambda$ à chaque réflexion comme pour les oxydes, on est autorisé à étendre aux métaux les résultats donnés par les minces couches d'oxyde.

3105. Évaluation des différences de phase. — On fait réfléchir le rayon polarisé dans un azimut quelconque, plusieurs fois entre deux miroirs parallèles et de même métal; les plans de polarisation des rayons composants polarisés dans les azimuts principaux ne changent pas, et la différence de phase augmentant de la même quantité à chaque réflexion, elle sera, après m réflexions, égale à m fois la différence produite par une seule. Or, d'après Brewster, après un certain nombre de réflexions, la polarisation devient rectiligne; en divisant donc la différence de phase correspondante, par le nombre de réflexions, on aura celle qui serait engendrée par une seule, différence qui donne une polarisation elliptique. L'expérience montre que, pour chaque nombre m de réflexions, il y a plusieurs angles d'incidence donnant la polarisation rectiligne, et leur nombre est $m - 1$.

La polarisation rectiligne ayant lieu toutes les fois que la différence de phase est un multiple entier de $\frac{1}{2} \lambda$, il faut d'abord connaître ce multiple. Or, la différence de phase augmentant avec l'incidence, la plus petite incidence qui rétablira la polarisation rectiligne après m réflexions, donnera, pour cette différence, le plus petit multiple, ou $\frac{1}{2} \lambda$. Pour les angles plus grands rétablissant également la polarisation rectiligne, les multiples seront $2 \frac{1}{2} \lambda$, $3 \frac{1}{2} \lambda$, ... $(m - 1) \frac{1}{2} \lambda$. Les différences de phase produites dans chaque réflexion, seront alors $\frac{1}{m} \frac{\lambda}{2}$, $\frac{2}{m} \frac{\lambda}{2}$, ... $\frac{m-1}{m} \frac{\lambda}{2}$. On voit que, si l'on fait varier le nombre de réflexions, la même valeur du coefficient de $\frac{1}{2} \lambda$ se produira souvent. Par exemple, après 2, 4, 6, ... réflexions, ce coefficient prendra les valeurs égales $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, ... , et les angles de polarisation rétablie seront égaux; ce qui fournit

de nombreuses vérifications. On voit aussi que les résultats sont indépendants de l'azimut de polarisation du rayon incident, pourvu que ce ne soit pas un des azimuts principaux.

Les deux miroirs égaux étaient placés au centre de l'appareil (*fig.* 2101) : l'un, fixe, passait par le centre; l'autre pouvait se déplacer parallèlement à lui-même au moyen d'une vis micrométrique, et le nombre des réflexions dépendait de leur distance. Le rayon réfléchi ne passant pas par le centre de l'appareil, on faisait tourner dans un plan horizontal, le tube contenant l'analyseur, de manière que le rayon le traversât toujours suivant son axe.

3106. Comparaisons avec la théorie. — Cauchy et M. Mac-Cullagh ont trouvé, chacun de leur côté, des formules presque identiques pour représenter les phénomènes de la réflexion métallique. Le premier a trouvé, pour la différence de phase, δ , de deux rayons de même phase avant la réflexion, et polarisés dans les azimuts 0 et 90°, la formule $\text{tang } \delta = \text{tang } 2\omega \sin u$, dans laquelle ω se calcule au moyen de l'expression $\text{tang } \omega = \frac{U \cos i}{\sin^2 i}$; u et U sont des variables liées à i et à certaines constantes, par des relations établies par Cauchy. Cette formule a été vérifiée par M. Jamin.

Le même physicien a entrepris beaucoup d'autres vérifications, dont nous citerons quelques-unes. Nous avons vu que la lumière polarisée dans un plan se transforme généralement en un faisceau elliptique, quand elle se réfléchit sur un métal. Les formules de Cauchy permettent de calculer le rapport des axes de l'ellipse et leur direction. Pour vérifier ces formules, M. Jamin cherche la direction des axes, en partant des deux principes suivants, qu'il démontre par l'analyse : 1° quand un faisceau elliptique traverse un prisme biréfringent dont la section principale est parallèle à l'un des axes de l'ellipse, il se décompose en deux rayons dont les phases diffèrent de $\frac{1}{2}\lambda$, et dont l'un a la plus grande, et l'autre la plus petite intensité possible; 2° si la section principale de l'analyseur fait un angle de 45° avec les axes de l'ellipse, les images sont égales. On pourra donc chercher la position du prisme qui donne les deux images les plus inégales; l'azimut dans lequel l'image extraordinaire sera *minimum* contiendra le petit axe, et le rapport des intensités des images sera égal au carré du rapport de longueur des deux axes. — Il vaut mieux chercher à obtenir les deux images égales, ce qui a lieu pour quatre positions de l'analyseur, dont la section principale est alors à 45° des axes cherchés. C'est ainsi qu'a procédé M. Jamin; il opérait avec de la lumière rouge simple, et a trouvé des résultats d'accord avec ceux de la théorie.

3107. De la couleur des métaux. — En partant de la théorie de la réflexion métallique, M. Jamin a trouvé l'explication des couleurs que présente la lumière réfléchie par les métaux polis¹. Remarquons d'abord que l'intensité de la lumière réfléchie par les corps non métalliques, dépendant de l'indice de

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXII, p. 311.

réfraction (2983), cette intensité est différente sous la même incidence, pour les diverses couleurs ; la lumière blanche devrait donc être colorée après la réflexion ; et s'il n'en est pas ainsi, c'est que les différences entre les indices sont très-petites. Dans le cas des métaux, les intensités sont calculées au moyen des formules de Cauchy, qui contiennent deux constantes : la première, qui ne dépend que de la différence de phase, est l'incidence qui rétablit la polarisation rectiligne après deux réflexions sur des lames parallèles ; la seconde, qui ne dépend que du rapport des intensités des rayons composants polarisés dans les azimuts principaux, est l'azimut du plan de polarisation sous cette incidence, quand l'azimut de polarisation primitive est de 45° . M. Jamin a mesuré les valeurs de ces constantes pour les différents rayons du spectre, et est arrivé aux lois suivantes :

1^o L'incidence qui rétablit la polarisation rectiligne, et qui est celle du *maximum* de polarisation, va en diminuant du rouge au violet, pour tous les métaux et alliages observés. Il est à remarquer que, pour les corps non métalliques, cet angle varie en sens opposé. — 2^o L'azimut du plan de polarisation rétablie diminue du rouge au violet, pour une classe de métaux comprenant l'argent, le cuivre, le laiton, l'alliage des cloches. Les différences pour les couleurs extrêmes sont de $50'$ pour l'argent, et de $7^\circ 12'$ pour l'alliage des cloches. — 3^o L'azimut augmente, au contraire, du rouge au violet, pour une autre classe comprenant le zinc et l'acier. — 4^o Pour le métal des miroirs, les azimuts diminuent du rouge au vert, et augmentent, du vert au violet.

Les valeurs des constantes une fois déterminées, M. Jamin les a portées dans les formules de Cauchy, pour calculer les intensités des rayons réfléchis de chaque couleur composant la lumière blanche, et en conclure la teinte du faisceau réfléchi. Voici les résultats généraux auxquels il est arrivé :

1^o Sous l'incidence rasante, tous les métaux polis sont absolument blancs. — 2^o Tous les métaux de la première classe, ainsi que le métal des miroirs, se colorent des teintes les moins réfrangibles, et sont rouges après un nombre suffisant de réflexions. — 3^o Les métaux de la 2^e classe, pouvant offrir toutes les couleurs du spectre, sont le plus souvent blancs. — 4^o La teinte de plusieurs métaux a été calculée et trouvée identique à celle que donne l'expérience.

3108. Appareils d'expérience. — Pour répéter les expériences sur la polarisation elliptique par réflexion métallique, on peut se servir de l'appareil de Norremberg, dont on remplace l'analyseur ordinaire par un tube oblique contenant un miroir d'argent incliné de 18° sur l'axe de l'instrument et réfléchissant les rayons dans un nicol.

Wheatstone a fait construire par M. Dubosq, dès 1852, un appareil spécial à miroir d'argent, représenté (*fig.* 2103) et ressemblant à un appareil de Norremberg dont les deux montants sont articulés en deux points, vers le bas. La lumière, polarisée par un miroir de verre noir placé sur le socle de l'instrument, entre les deux montants, est renvoyée à travers l'ouverture d'un diaphragme circulaire, au-dessus duquel est un porte-cristal. Un miroir d'argent

incliné de 18° sur les rayons polarisés réfléchis, leur imprime la polarisation elliptique; ces rayons traversent ensuite un second porte-cristal, et pénètrent dans l'analyseur supérieur. Le diaphragme inférieur est composé de deux parties annulaires, dont l'intérieure est mobile sur elle-même, et porte tout le système qu'on peut faire tourner le miroir d'argent autour du rayon polarisé réfléchi par le miroir de verre noir. — En redressant l'appareil, remplaçant ce miroir par une glace étamée, et le miroir d'argent par une simple glace, on obtient la disposition de l'appareil de Norremberg ordinaire.

3109. Réflexion métallique des rayons calorifiques polarisés. — M. L. Monton a retrouvé les lois de la réflexion métallique sur les rayons de chaleur obscure polarisés¹. Ses recherches ont surtout porté sur la mesure, sous les diverses incidences, de la différence de phase $d : \lambda$; et du rapport $I : J$, pour trois lon-

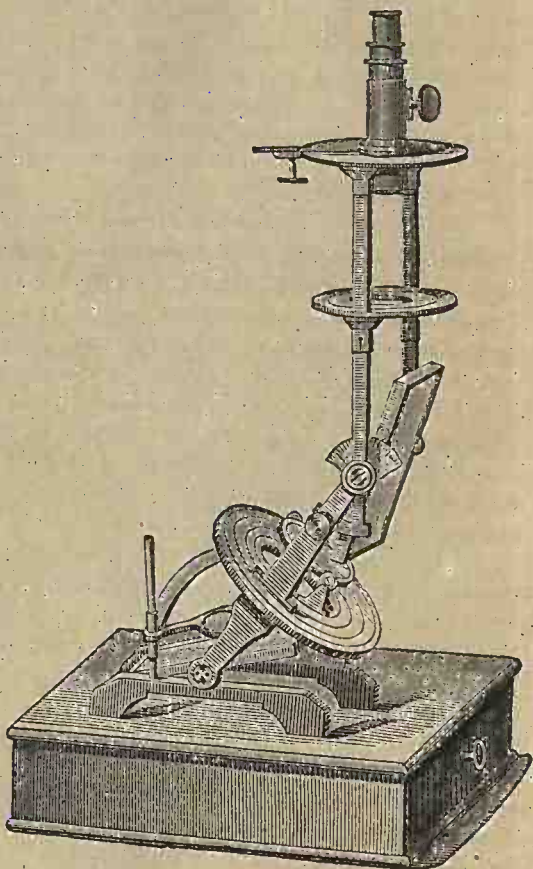


Fig. 2103.

gueurs d'onde, réparties dans la partie obscure, et dont la valeur était $0^{\text{mm}}0010$; $0,0014$; $0,0018$. La source de chaleur était une lampe de MM. Bourbouze et Wiesnegg, dans laquelle une flamme de gaz, alimentée par un courant d'air constant, maintient au rouge blanc une calotte de fils de platine. Les rayons sont polarisés par un gros prisme biréfringent achromatisé, placé dans une

¹ *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. XIII, p. 229.

autre chambre que la lampe, et qui envoie le faisceau extraordinaire à travers une fente suivie d'une lentille. Ce faisceau rencontre le miroir métallique pouvant tourner au centre d'un cercle gradué, est réfléchi, et traverse un prisme de flint qui lui fait subir la dispersion, puis est reçu par un gros prisme analyseur. On obtient ainsi deux spectres, dont l'ordinaire, qui ne se déplace pas quand on fait tourner l'analyseur, est reçu par la pile linéaire d'un thermomultiplicateur. Les principales expériences ont été faites sur l'acier, le métal des miroirs et le verre platiné. La différence de phase ne devenait sensible qu'à partir de l'incidence de 60° , pour les rayons obscurs les moins réfringibles.

II. Polarisation elliptique dans la réflexion sur les corps transparents.

3110. La plupart des corps transparents ne polarisent que partiellement la lumière par réflexion, même sous l'angle de polarisation. Si l'on a cru longtemps le contraire, c'est qu'on employait la lumière assez faible des nuées, au lieu de rayons solaires, avec lesquels on saisit, en outre, facilement le *minimum* d'éclat, à cause de la grande vivacité que prend rapidement la lumière dès qu'on s'écarte des conditions de ce *minimum*.

Quand la lumière incidente est polarisée, il se produit une *dépolarisation* partielle, et M. Jamin prouve que la lumière réfléchie possède alors la polarisation elliptique ¹, et qu'un rayon polarisé dans un azimut voisin de 90° , se décompose en deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et en retard l'un sur l'autre. Il se servait, comme pour les métaux (3104), d'une lame de sulfate de chaux donnant la teinte sensible, et constatait que cette teinte varie de $\frac{1}{4}\lambda$, de l'incidence rasante à l'angle de polarisation, au-delà duquel elle continue de descendre.

Mesure de la différence de phase. — Cette mesure s'effectue au moyen du *compensateur* (3098). Supposons que l'axe du prisme mobile *abc* (fig. 2101) soit horizontal, et que, pour restaurer le rayon, il faille augmenter l'épaisseur de ce prisme entre les fils *n*, *n*. Le quartz étant positif, le rayon ordinaire, polarisé horizontalement dans le plan d'incidence, aura une vitesse plus grande que le rayon extraordinaire, polarisé perpendiculairement à ce plan. La différence de marche sera alors prise *positivement*. Quand le prisme mobile devra être retiré en sens contraire, la différence sera *negative*.

Cela posé, quand le compensateur donnera une différence de marche *a* pour restaurer le rayon, la différence *x* produite par la réflexion sera telle que l'on ait $x + a = \pm n \frac{1}{2} \lambda$; *n* étant un facteur entier qu'il s'agit de trouver. Or, l'expérience montre que la lumière polarisée dans l'azimut de 45° reste polarisée, après la réflexion, sous l'incidence normale et sous l'incidence rasante, et même assez loin de ces limites en se rapprochant du *maximum* de polarisation. Dans

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXIX, p. 263.

le premier cas, le rayon réfléchi est polarisé dans l'azimut de -45° ; il faut donc que le sens de la vibration dans un des rayons composants ait changé de signe, ce qui suppose un changement de phase de $\frac{1}{2}\lambda$. Dans le cas d'incidence rasante, l'azimut du rayon réfléchi reste à 45° . Le changement de phase est donc nul ou égal à λ ; et l'on admet la dernière valeur, le changement allant en augmentant à partir de l'incidence normale. Maintenant, quand on emploiera le compensateur, qui apporte une différence de phase comprise entre 0 et $\frac{1}{2}\lambda$, $x + a$ sera compris entre 0 et $\frac{3}{2}\lambda$. En dehors des incidences extrêmes, cette somme ne pourra donc être, quand le rayon sera restauré, que $\frac{1}{2}\lambda$ ou $\frac{3}{2}\lambda$. Si la somme est $\frac{1}{2}\lambda$, l'une des composantes du rayon polarisé sortant du compensateur aura changé de signe, et le plan de polarisation sera dans un autre quadrant que celui du rayon incident. Si $x + a = \frac{3}{2}\lambda$, il n'y aura pas de changement de quadrant.

On a trouvé, par cette méthode, que la différence de phase des deux composantes, augmente de $\frac{1}{2}\lambda$ à λ , depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante, et prend la valeur $\frac{3}{4}\lambda$ sous l'angle de polarisation.

Application à la détermination de l'angle de polarisation. — Ce dernier résultat peut servir à trouver l'angle de polarisation, d'une manière bien plus précise que par le moyen ordinaire : on dispose le compensateur, de manière qu'il produise la différence de marche de $\frac{3}{4}\lambda$, et l'on fait varier l'incidence jusqu'à ce que la frange de polarisation rétablie se place entre les fils. Comme, dans le voisinage de l'angle de polarisation, les moindres variations de l'incidence produisent un grand changement dans la différence de phase, la détermination est très-précise.

Mesure du rapport des intensités des composantes réfléchies. — Soit α l'azimut du plan de polarisation du rayon incident, dont l'intensité est 1. Ce rayon peut se remplacer par deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et ayant pour intensités, $\cos \alpha$ et $\sin \alpha$. Ces intensités sont modifiées par la réflexion, et deviennent $I \cos \alpha$ et $J \sin \alpha$, et il faut déterminer le rapport $J : I$. Pour cela, il suffit de chercher, avec l'analyseur, l'azimut β du rayon restauré par le compensateur, qui n'apporte aucun changement à ces intensités et ne fait que modifier la différence de phase. D'après la règle du parallélogramme des vitesses, on aura alors

$$\operatorname{tang} \beta = \frac{J \sin \alpha}{I \cos \alpha}; \quad \text{d'où} \quad \frac{J}{I} = \frac{\operatorname{tang} \beta}{\operatorname{tang} \alpha}.$$

En prenant α très-grand, l'erreur commise en mesurant β est insensible dans le résultat. Par exemple, si $\alpha = 84^\circ$, d'où $\operatorname{tang} \alpha = 9,504$, une erreur même de 4° dans β , n'altérerait que de 0,007 le rapport $J : I$.

Expériences sur les liquides. — Les expériences sur les liquides ont exigé un instrument spécial. Le cercle horizontal de l'appareil (fig. 2101) est remplacé par un demi-cercle vertical fixé à une petite table à vis calantes, et sur lequel se meuvent des tubes avec cercles gradués, portant, l'un l'analyseur

et le compensateur, l'autre, le polariseur et un petit miroir métallique destiné à renvoyer les rayons solaires suivant son axe. Au centre du demi-cercle vertical, est placé un petit vase en verre noir contenant le liquide.

3111. Lois et résultats généraux. — Voici les résultats généraux déduits d'expériences nombreuses faites sur une centaine de substances, tant solides que liquides :

1° Presque toutes les substances solides et liquides polarisent incomplètement, par réflexion, la lumière naturelle ; et, quand la lumière incidente est polarisée d'avance dans un plan, elle reçoit la polarisation elliptique. — 2° Les substances qui, comme l'opale, le diamant et surtout les métaux ont un indice de réfraction supérieur à 1,4, avancent la phase du rayon composant polarisé dans le plan d'incidence ; elles sont dites *positives*. Les substances, comme l'hyalite, la fluorine, dont l'indice est inférieur à 1,4, sont dites *negatives* ; elles retardent la phase de ce rayon. Enfin, les substances dont l'indice diffère très-peu de 1,4, ne donnent ni avance ni retard relatif aux deux rayons composants, et elles sont capables de polariser complètement la lumière. M. Jamin n'a trouvé que deux substances dans ce cas : la première est un échantillon de ménilite ; la seconde, un cristal d'alun taillé perpendiculairement à l'axe de l'octaèdre. L'indice du crown, 1,48, s'éloigne peu de 1,4 ; aussi polarise-t-il presque complètement. — 3° La différence de phase augmente avec l'incidence, depuis $\frac{1}{2}\lambda$ jusqu'à λ , et prend la valeur de $\frac{3}{2}\lambda$, pour l'angle de polarisation *maximum*. Mais ce n'est que dans le voisinage de ce dernier angle, que les variations sont sensibles, et entre deux limites d'autant plus rapprochées, que la lumière est polarisée en plus grande quantité sous l'angle de polarisation *maximum*, ou que l'indice se rapproche davantage de 1,4. En dehors de ces limites, la polarisation est *rectiligne*, quoique incomplète, et en dedans, elle est *elliptique*. Les limites se confondent quand l'indice de réfraction est égal à 1,4 ; alors, il n'y a plus de polarisation elliptique ; la polarisation est complète sous une certaine incidence, et la différence de phase passe brusquement de $\frac{1}{2}\lambda$ à λ , sous l'angle de polarisation. C'est là le cas représenté par les formules de Fresnel, et que l'on supposait être le cas général. Chez les métaux, les variations dans la différence de phase sont sensibles depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante ; aussi le rayon réfléchi possède-t-il toujours la polarisation elliptique. — 4° Quand on superpose deux substances, la réflexion à leur surface de séparation suit les mêmes lois. Les expériences ont été faites sur des lames solides plongées dans des liquides.

Formules de Cauchy. — Longtemps avant ces expériences, Cauchy avait calculé, sans faire aucune hypothèse, des formules représentant la différence de phase et le rapport des intensités des rayons composants polarisés dans les azimuts principaux après leur réflexion sur les substances transparentes. Ces formules ne dépendent pas seulement de l'indice de réfraction, mais encore d'une autre constante ε , nommée *coefficient d'ellipticité*, et que Cauchy croyait nulle, excepté pour quelques substances à très-grand pouvoir réfringent, comme

le diamant, le soufre. Il résulte des nouvelles expériences, que ε n'est, au contraire, nul que pour les corps en très-petit nombre qui polarisent complètement la lumière, et que la différence de phase est tantôt positive, tantôt négative, ce que les formules n'indiquent pas. Les nombreuses comparaisons faites par M. Jamin montrent que les formules représentent les phénomènes avec une exactitude remarquable. Voici ces formules :

$$\frac{J^2}{I^2} = \frac{\cos^2(i+r) + \varepsilon^2 \sin^2 i \sin^2(i+r)}{\cos^2(i-r) + \varepsilon^2 \sin^2 i \sin^2(i-r)}; \quad \delta = \delta' + \delta'';$$

$$\text{tang } \delta' = \varepsilon \sin i \text{ tang } (i+r); \quad \text{tang } \delta'' = \varepsilon \sin i \text{ tang } (i-r).$$

δ est la différence de phase, et ε une quantité très-petite pour la plupart des matières non métalliques. Si l'on suppose ε nul, la valeur de δ est aussi nulle, et l'on a $\frac{J^2}{I^2} = \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)}$, qui est précisément la valeur que donnent les formules de Fresnel, pour le rapport des intensités de deux rayons polarisés dans les azimuts principaux (2981, 2982). Il n'est donc pas étonnant que les méthodes peu précises que l'on employait autrefois pour vérifier ces formules, aient conduit à une concordance satisfaisante pour le plus grand nombre des substances non métalliques, quoique ces formules ne s'appliquent rigoureusement qu'à celles qui sont susceptibles de polariser complètement par réflexion.

3112. Réflexion sur les cristaux biréfringents. — L'intensité des rayons réfléchis dépendant de celle des rayons réfractés, et celle-ci variant dans les milieux biréfringents, avec l'angle que font le plan d'incidence et la section principale, on conçoit que l'état du rayon réfléchi dépendra de la position du plan de réflexion par rapport à cette section. Cette question n'a été étudiée qu'après la découverte de la polarisation elliptique; Brewster, puis Seebeck, ont d'abord constaté le plus grand nombre des faits; puis, Mac-Cullagh, Newmann, de Sénarmont ont traité la question au point de vue théorique et expérimental. Voici quelques-unes des lois établies :

Considérons d'abord un rayon polarisé tombant normalement sur la surface d'un cristal. Si le plan de polarisation coïncide avec la section principale, le rayon réfléchi présente une intensité qui dépend du rayon réfracté ordinaire, et qui doit se calculer au moyen des formules de Fresnel (2981, 2982), en y portant l'indice ordinaire. — Si le plan de polarisation est perpendiculaire à la section principale, l'intensité du rayon réfléchi dépend de l'indice extraordinaire. — Si le plan de polarisation est oblique à la section principale, le rayon se décompose en deux autres, polarisés dans les azimuts principaux et qui donnent des rayons réfractés dont les intensités I et J, d'après ce qui vient d'être dit, sont différentes, de manière que le rayon résultant est polarisé dans un autre plan que le rayon incident, plan dont l'azimut β est donné par la formule $\text{tang } \beta = J : I$.

Il résulte de là qu'un faisceau neutre donnera de la lumière polarisée par réflexion sous l'incidence normale, sur un cristal biréfringent; car ce faisceau

peut être décomposé en deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et n'ayant pas la même intensité, les indices qui leur correspondent étant différents; le faisceau réfléchi sera donc partiellement polarisé. Cette conséquence, déduite par Babinet, se vérifie par l'expérience; par exemple, la proportion de lumière polarisée sous l'incidence normale sur une lame de spath d'Islande ou d'azotate de soude parallèles à l'axe, est de plus de $\frac{1}{5}$.

Quand, le rayon *n'étant plus normal* à la surface réfléchissante, le plan d'incidence coïncide avec la section principale, si le rayon est polarisé dans le premier ou dans le second azimut, l'intensité du rayon réfléchi est donnée par les formules de Fresnel; dans le premier cas, il faut employer l'indice de réfraction ordinaire, et dans le second, l'indice extraordinaire. — Si l'azimut est différent, on décompose le rayon en deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et on leur applique ce qui précède.

De Sénarmont a examiné beaucoup d'autres cas relatifs à la position du plan d'incidence par rapport à la section principale, à la direction de l'axe par rapport à la face réfléchissante, etc.¹ Ayant ensuite étudié la réflexion sur les cristaux doués de l'opacité métallique, comme le sulfure d'antimoine, il trouva que tous les phénomènes sont exactement calqués sur ceux qui se produisent dans la réflexion à la surface des corps cristallisés transparents; ce qui prouve l'existence de la *double réfraction* dans des cristaux essentiellement opaques, c'est-à-dire pour lesquels la lumière s'éteint à une profondeur imperceptible au-dessous de la surface réfléchissante.

3113. Réflexion métallique produite par des corps non métalliques. — Brewster a remarqué, vers 1846, que les cristaux de *chrysammate de potasse* réfléchissent de la lumière colorée ayant l'aspect de celle que réfléchissent les métaux polis, et changeant de nuance avec l'incidence. Cette lumière, analysée dans un polariscope biréfringent, se comporte comme si elle était formée d'un faisceau polarisé dans le plan d'incidence, dont la couleur bleu-pâle est indépendante de l'incidence, et d'un faisceau polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, et dont la nuance varie du jaune pur au violet pourpre quand on augmente l'angle d'incidence à partir de 0°. Haidinger a constaté des propriétés semblables dans un grand nombre d'autres substances². M. Stokes³ ayant remarqué que la *carthamine* est opaque pour la lumière verte, presque comme un métal, et qu'elle réfléchit *spéculairement* de la lumière colorée, composée d'un faisceau vert très-intense polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, et d'un faisceau polarisé dans ce plan et faiblement coloré, a eu l'idée de chercher si cette substance ne se rapprocherait pas, par ses propriétés optiques, des métaux, qui, polis, sont colorés par réflexion, contrairement aux corps transparents, qui ne donnent de couleurs que par réflexion

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

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLII, p. 249.

³ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLVI, p. 504.

diffuse (2593), et il a constaté que la carthamine se comporte comme matière transparente avec les rayons rouges, pour lesquels elle est transparente, et comme métal avec les rayons verts ou bleus. Ainsi, un faisceau polarisé par réflexion sur la carthamine, à 45° du plan d'incidence, et traversant un spath d'Islande perpendiculaire à l'axe, suivi d'un polariscope, donne des anneaux à croix noire, avec la lumière rouge; mais les anneaux sont déformés avec la lumière verte ou bleue, ce qui indique une polarisation elliptique aussi marquée que celle des métaux. Par ce procédé, trop peu sensible pour montrer la polarisation elliptique quand elle n'est pas de l'ordre de grandeur de celle des métaux, M. Stokes a reconnu qu'un assez grand nombre de substances sont ainsi transparentes pour certains rayons, et réfléchissent les autres à la manière des métaux. Le fer oligiste semble former la transition entre les métaux et les substances analogues à la carthamine; il communique à peine la polarisation elliptique aux rayons rouges, pour lesquels il est un peu transparent, et l'imprime aux autres d'une manière d'autant plus prononcée qu'ils sont plus réfrangibles; cette substance est donc comme imparfaitement métallique pour les rayons rouges, et semblable aux métaux, pour les autres rayons. On s'explique maintenant pourquoi le fer oligiste paraît bleu quand il réfléchit sous l'angle de polarisation, des rayons polarisés normalement au plan d'incidence, les rayons rouges manquant presque complètement.

III. Lumière polarisée dans la production des anneaux par les lames minces.

2114. Polarisation de la lumière des anneaux dans les lames minces. — Quand on observe les anneaux réfléchis formés entre deux lentilles (2006), à travers un prisme biréfringent simplement appliqué sur le verre supérieur et dont la section principale coïncide avec le plan d'incidence, on remarque deux images de ces anneaux. Sous l'incidence perpendiculaire, elles ont même intensité; si l'angle d'incidence augmente, l'image *extraordinaire* s'affaiblit, devient nulle sous l'angle de polarisation du verre, et reparait au delà, en augmentant d'intensité. Pendant ce temps-là, l'image *ordinaire* ne varie pas. Si la section principale du prisme est perpendiculaire au plan d'incidence, c'est l'image ordinaire qui change d'intensité. Ces phénomènes, observés par Arago¹, s'expliquent facilement par la polarisation dans le plan d'incidence, des rayons réfléchis qui produisent les anneaux; les rayons polarisés dans le second azimut de l'analyseur, sont d'autant plus affaiblis que le faisceau réfléchi est polarisé en plus grande proportion dans le plan d'incidence.

Les résultats sont les mêmes pour les anneaux transmis; ce qui montre qu'ils sont polarisés par les réflexions aux deux surfaces de la lame mince, et que cette polarisation l'emporte sur celle que produit la réfraction. Du reste, il n'y

¹ OEuvres d'Arago (*Mémoires scientifiques*), t. I. p. 5.

a de polarisés que les rayons qui ont éprouvé ces réflexions sur les deux surfaces, car un objet placé sur la feuille de papier sur laquelle on projette les anneaux, donne deux images dont les intensités sont constantes pour toutes les positions de l'analyseur.

Anneaux entre une lame métallique et une lame de verre. — Arago ayant remplacé l'une des lames de verre par un miroir métallique, reconnut que les anneaux réfléchis produisent les mêmes phénomènes que ci-dessus; seulement, l'image qui s'éteint présente, lorsqu'elle reparait au-delà de l'angle de polarisation, des couleurs complémentaires de celles qu'elle avait auparavant, et si l'autre image présentait une tache noire, celle-ci présente une tache brillante. M. Ivory a expliqué ce résultat inattendu, en admettant que le rayon éprouve, en se réfléchissant à la première surface de la lame mince, un retard de $\frac{1}{2}\lambda$, qui, d'après la théorie (2915), change, dans la lumière simple, les anneaux brillants en anneaux noirs, et *vice versa*. Remarquons, en effet, que le rayon qui s'éteint est partiellement polarisé dans le second azimut; sa vitesse de vibration est donc donnée par la formule de Fresnel (2982),

$$v' = - \frac{\text{tang}(i - r)}{\text{tang}(i + r)}.$$

Or, au-delà de l'angle de polarisation, on a $i + r > 90^\circ$, et v' change de signe avec $\text{tang}(i + r)$; ce qui indique une différence de marche de $\frac{1}{2}\lambda$. Le rayon réfléchi à la seconde surface de la lame mince n'est pas dans le même cas; car sa vitesse de vibration est

$$v' = - \frac{\text{tang}(i - r')}{\text{tang}(i + r')},$$

expression dans laquelle r' est l'angle de réfraction dans la lame de métal. Or, cet angle étant beaucoup plus petit que r , parce que l'indice des métaux est extrêmement grand, $i + r'$ est moindre que 90° , de sorte que le changement de signe n'a pas lieu pour les rayons réfléchis à la seconde surface.

Comme vérification de cette explication, on forme des anneaux entre deux substances transparentes, dont la première est moins réfringente que la seconde. On fait en sorte que $i + r$ soit plus grand, et $i + r'$ moindre que 90° , et l'on trouve que la lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence donne des anneaux à centre blanc. Si la lumière incidente est naturelle, on voit, avec un prisme biréfringent, deux images, dont une est à centre noir et l'autre à centre blanc.

3115. Anneaux avec la lumière polarisée. — Brewster a étudié les anneaux formés dans les lames minces par des rayons polarisés. M. Jamin a repris la question en détail, au moyen d'un appareil avec lequel on mesure les angles d'incidence et les azimuts du polariseur et de l'analyseur¹. Voici les principaux résultats auxquels il est arrivé :

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXVI, p. 158.

1° Quand les rayons incidents sont polarisés dans le plan d'incidence, les anneaux réfléchis suivent les lois trouvées par Newton (2907).

2° Quand les rayons incidents sont polarisés exactement dans le second azimut, si l'on augmente graduellement l'angle d'incidence, l'éclat général diminue, les diamètres des anneaux augmentent jusqu'à une certaine limite, restent quelque temps stationnaires, puis diminuent rapidement jusqu'à l'angle de polarisation. En ce moment, la tache noire centrale a été remplacée par un espace éclairé; chaque anneau obscur a pris la place de l'anneau brillant qui le précédait, et les interférences ont été augmentées en chaque point, de $\frac{1}{4}\lambda$.

L'éclat augmente ensuite, pendant que les anneaux continuent à se resserrer, jusqu'à ce que le premier anneau noir se soit transformé en une tache centrale, comme si, en chaque point, la différence de marche avait augmenté de $\frac{1}{2}\lambda$, ou qu'on eût écarté les verres.

3° Quand les rayons incidents sont polarisés dans un azimut quelconque, les anneaux observés sont la superposition de ceux des deux cas précédents; et comme les phases et les intensités des rayons composants sont différentes, les rayons émergents sont en général polarisés elliptiquement. Le phénomène se présente alors sous des aspects très-variés, et l'on peut obtenir des anneaux réfléchis à centre noir ou à centre blanc, suivant l'incidence et la position de l'analyseur. — Sous l'angle de polarisation, on peut, en imprimant à l'analyseur un mouvement continu de rotation, voir des anneaux naître au centre et s'accroître graduellement.

4° Les anneaux transmis présentent des phénomènes analogues, quand le plan primitif de polarisation n'est pas dans un des azimuts principaux.

Tous les résultats de l'expérience ont été comparés à ceux des formules de Cauchy, et ils se sont constamment trouvés d'accord. M. Jamin a observé d'autres phénomènes singuliers, dans le voisinage de la réflexion totale; il a vu les anneaux éprouver des déformations particulières. Dans la lumière homogène, les anneaux réfléchis se séparent en plusieurs séries d'anneaux distincts, résultant d'interférences d'un autre ordre. — Les anneaux transmis font place, sous la même incidence, à une infinité de bandes brillantes et obscures disposées sans ordre apparent. M. Jamin a donné l'explication générale de ces nouveaux faits; mais si l'on voulait leur appliquer l'analyse, on serait entraîné dans des calculs très-complicés.

CHAPITRE XV

POLARISATION ROTATOIRE

« Dans l'état actuel de la chimie et de la physique, aucunes recherches ne semblent devoir être plus utiles et plus fécondes que celles qui concernent les propriétés individuelles des molécules dont les corps sont composés. »

(Biot, *Mém. de l'Ac. des sc.*, t. II (1817), p. 41.)

§ 1. — POLARISATION ROTATOIRE MOLÉCULAIRE.

I. Phénomènes dans les solides. — Lois. — Théorie.

3116. Rotation du plan de polarisation par le cristal de roche. —

En 1811, en même temps qu'il découvrait la polarisation chromatique, Arago reconnut que le cristal de roche présente des propriétés particulières, que les autres cristaux à un axe ne possèdent pas. Tandis que des lames perpendiculaires à l'axe et traversées normalement par des rayons polarisés, ne donnent pas de couleurs dans l'analyseur, et conservent à cette lumière son plan de polarisation rectiligne, le cristal de roche, dans le même cas, donne les nuances les plus vives, qui passent, quand on fait faire un demi-tour à l'analyseur, par toutes les couleurs du spectre. Si l'analyseur donne deux images, elles sont de couleurs complémentaires; car, si elles empiètent l'une sur l'autre, les parties superposées sont blanches. Nous verrons d'autres substances que le cristal de roche, même des fluides, présenter les mêmes phénomènes. On les observe facilement avec des plaques de quartz de 1 à 20^{mm} d'épaisseur placées sur le porte-cristal de l'appareil de Norremberg, ou introduites dans les appareils à projections traversés par la lumière solaire; dans ce dernier cas, ils sont très-brillants.

Arago reconnut à divers signes que le plan de polarisation des rayons simples traversant la plaque de quartz, est dévié d'une certaine quantité, *différente pour les divers rayons simples*, et allant en augmentant, des rayons rouges aux rayons violets. Un polariscope devra donc être tourné d'une manière différente pour éteindre ces divers rayons; d'où il résulte que, si l'on emploie la lumière blanche, les rayons simples qui la composent seront éteints en proportion différente, et elle sera colorée. Il est facile de voir que, les *intensités* des mêmes rayons simples étant complémentaires dans les deux images, ce qui manque à l'un se retrouvant dans l'autre, les couleurs seront aussi toujours complémentaires.

M. Stéfan rend évidente cette dispersion des rayons par rotation inégale, en projetant sur un écran, une nappe lumineuse obtenue par la réflexion d'un faisceau polarisé sur un cône de verre, suivant la méthode de M. Guérard (2962), et interposant une lame de quartz dans le faisceau incident; le cercle lumineux, au lieu d'être simplement sombre aux extrémités du diamètre perpendiculaire au plan de polarisation, s'y montre coloré des nuances du spectre, les plans de polarisation des divers rayons simples étant différemment placés, parce qu'ils ont été inégalement déviés par le quartz.

3117. Lois. — Biot a découvert par l'expérience les lois de la *déviati*on ou *rotation du plan de polarisation* par le quartz¹; pour mesurer cette rotation, il cherchait de combien de degrés il fallait tourner un polariscopes donnant l'obscurité en l'absence de la lame, pour éteindre de nouveau les rayons simples après qu'on l'avait interposée. Voici les lois auxquelles il est arrivé.

1° La rotation du plan de polarisation produite par une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, est proportionnelle à l'épaisseur; elle reste la même quand on retourne la lame face à face, et quand on emploie des lames égales tirées de cristaux différents. Il n'y a plus de rotation, quand la lame est placée sur le miroir inférieur de l'appareil de Norremberg, le rayon la traversant successivement en sens contraire.

2° Certains cristaux font tourner le plan de polarisation vers la droite (par le haut), d'autres vers la gauche, le rayon étant supposé s'avancer vers l'observateur. Les premiers sont dits *dextrogyres*, et les autres, *lévogyres*; et pour la même épaisseur, le déplacement angulaire est le même. Biot indique la rotation à droite par le signe \curvearrowright , et la rotation à gauche par le signe \curvearrowleft .

Le sens de la rotation est généralement le même dans un même cristal de quartz. Cependant Brewster a trouvé, en 1819, des échantillons d'amétyste (quartz coloré en violet par le manganèse) qui présentaient des parties où la rotation avait lieu en sens opposé. Herschel a reconnu, en 1820, que la forme cristalline détermine le sens de la rotation, et que, dans la variété *plagièdre*, on peut la prévoir d'après l'inclinaison de certaines facettes, comme nous le verrons plus loin (3151).

3° Quand on superpose plusieurs plaques, la rotation totale est égale à la somme algébrique des rotations particulières à chacune d'elles; celles qui se font dans un sens étant prises de signe contraire à celles qui se font en sens opposé; cette loi se vérifie, quel que soit l'ordre dans lequel les plaques sont placées, et quelles que soient leurs distances¹ pourvu qu'elles restent parallèles.

4° L'angle de rotation correspondant aux couleurs simples, est à peu près proportionnel aux carrés des indices de réfraction, ou en raison inverse des carrés des longueurs d'ondulation (des carrés des longueurs d'accès dans le système de l'émission). Cette loi n'a pu être découverte qu'à force d'attention et de sagacité, à cause de la difficulté de retrouver exactement les mêmes

¹ *Mémoires de l'Institut, Académie des sciences* (1817), t. II, p. 41.

nuances du spectre, dans les expériences successives, les raies de Fraunhofer n'étant pas alors connues. Voici les nombres donnés par Biot pour les déviations du plan de polarisation des divers rayons simples, dans une plaque de quartz de 1^{mm} d'épaisseur. La première loi permet d'en déduire les déviations sous d'autres épaisseurs :

	Valeur de λ .	Déviations du plan de polarisation.
Rouge extrême.....	645	17° 29' 47"
Rouge du verre de Biot.....	628	18 25 00
Limite du rouge et de l'orangé.....	596	20 28 47
Limite de l'orangé et du jaune.....	571	22 18 49
Jaune moyen.....	550	24 00 00
Limite du jaune et du vert.....	532	25 40 31
Limite du vert et du bleu.....	492	30 2 45
Limite du bleu et de l'indigo.....	459	34 34 18
Limite de l'indigo et du violet.....	439	37 51 58
Violet extrême.....	406	44 4 58

3118. Approximation de la quatrième loi. — D'après des expériences de M. Broch et de M. Wiedemann¹, faites par une méthode que nous indiquons plus bas (3120), la quatrième loi n'est qu'approchée. Le premier de ces physiciens a mesuré les rotations des plans de polarisation des couleurs correspondant aux principales raies du spectre, et en les multipliant par les carrés des longueurs d'ondulation a trouvé des nombres qui croissent sensiblement avec la réfrangibilité des rayons. Voici les résultats :

Raies.....	B	C	D	E	F	G
Déviations.....	15°,30	17°,24	21°,67	27°,46	32°,50	42°,20
Produits par λ^2 .	723802	742950	751104	759574	762219	784152

M. Arndsten est arrivé, par la même méthode, à des résultats semblables.

Les essences de térébenthine et de citron ont, comme nous le verrons, la propriété de faire tourner le plan de polarisation, mais à un degré moindre que le quartz, en suivant les lois précédentes, et la quatrième se trouve encore notablement en défaut. En effet, M. Wiedemann trouve, en opérant sur des colonnes liquides de 10^{cm} d'épaisseur, pour l'essence de térébenthine, T, et l'essence de citron, R, les résultats suivants :

Raies.....	C	D	E	F	G
T { Déviations.....	10°,9	14°,5	18°,7	23°,2	32°,75
T { Produits par λ^2 ...	4690	4871	5184	5471	6044;
R { Déviations.....	37°,9	48°,5	63°,3	77°	106°
R { Produits par λ^2 ...	4631	4683	4751	4823	4926

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXXIV, pp. 419 et 421.

On voit que les produits vont en croissant assez rapidement. M. D. Gernez est arrivé à des résultats semblables sur les essences d'orange et de bigarade. Nous verrons (3131) que la 4^e loi est indiquée comme approximation par la théorie. Faut-il en conclure que celle-ci est en défaut, ou ne faudrait-il pas admettre plutôt l'existence de quelque circonstance inaperçue venant modifier les résultats? Ce point demande à être éclairci par de nouvelles recherches.

3119. Couleurs dans la lumière blanche. — Les nombres du tableau de Biot permettent de calculer la teinte que donnera la lumière blanche pour chaque position du polariscope, avec une plaque de quartz d'épaisseur connue. En effet, la section principale de l'analyseur formant un angle β avec le plan primitif de polarisation, chaque rayon simple aura une intensité proportionnelle à $\cos^2(\alpha - \beta)$, ou à $\sin^2(\alpha - \beta)$, suivant qu'il s'agira de l'image ordinaire ou de l'image extraordinaire, α étant l'angle de rotation du plan de polarisation; et il restera à calculer, par la règle de Newton (2598), la teinte formée par ces rayons mélangés en quantités proportionnelles à ces intensités. Biot a fait un grand nombre de calculs de ce genre, et les résultats ont été constamment d'accord avec l'expérience.

Teinte sensible. — Parmi les teintes qui se succèdent quand on fait tourner l'analyseur, Biot a remarqué la *teinte sensible*, ou *teinte de passage*, que l'on a observée depuis dans d'autres circonstances (3044). Dans le cas actuel, cette teinte se montre quand la lame de quartz n'est pas trop épaisse, et ne dévie pas le plan de polarisation des rayons rouges de plus de 140° à 150°. La teinte sensible n'est pas exactement la même pour toutes les épaisseurs; dans le faisceau extraordinaire, elle est habituellement bleu-violacé pâle, ou gris de lin, mais on la reconnaît toujours facilement en ce que le moindre déplacement de l'analyseur la fait passer, d'un côté au bleu franc, et de l'autre au rouge vif. Dans le faisceau ordinaire, elle est jaune et tourne au vert ou à l'orangé, pour le moindre déplacement de l'analyseur. — La teinte de passage se présente sous un angle de la section de l'analyseur avec le plan de polarisation, plus grand que l'angle qui donnerait le *minimum* d'éclat de l'image extraordinaire dans la lumière simple. Si l'on considère la lumière rouge, les deux angles sont entre eux comme 30 : 23, quelle que soit l'épaisseur.

Ce rapport une fois connu, on peut se rendre compte des propriétés de la teinte sensible. Cherchons d'abord la longueur d'ondulation λ , qui correspond à la couleur de l'image ordinaire qui accompagne l'image extraordinaire à teinte sensible. $\lambda' = 628$ étant la longueur d'ondulation du verre rouge de Biot, on aura, d'après la quatrième loi, $\lambda^2 : \lambda'^2 = 23 : 30$; ce qui donne $\lambda = 550$ millionnièmes de millimètre, correspondant au jaune moyen du spectre. Si donc, la section principale de l'analyseur étant tournée de manière à donner la teinte sensible, on se servait ensuite de lumière ayant cette teinte jaune, l'image ordinaire présenterait son *maximum* d'éclat. Biot a ensuite calculé la teinte donnée par la lumière blanche dans l'image extraordinaire, en cherchant les déviations et les intensités des autres couleurs simples lorsque la

section de l'analyseur est ainsi placée dans le plan de polarisation du jaune moyen; ce qui se fait en retranchant de la déviation, 24° , de ce jaune, donnée par le tableau ci-dessus, les déviations des autres couleurs. Voici les résultats, en négligeant les secondes, la plaque de quartz ayant toujours 1^{mm} d'épaisseur :

Rouge extrême.....	6° 30'	Limite du jaune et du vert.	— 1° 40'
Rouge du verre de Biot.....	5 35	Limite du vert et du bleu...	— 6 3
Limite du rouge et de l'orangé..	3 31	Limite du bleu et de l'indigo.	— 10 34
Limite de l'orangé et du jaune.	1 41	Limite de l'indigo et du violet.	— 13 52
Jaune moyen.....	0 0	Violet extrême.....	— 20 5

Chacun des rayons colorés se décompose, dans l'analyseur, en deux autres, l'un polarisé dans la section principale et donnant l'image ordinaire, d'intensité $\frac{1}{2} \cos^2\beta$; l'autre polarisé à 90° du premier, donnant l'image extraordinaire, d'intensité $\frac{1}{2} \sin^2\beta$. La teinte sensible est formée de toutes les composantes extraordinaires. Or, comme les sinus augmentent en même temps que les angles, on voit que β étant très-petit, la teinte sensible sera très-faible, et sera composée principalement de bleu et de violet mêlés d'un peu de rouge et d'orangé. Si l'on vient à rapprocher le plan principal de l'analyseur du plan de polarisation des rayons bleus, la composante du bleu diminuera en même temps que β , celle du rouge augmentera au contraire, et la teinte tournera au rouge. Si l'on tourne l'analyseur en sens contraire, le bleu dominera à son tour. Si la lame de quartz était plus épaisse que 1^{mm} , tous les angles devraient être multipliés par l'épaisseur, et la teinte sensible serait plus vive, un peu différente, mais le bleu y dominerait toujours mêlé d'un peu de rouge. Cette teinte ne change, du reste, notablement, que lorsque l'épaisseur est de 7 à 8^{mm} ; alors la déviation des couleurs les plus réfrangibles s'approchant de 18° , leur composante est très-petite, tandis que la déviation des couleurs les moins réfrangibles est très-près de 90° , c'est-à-dire de l'angle dont le sinus est *maximum*.

3120. Mesure de l'angle de rotation. — Au moyen de la teinte de passage, on peut évaluer la déviation du plan de polarisation avec plus de précision qu'en cherchant le *minimum* d'éclat des rayons simples, dont l'intensité varie à peine dans le voisinage de ce *minimum*. Par exemple, pour vérifier la loi des épaisseurs, on cherchera la teinte de passage avec des lames plus ou moins épaisses.

M. Broch a employé une autre méthode très-précise¹, qui n'est autre chose que celle qu'avaient imaginée MM. Fizeau et Foucault (2835) : les rayons solaires, entrant dans la chambre noire par une fente horizontale, sont polarisés par un prisme de Nicol, traversent suivant l'axe la plaque de quartz dont on veut mesurer la rotation, et sont analysés par un second prisme de Nicol. Le faisceau émergent est ensuite reçu par un prisme de verre parallèle à la fente,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIV, p. 119.

et qui donne un spectre dans lequel on distingue les raies de Fraunhofer; ces raies sont accompagnées de larges bandes noires, qui indiquent l'absence de certaines couleurs. Si l'on fait varier l'angle que font entre elles les sections principales des deux nicols, on voit ces bandes se déplacer d'une extrémité du spectre à l'autre, les couleurs éteintes par l'analyseur changeant avec cet angle; et l'on connaît la rotation imprimée par la plaque de quartz, au plan de polarisation de l'une des couleurs du spectre, quand on connaît l'angle des deux nicols qui donne une bande obscure dans cette couleur. La plaque ne couvrant qu'une moitié de la fente, il est facile d'observer la déviation qui correspond aux raies de Fraunhofer visibles dans la moitié du spectre non modifiée par le quartz. C'est par cette méthode que M. Broch a trouvé les résultats cités plus haut (3118). Chaque nombre est la moyenne de dix-huit observations faites avec des plaques d'épaisseur différente, dextrogyres ou lévogyres. L'erreur ne dépasse pas $0^{\circ},2$, pour les raies C, D, E, et $0^{\circ},4$ pour B, F, G, qui se trouvent dans la partie sombre du spectre. Les raies A et H sont dans une partie trop obscure pour donner des résultats précis; il aurait fallu s'aider d'une petite lunette.

M. Wiedemann a employé, de son côté, une méthode à peu près semblable: le spectre était observé à travers une lunette de Galilée à fil focal. Ce fil étant d'abord amené sur une raie, on tournait l'analyseur jusqu'à ce que le milieu d'une des bandes obscures vint se placer sur le fil.

MM. Soret et E. Sarasin ont étudié la rotation du quartz sur les rayons ultra-violet, jusqu'à la raie N, au moyen de l'oculaire fluorescent, qui les rend visibles (2692).

3121. Influence de la température. — La chaleur augmente l'angle de rotation du quartz. Ce fait, constaté d'abord par M. Dubrunfaut, a été ensuite étudié par divers physiciens. M. Fizeau a opéré entre 10° et 72° , sur la lumière jaune du sodium, et a tenu compte de la variation d'épaisseur de la plaque par la dilatation. M. V. Lang, en suivant la méthode de Broch, a expérimenté sur les lumières du lithium, du sodium, et du thallium, produites par un brûleur de Bunsen, et pour lesquelles il a trouvé les mêmes accroissements de l'angle de polarisation. Il a cru devoir représenter la rotation δ_t à t° , par une expression de la forme $\delta_t = \delta_0 (1 + at)$, dans laquelle δ_0 est la rotation à 0° . M. L. Sohncke, ayant reconnu que a variait avec la limite de température à laquelle on s'arrêtait, a proposé la formule parabolique $\delta_t = \delta_0 (1 + at + bt^2)$, et a trouvé $a = 0,0000999$, et $b = 0,000000318$, coefficients qui restent sensiblement les mêmes pour les diverses couleurs. — D'autres expériences faites sur le chlorate de soude, l'ont conduit aux mêmes conclusions, et lui ont donné $a = 0,00061$. La chaleur modifie donc beaucoup plus la rotation du chlorate de soude que celle du quartz.

Les expériences précédentes n'ont pas dépassé 100° . M. J. Joubert est allé de -20° jusqu'à 1500° environ¹. La plaque de quartz était placée dans un

¹ *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. VIII, p. 5.

tube de porcelaine U' (fig. 2104), fermé à ses extrémités par des glaces, et dans lequel on pouvait raréfier l'air par la tubulure a , pour obtenir une plus grande transparence. Le tube U' traverse un tube métallique plus gros, soudé par ses deux bouts aux parois opposées d'une étuve en fer dans laquelle on fait circuler diverses vapeurs; de mercure, de soufre, de cadmium, qui donnent 360° , 448° , 840° . Les températures plus élevées étaient obtenues au moyen d'un fourneau à l'huile lourde de pétrole de M. Deville. Des tubes à eau en plomb, enroulés en n et n' , empêchent l'échauffement des extrémités. Le pouvoir rotatoire était mesuré, entre autres, par la méthode de MM. Fizeau et Foucault. Le faisceau, polarisé dans un plan vertical, traversait le prisme avant de rencontrer le quartz. Des expériences faites à la température d'ébullition du soufre ayant prouvé que le rapport des rotations pour les raies C, D, F reste le même qu'à la température ordinaire, on pouvait n'expérimenter que sur une raie.

Dix échantillons divers de quartz, dont les épaisseurs ont varié de 15^{mm} à 40^{mm} , ont donné des résultats identiques, de -20° à 100° ; et les variations du pouvoir rotatoire ont satisfait exactement à la formule $\delta_t = \delta_0 (1 + at + bt^2)$. Mais au-dessus de 840° , les variations étaient très-faibles et de moins en moins sensibles. L'effet dû à l'accroissement d'épaisseur par la dilatation, calculé entre 0° et 100° , n'est du reste que $\frac{1}{20}$ environ de la variation totale. Celle-ci entre 300° et 900° , est d'environ $12'$ par degré de température. Une simple lame de quartz constitue donc un véritable pyromètre comparable, d'un très-petit volume et ne demandant qu'une simple lecture d'angle. Aussi M. Joubert en a-t-il tiré un bon parti dans des recherches ultérieures (3160).

Dans ces sortes d'expériences, pour que les déviations produites par la chaleur soient prononcées, il faut que la lame de quartz soit épaisse, et alors la rotation absolue est très-grande et les franges très-serrées. M. D. Germer a obvié à ces inconvénients en employant deux plaques de rotation inverse qu'il place aux extrémités d'un tube, et qui ne donnent pas de rotation. Il chauffe une de ces plaques, et la rotation produite est due à l'action de la chaleur sur cette plaque seule.

3122. Application de la polarisation rotatoire aux polariscope.

Une plaque de quartz perpendiculaire à l'axe, appliquée contre un analyseur, fait immédiatement distinguer la lumière polarisée, par la couleur qui se produit. Pour trouver le plan de polarisation des rayons incidents, on tourne l'analyseur jusqu'à ce qu'on trouve la teinte de passage. Ayant préalablement marqué la position de l'analyseur qui donne cette teinte quand le plan de polarisation est vertical, il est facile de déterminer la position de ce plan dans chaque expérience.

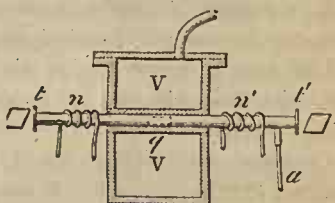


Fig. 2104.

Biquartz à deux rotations de Soleil. — Soleil a imaginé une disposition qui permet d'obtenir la position du plan de polarisation avec une extrême précision. La plaque de quartz a la forme d'un disque composé de deux parties placées l'une à côté de l'autre, et réunies suivant un diamètre vertical. L'une des moitiés est *dextrogyre*, l'autre *lévogyre*. Si les deux moitiés ont une épaisseur de 3^{mm},75, elles font tourner, en sens inverse, le plan de polarisation de 90°, de manière à donner en même temps la teinte sensible, quand la section principale du polariscope est perpendiculaire au plan primitif de polarisation. Si l'on fait alors tourner l'analyseur d'une quantité, même très-petite, l'une des moitiés passe au rouge, tandis que l'autre vire au bleu, et la différence de nuance est très-facile à saisir. Si l'on a marqué sur le cercle qui sert à mesurer les rotations, la position de l'analyseur qui donne la teinte de passage quand le plan de polarisation des rayons incidents est parallèle au diamètre de jonction des deux lames, il sera toujours facile de trouver la position de ce plan dans un cas donné.

Quand on emploie pour polariscope un prisme à deux images, on voit, en même temps que l'image extraordinaire de teinte sensible uniforme, l'image ordinaire avec ses deux moitiés également jaunes, et chaque image se modifie sur les deux moitiés dès qu'on fait tourner le polariscope. Si l'on tourne de 90°, les teintes uniformes se reproduisent, mais les couleurs de passage ont changé d'image.

Le biquartz a été appliqué par M. Duboseq à la construction du polariscope à lunules (2995) ; il remplace la simple lame de cristal de roche par la double plaque, de manière qu'on observe deux images, dont les moitiés sont de couleurs différentes quand la section principale du prisme analyseur est écartée du plan de polarisation ou de la position perpendiculaire à ce plan. Une mince lentille appliquée en dedans contre l'analyseur permet de distinguer nettement la ligne de jonction des demi-plaques, quoique le tube soit plus court que la distance de la vision distincte.

Le biquartz de Soleil peut servir à reconnaître la polarisation rotatoire ; car, si une plaque à pouvoir rotatoire est placée dans le trajet de rayons polarisés arrivant sur le biquartz, elle ajoute son épaisseur à la moitié qui tourne dans le même sens, et la retranche de l'autre moitié ; les couleurs ne sont donc plus égales, et, de plus, l'analyseur ne peut ramener les deux moitiés à présenter la teinte sensible.

De Sénarmont a remarqué que la double plaque peut servir aussi à trouver la position des axes de l'ellipse dans les rayons polarisés elliptiquement. En effet, les deux moitiés ont la même teinte quand la section principale de l'analyseur contient un de ces axes ; chacune des vibrations composantes dirigées suivant ces axes produisant dans ce cas, pour sa part et indépendamment de l'autre, une teinte uniforme.

3123. Photomètre de Babinet. — Le biquartz a été appliqué par Babinet à la construction d'un photomètre très-sensible. Dans cet instrument (*fig.* 2105),

polariscope de de Sénarmont¹. Imaginons une plaque de quartz perpendiculaire à l'axe, AB (fig. 2106), composée de deux prismes rectangulaires LD, L'D', appliqués l'un sur l'autre par la face hypothénuse. Chacun de ces prismes est lui-même formé de deux parties réunies dans la section mn. Les prismes placés en diagonale D, D' sont *dextrogyres*, et les prismes L, L' *lévogyres*. Cette plaque, suivie d'un analyseur et traversée normalement par des rayons polarisés, paraîtra couverte de franges rectilignes parallèles aux arêtes des prismes, comme dans le compensateur de Babinet (3098). Si la section principale de l'analyseur est parallèle au plan primitif de polarisation, la frange centrale noire de l'image extraordinaire paraîtra au milieu de la plaque, où les épaisseurs des prismes de rotation opposée sont égales. Mais si l'on fait tourner le plan de polarisation primitif, la frange centrale se déplacera parallèlement à elle-même, de manière à se rapprocher du sommet du prisme qui fait tourner dans le sens du mouvement. La frange centrale se déplace donc en sens contraire dans les deux moitiés An, Dm de la plaque; et pour en ramener les deux

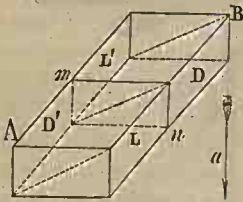


Fig. 2106.

parties à être en ligne droite, il faudra tourner l'analyseur d'une quantité égale à la déviation du plan primitif de polarisation, et dans le même sens. Plus l'angle au sommet des prismes est aigu, plus les franges sont larges et écartées; mais, comme elles sont alors diffuses, il vaut mieux les avoir plus serrées et plus nettes. Un angle de 12° avec l'axe, donne la même sensibilité que le biquartz de Soleil, quand on observe les franges à l'aide d'une petite lunette.

Ce polariscope s'applique à la lumière simple comme à la lumière blanche. Il peut aussi servir à observer la polarisation elliptique; seulement les franges sont d'autant plus pâles que l'ellipse est moins allongée.

3125. Anneaux colorés du quartz dans la lumière convergente. —

Quand on observe entre deux tourmalines croisées, les larges anneaux donnés par une lame de quartz perpendiculaire à l'axe (3066), on remarque que la croix noire manque totalement au centre, et ne se distingue un peu que sur les anneaux les plus éloignés. Au milieu, se trouve une plage colorée, dont la nuance dépend de l'épaisseur de la lame et de l'orientation de la tourmaline oculaire.

Pour expliquer ces résultats, rappelons-nous que la croix noire se montre dans le plan de polarisation du faisceau incident, quand il coïncide avec la section principale de l'analyseur (3069). Or, le plan primitif de polarisation étant dévié par le quartz, et d'une manière différente pour chaque couleur, là où se formera la croix noire pour les rayons rouges, il y aura de la lumière des autres couleurs, leur plan de polarisation ne pouvant être dans la section principale de l'analyseur en même temps que celui des rayons rouges. Les anneaux

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXVIII, p. 279.

sont formés par des rayons obliques à l'axe. Ces rayons sont polarisés elliptiquement, et le rapport des axes est d'autant plus près de l'unité que l'on se rapproche davantage de l'axe. M. Airy a même démontré par le calcul et par l'expérience que, pour toutes les inclinaisons sur l'axe, le quartz donne aux deux rayons la polarisation elliptique, dextrorsum pour l'un, sinistrorsum pour l'autre. Pour l'un, le grand axe de l'ellipse est perpendiculaire, et pour l'autre parallèle à la section principale du cristal. L'ellipse se rétrécit d'autant plus que les rayons s'éloignent davantage de l'axe, et la polarisation devient rectiligne, quand le plan d'incidence est perpendiculaire à cet axe.

On conçoit que si la lame est très-mince, la différence de rotation des plans de polarisation des diverses couleurs étant peu sensible, il se formera une croix sombre et colorée, mais elle ne s'étendra jamais jusqu'au centre; de plus, il faudra, pour la voir, incliner la lame, à cause des grandes dimensions que prennent les anneaux quand elle est mince. Delezenne a remarqué que, pour les lames de quartz de 1 à 5^{mm} d'épaisseur, la plage centrale n'est plus de couleur uniforme; elle est occupée tantôt par une croix colorée, qui ne s'étend pas jusqu'aux premiers anneaux, et dont les branches sont d'autant plus courtes que la lame est plus épaisse, tantôt par quatre taches colorées. On peut toujours tourner la tourmaline oculaire de manière à obtenir une croix bleue, qui devient presque noire quand la lame est très-mince.

3126. Trouver le sens du cristal. — Si, après avoir obtenu la croix bleue, on fait tourner légèrement la tourmaline dans le sens de la rotation du cristal, la partie centrale passe au violet; ce qui permet de reconnaître le sens de la rotation, Mais il est un autre moyen beaucoup plus commode : quand on fait tourner la tourmaline oculaire sur elle-même, si les anneaux s'agrandissent en paraissant naître successivement du centre, le cristal dévie le plan de polarisation dans le sens où tourne la tourmaline. Si, au contraire, les anneaux se resserrent en disparaissant au centre, le cristal dévie le plan de polarisation en sens contraire du mouvement imprimé à la tourmaline.

3127. Spirales d'Airy. — Deux lames de quartz de même épaisseur et de rotation inverse, étant superposées entre deux tourmalines *croisées*, on aperçoit une croix sombre dont les bras, contournés en S, se continuent avec les anneaux, qui affectent la forme de spirales, et présentent, ainsi que la croix, une teinte rouge-orangé du côté concave, et verte du côté convexe (*fig.* 2107). La croix ne change pas de position quand on fait tourner les plaques sur elles-mêmes, et son orientation dépend de leur épaisseur. Les bras courbes se dirigent, en partant du centre, dans le sens de la rotation de la plaque antérieure; c'est donc la lame dextrogyre qui occupe cette position pour le cas de la figure. Ces bras rencontrent les anneaux sur la croix noire ordinaire, qui se distingue un peu, assez loin du centre. Si l'on fait tourner la tourmaline oculaire, la croix tourne dans le même sens, en s'effaçant peu à peu, et est remplacée par une croix blanche quand les tourmalines sont parallèles. M. Airy a retrouvé tous ces résultats par le calcul.

On peut observer les spirales, avec une seule plaque de quartz posée sur la glace inférieure de l'appareil de Norremberg, en amenant la lentille mobile au dessus. La lumière convergente réfléchiée par le miroir après avoir traversé la plaque, se trouve alors dans le même cas que si elle en traversait une seconde de rotation inverse. — En opérant ainsi, il n'est plus besoin de préparer deux plaques exactement de même épaisseur. On peut aussi reconnaître si une plaque est rigoureusement perpendiculaire à l'axe; s'il n'en est pas ainsi, la croix noire n'est pas symétrique et manque de netteté.

2128. Polarisation rotatoire dans divers solides. — Pendant longtemps on a regardé le cristal de roche comme le seul corps solide possédant le pouvoir de faire tourner le plan de polarisation. Depuis, on a constaté cette propriété dans diverses substances cristallisées ou non cristallisées.

Descloiseaux¹ l'a reconnue dans les cristaux de cinabre, en observant, dans une lame perpendiculaire à l'axe, des anneaux sans croix variant de grandeur quand il tournait l'analyseur. Ces cristaux sont le plus souvent lévogyres. Des macles formées de petits rhomboédres basés se pénétrant complètement en tournant autour d'un axe commun, lui ont donné les spirales d'Airy. La rotation est, du reste, 15 ou 16 fois moindre que celle du quartz, autant qu'on peut en juger avec des lames auxquelles leur couleur foncée laisse peu de transparence. Le sulfate de strychnine à 13 atomes d'eau, qui cristallise à froid en octaédres à base carrée se clivant perpendiculairement à l'axe, donne aussi des anneaux sans croix noire. La déviation paraît être moitié de celle

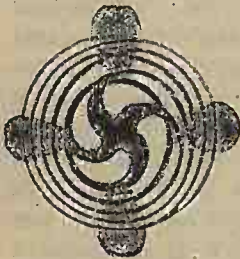


Fig. 2107.

du quartz, et tous les échantillons observés ont été lévogyres.

Cristaux du système régulier. — M. H. Marbach a découvert, en 1854, le pouvoir rotatoire dans des cristaux du système régulier : chlorate et bromate de soude, acétate d'urane et soude. Ces cristaux font tourner, tantôt à gauche, tantôt à droite; 6,6; 8,6; et 13,5 fois autant que le quartz. Ces déviations suivent les mêmes lois que pour cette dernière substance; et il est à remarquer que les résultats sont indépendants de la direction suivant laquelle la lame a été taillée dans le cristal.

Les cristaux à deux axes ne peuvent manifester la polarisation rotatoire, à cause de leur grand pouvoir biréfringent, qui la masque. Cependant, Biot a saisi quelques apparences non équivoques dans des lames de sucre cristallisé taillées perpendiculairement à l'un des axes optiques; il a vu la bande noire qui traverse les anneaux (3073) colorée d'une manière sensible. Il a pu aussi constater directement la rotation, dans le sucre rendu incristallisable par la fusion, et dans la dextrine réduite en plaques transparentes.

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. LI, p. 361.

3129. Rotation du plan de polarisation de la chaleur par le quartz. — Biot et Melloni ont constaté ce phénomène de la manière suivante : un faisceau cylindrique de chaleur d'une lampe de Locatelli, rendu plus intense au moyen de deux lentilles de sel gemme, comme il est dit plus haut (3011), traversait, avant de tomber sur le thermo-multiplicateur, deux piles de mica inclinées et tournées de manière à donner le *minimum* de chaleur. L'interposition d'une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, produisit immédiatement une déviation à peu près double sur l'aiguille du rhéomètre. La rotation s'effectuait dans le même sens que pour la lumière, et elle augmentait avec la réfrangibilité des rayons calorifiques.

MM. Fizeau et Foucault ont opéré sur les rayons séparés du spectre. Le faisceau, ayant traversé deux nicols, est dispersé par un prisme. On interpose la plaque de quartz, qui fait tourner inégalement les plans de polarisation des divers rayons colorés. Un de ces plans vient se placer parallèlement à la section principale de l'analyseur ; le rayon est intercepté, et une bande noire se montre à la place de la couleur qui lui correspond. Si l'on fait tourner un des nicols, la bande noire occupe successivement les diverses régions du spectre. Quand ensuite on présente la pile de Melloni à cette bande, on reconnaît constamment que les rayons calorifiques manquent là où manque la lumière.

M. P. Desains a expérimenté sur les rayons obscurs, obtenus au moyen de rayons solaires tamisés à travers du sulfure de carbone ioduré (II, 884), et au moyen de la lampe de MM. Bourbouze et Wiesnegg (3109)¹. L'appareil employé consiste en un banc de Melloni, construit dans des conditions spéciales de dimensions et de stabilité. Les rayons de la source traversent successivement un polariseur tournant, une fente sur laquelle s'appuie l'analyseur fixe, puis un prisme, et vont frapper la pile dont l'ouverture présente à peine 1^{mm} de largeur. Pour chaque position de la pile thermo-électrique, on tournait le polariscop de manière à n'avoir pas d'effet calorifique, on interposait la lame de quartz, l'aiguille du rhéomètre indiquait le passage des rayons de chaleur, et l'on tournait le polariseur jusqu'à ce que tout effet calorifique eût disparu. De nombreuses expériences faites sur des rayons obscurs, symétriques de diverses couleurs du spectre par rapport au rouge extrême, ont confirmé la loi des épaisseurs, et ont montré que les rotations sont d'autant plus faibles que les rayons obscurs sont moins réfrangibles. Par exemple, pour une épaisseur de quartz de 1^{mm}, les déviations sont 6°,8 ; 2°,08 ; 0°,33 sur les rayons obscurs symétriques du jaune, du bleu et du violet avancé.

La rotation du plan de polarisation de la chaleur, a été prouvée, de son côté, par M. Tyndall, au moyen de rayons obscurs intenses, séparés de la lumière électrique par son passage à travers la dissolution d'iode dans le sulfure de carbone.

3130. THÉORIE DE LA POLARISATION ROTATOIRE. — A peine les phénomènes de

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXII, p. 1277, et t. LXXXIV, p. 4056.

la polarisation rotatoire étaient-ils connus, que Fresnel en donnait l'explication, en les rattachant à sa belle théorie de la polarisation circulaire¹, et en s'appuyant sur le principe suivant.

Décomposition d'un rayon polarisé en deux circulaires. — Un faisceau polarisé dans un plan, peut être remplacé par deux circulaires d'intensité moitié moindre et de sens opposé. Pour le démontrer, remarquons d'abord que deux rayons d'intensité i et i' polarisés dans le même plan, donnent (3048) un rayon résultant ayant pour intensité $I^2 = i^2 + i'^2 + 2ii \cos 2\pi \frac{d}{\lambda}$. Si les intensités sont égales, et le retard, d , égal à $\frac{1}{4}\lambda$, on a $I^2 = 2i^2$; d'où $i = I : \sqrt{2}$. On peut donc remplacer le rayon d'intensité I par deux autres d'intensité $I : \sqrt{2}$ polarisés dans le même plan, et ayant une différence de marche égale à $\frac{1}{4}\lambda$. Cette différence doit être produite par le retard d'un des rayons, de $\frac{1}{8}\lambda$; et l'avance de l'autre, de la même quantité, afin que le plan de polarisation conserve la même position que dans le rayon primitif.



Fig. 2108.

Chacun de ces deux rayons d'intensité i , peut être remplacé à son tour par deux autres d'intensité $\frac{1}{2}i$ polarisés dans des plans formant des angles de 45° avec le plan primitif de polarisation; ce qui fera en tout quatre rayons. Deux de ces rayons sont en avance de $\frac{1}{8}\lambda$, et les deux autres en retard de $\frac{1}{8}\lambda$. Un des rayons retardés de l'un des groupes formera donc, avec le rayon de l'autre groupe qui est polarisé dans un plan perpendiculaire, un rayon polarisé circulairement dans un certain sens. Les deux autres rayons formeront un polarisé circulaire de sens inverse; car le rayon retardé se trouve alors dans le plan qu'occupait dans l'autre groupe le rayon avancé; le rayon polarisé primitif se trouvera donc ainsi remplacé par deux circulaires inverses.

Réciproquement, un système de deux rayons d'égale intensité polarisés circulairement, en sens contraire, équivaut à un rayon polarisé dans un seul plan. On peut le montrer en répétant, dans l'ordre inverse, les raisonnements précédents; mais on peut aussi montrer directement qu'une molécule d'éther soumise à l'action des deux rayons, vibre dans un plan invariable: Soit o (fig. 2108) la molécule d'éther, et oa le rayon de la circonférence qu'elle tend à décrire dans les deux sens, sous l'influence des deux rayons polarisés circulairement qui la sollicitent. Soit a la position qu'aurait à un instant donné cette molécule, sollicitée dans la direction ax par le mouvement circulaire qui anime un des rayons; et $b\beta$ la direction de son mouvement au même instant si l'autre rayon était seul. Pour connaître le sens du mouvement de la molécule soumise à la fois aux deux impulsions, il suffira de mener par le point o , des parallèles ox' , $o\beta'$ à ax et $b\beta$, et de chercher la résultante or des vitesses dirigées suivant ces droites. Comme les vitesses suivant ax et $b\beta$ sont égales, puisque les deux rayons ont

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXVIII, p. 147.

même intensité et même longueur d'ondulation, la droite or divisera l'angle $\alpha'o\beta'$ en deux parties égales; et comme cette droite aura toujours la même direction, quelles que soient les positions a et b considérées, on voit que la molécule vibrera suivant un diamètre constant, passant par le point c où se rencontreraient les points a et b supposés tourner séparément dans les deux rayons circulaires. Le diamètre nc donne la direction du mouvement vibratoire dans le rayon formé par la réunion des deux circulaires. Le plan de polarisation sera donc perpendiculaire à nc , ou dirigé suivant le diamètre qui passe par les points où les deux mouvements circulaires de sens contraire sont parallèles dans les rayons composants.

3131. Cas de deux rayons circulaires marchant avec des vitesses différentes. — Supposons que deux rayons circulaires égaux, mais de sens contraire, pénètrent dans un milieu qui les propage avec des vitesses différentes. Il est facile de voir que les directions du mouvement vibratoire résultant, au lieu de rester dans un même plan, tourneront dans le sens du rayon qui se propage le moins rapidement. En effet, soit MN (*fig.* 2109) la face d'entrée du milieu considéré, NE l'hélice suivant laquelle se propage un des ébranlements, constituant le rayon *dextrorsum*, et MD celle qui est décrite par un ébranlement correspondant à l'autre rayon, et supposons que ce dernier ait la plus petite vitesse de propagation. Les spires des deux hélices seront toujours parcourues dans le même temps, mais le pas $2ND$ sera plus petit que $2NI$. Considérons différentes sections du cylindre sur lequel sont tracées ces hélices, et supposons, pour fixer les idées, que les deux hélices, partant, à l'entrée, d'un même diamètre MN , la direction du mouvement vibratoire résultant soit perpendiculaire à MN ; en AB , cette direction sera la bissectrice ox de l'angle mon' ; en CD , la bissectrice $o'\beta$ de l'angle $no'D$; en EII , la droite $o''\gamma$ On voit que cette direction tourne dans le sens du mouvement du rayon qui se propage le moins vite; de sorte que la surface qui la contient n'est pas un plan, mais un *hélicoïde*. Si le rayon émerge en EII , la direction des vibrations ne changera plus et restera parallèle à $o''\gamma$; elle aura tourné d'une quantité évidemment proportionnelle à l'épaisseur Oo'' du milieu traversé, et il en sera de même du plan de polarisation, qui est perpendiculaire à $o''\gamma$.

Dans le cas où le rayon qui marche le plus rapidement est *dextrorsum*, comme dans la figure, le plan de polarisation tourne vers la droite, par le haut, quand le rayon marche vers l'observateur; le milieu est alors *dextrogyre*. Si le rayon *sinistrorsum* avait la plus grande vitesse, le milieu serait *lévogyre*.

On peut calculer l'angle de rotation α quand on connaît les vitesses v et v' des deux rayons dans le milieu traversé, et l'épaisseur e de ce milieu. En effet, considérons une épaisseur E telle que les deux hélices rencontrent la surface

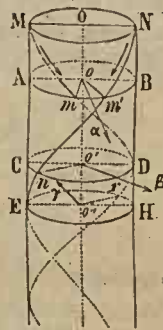


Fig. 2109.

de sortie, aux extrémités d'un même diamètre, comme à l'entrée; alors la direction du mouvement vibratoire aura tourné de 180° , et comme elle tourne toujours d'une quantité égale à la moitié de l'arc de la section droite dont un des systèmes est en avance sur l'autre, on aura $x : 180 = e : E$. Or, E renferme un nombre entier m de pas égaux à λ ; on a donc $E = m\lambda = (m + 1)\lambda'$, λ et λ' correspondant aux deux rayons dont les vitesses sont v et v' . Remplaçant E par $m\lambda$, puis m par sa valeur tirée de $m\lambda = (m + 1)\lambda'$, il vient $x = 180 \frac{(\lambda - \lambda')e}{\lambda'\lambda} = 180 \frac{(v - v')e}{v'\lambda}$. On voit que si $\lambda - \lambda'$ est le même pour les différentes couleurs, x varie en raison inverse de $\lambda\lambda'$, et non de λ^2 ; ce qui montre que la quatrième loi (3118) n'est pas rigoureusement vraie, même en théorie.

Si x est connu, on tirera de la formule précédente $\frac{v}{v'} = \frac{\lambda}{\lambda'} = 1 + \frac{x}{180e}$, pour l'indice de double réfraction circulaire.

3132. Polarisation circulaire par double réfraction dans le quartz.

— Supposons maintenant que le quartz possède la propriété de propager, suivant son axe, avec des vitesses inégales, des rayons polarisés circulairement en sens contraire; il en résultera la déviation du plan de polarisation. En effet, un rayon polarisé devra se partager, à son entrée dans une lame perpendiculaire à l'axe, en deux autres polarisés

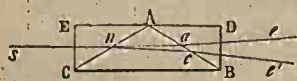


Fig. 2110.

circulairement en sens contraire, ayant des vitesses différentes, et formant, à leur sortie, un rayon polarisé dans un plan qui fera avec le plan primitif de polarisation, un angle proportionnel à l'épaisseur traversée. Si le rayon incident était polarisé circulairement, il passerait sans éprouver de modification.

Double réfraction du quartz suivant son axe. — La simplicité de l'explication qui précède est telle qu'on pourrait la regarder comme une preuve à *posteriori* de l'inégalité de vitesse dans le quartz, des deux circulaires inverses; mais Fresnel a tenu à prouver directement cette inégalité. Il taille le cristal en forme de prisme ACB (fig. 2110), afin que la différence de vitesse puisse se manifester par une différence de déviation. La base AB est parallèle à l'axe, et comme les indices ne diffèrent que de quelques cent-millièmes, il place le prisme ABC, dont l'angle est de 152° , entre deux autres, rectangulaires, ABC, ACE, taillés dans un cristal qui tourne le plan de polarisation en sens inverse du prisme ABC. Un rayon polarisé entrant normalement à la face EC, se divise, en n , en deux rayons, qui s'écartent encore en a et c , et donnent deux faisceaux émergents e , e' doués de toutes les propriétés de rayons polarisés circulairement. De plus, si on les reçoit dans un des parallélépipèdes de Fresnel (3100), ils sont *restaurés*, et leurs plans de polarisation sont à 45° du plan d'incidence dans le parallélépipède; mais pour l'un, l'angle est à droite, et pour l'autre à gauche; ce qui prouve que les deux rayons circulaires étaient

de sens inverse. Du reste, tantôt c'est le rayon le plus écarté du sommet A qui est dextrorsum, tantôt le moins écarté, suivant les échantillons; c'est pour cela qu'ils sont tantôt *dextrogyres*, tantôt *lévogyres*.

Voici ce qui se passe : le rayon polarisé se décompose, en entrant par la face EC, en deux autres polarisés circulairement en sens contraire, de vitesses différentes, et superposés. En arrivant en *n*, celui qui possède la plus grande vitesse passe dans un milieu qui lui donne, au contraire, la plus petite vitesse; il est donc dans le cas d'un rayon entrant dans un milieu *plus réfringent*, et est dévié suivant *nc* vers la base CB. L'autre rayon prenant une vitesse plus grande en passant dans le prisme ABC, se comporte comme s'il pénétrait dans un milieu *moins réfringent*, et se relève vers le sommet; les deux rayons sont donc séparés. Un nouveau déplacement dans le même sens se produit pour chaque rayon à son entrée dans le prisme ABD, dont le sommet est en bas; ce qui augmente l'angle des rayons émergents. — Il est essentiel que les rayons passent suivant l'axe; car, dès qu'ils s'en écartent un peu, ils éprouvent la double réfraction, beaucoup plus énergique, que le quartz exerce obliquement à son axe.

Les deux faces EC, DB du *triprisme* étant parallèles, le système est achromatique. Or, les rayons émergents sont colorés; il faut donc qu'il y ait inégalité de double réfraction des divers rayons simples. C'est ainsi que Fresnel a vérifié ce qu'il avait annoncé dès 1818, que la double réfraction circulaire est bien plus énergique sur les rayons violets que sur les autres. Nous savons, en effet, que la rotation du plan de polarisation par le quartz, augmente avec la réfrangibilité des rayons (3117).

3133. De la cause première de la polarisation rotatoire. — Il semble naturel d'admettre que l'arrangement régulier des molécules dans le quartz et certains autres cristaux, est la cause de la différence de vitesse des deux polarisés circulaires, d'où résulte la rotation du plan de polarisation; et ce qui confirme cette manière de voir, c'est que les prismes de quartz brisés transversalement, présentent toujours une surface hélicoïdale, avec des échelons autour de l'axe de figure, comme un escalier tournant. En outre, le quartz amorphe, le cristal de roche qui a été rendu tel par fusion ou par dissolution dans l'acide fluorhydrique, le chlorate de soude fondu ou dissous dans l'eau, perdent leur pouvoir rotatoire. Mais s'il en est ainsi pour quelques cristaux, il est d'autres corps chez lesquels l'arrangement des molécules, loin d'être la cause de la polarisation rotatoire, est, au contraire, un obstacle à sa manifestation; et il faut, avec Biot, en chercher la source dans l'*action individuelle* des molécules de la substance. C'est ainsi que nous allons voir *des liquides* et même *des vapeurs* dévier le plan de polarisation. Dans les cristaux, l'arrangement des molécules ne fait souvent qu'entraver l'action, ou la déguiser; aussi le pouvoir rotatoire s'observe-t-il plus facilement quand ils appartiennent au système régulier, et nous avons vu qu'il est alors le même dans toutes les directions. Le sucre cristallisé donne à peine des signes de rotation, tandis que, rendu

amorphe à l'état de *sucré d'orge*, par la fusion, il agit fortement, et encore mieux et dans le même sens, quand il est en dissolution dans l'eau. Le camphre, qui, dissous, présente un pouvoir énergétique, est tout à fait inactif à l'état solide, etc.

Il y a des substances chez lesquelles l'action individuelle des molécules peut être accompagnée, à l'état solide, d'une influence provenant de l'arrangement régulier. C'est ainsi que le sulfate de strychnine présente à l'état solide, d'après M. des Cloizeaux, un pouvoir rotatoire 24 ou 25 fois plus grand qu'à l'état de dissolution, si dans les deux cas les rayons lumineux rencontrent dans leur trajet le même nombre de molécules.

On peut donc diviser les corps, relativement au pouvoir rotatoire, en trois classes : 1^o les solides, qui, cristallisés dans un système autre que le système régulier, doivent leur propriété à l'arrangement des molécules dans le cristal, comme le quartz, le chlorate de soude; 2^o ceux qui la doivent à la structure même de leur molécule, comme les essences, certains corps en dissolution; 3^o ceux dans lesquels l'action individuelle des molécules est accompagnée, dans l'état solide, d'une autre action provenant de l'arrangement régulier des molécules, comme le sulfate de strychnine. — Nous allons considérer les déviations produites par l'action individuelle des molécules des liquides.

II. Pouvoir rotatoire des liquides.

3134. Liquides doués de pouvoir rotatoire. — Biot a découvert, en 1815, que divers liquides, entre autres l'essence de térébenthine, font tourner le plan de polarisation; découverte que faisait Seebeck de son côté. Les huiles essentielles de citron, de laurier; la dissolution alcoolique de camphre; les dissolutions aqueuses de sucre, de dextrine, d'acide tartrique, des tartrates, possèdent aussi cette propriété, que Bouchardat a ensuite constatée dans les dissolutions des alcalis végétaux et de leurs composés. Les nombres qui suivent expriment les rotations du plan de polarisation des rayons rouges pour quelques liquides, sous une épaisseur de 1 millimètre. Le signe (+) indique les substances *dextrogyres*, et le signe (—) celles qui sont *lévogyres*.

quartz	essence de térébenthine ¹	solution alcoolique de camphre	essence de citron	sirop de sucre concentré
+18° 24' 50"	—16' 16"	+ 1' 5"	+ 26' 10"	+ 33' 14"

On voit que ces liquides dévient beaucoup moins que le cristal de roche; et Biot a constaté que leurs rotations suivent les mêmes lois que celles de ce dernier cristal, et qu'ils se colorent dans les mêmes conditions.

¹ On trouve des variétés d'essence de térébenthine, non-seulement présentant des rotations très-différentes, mais encore des rotations en sens inverse. Cela tient à l'espèce de pin dont elles sont extraites, et aussi aux procédés par lesquels on les a préparées et épurées. Le nombre cité est relatif à l'essence ordinaire française.

M. Lallemand, dans son beau mémoire sur l'illumination des liquides transparents (2960), a publié des expériences très-curieuses, sur la rotation produite par divers liquides¹. La lumière simple, polarisée dans un plan *horizontal*, traverse suivant la longueur, un tube horizontal de verre de 70 à 80^{cm}, fermé par des glaces et rempli d'une dissolution concentrée de sucre. En regardant perpendiculairement une section du tube rapprochée du bout par lequel entre le rayon polarisé, on voit une bande horizontale vivement illuminée; mais si l'on regarde dans une section de plus en plus éloignée de ce bout, on constate que, pour voir la bande brillante, il faut tourner autour du tube dans le sens de la rotation que produit la dissolution, comme si cette bande était tordue; et elle semble rencontrer les parois du tube suivant une hélice dont le pas est égal à la longueur d'une colonne de liquide qui dévierait le plan de polarisation, de 180°.

Quand la lumière polarisée est blanche, comme les divers rayons qui la composent éprouvent la rotation d'autant plus qu'ils sont plus réfrangibles (3117), la bande illuminée, qui paraît blanche près de l'entrée des rayons, se montre irisée et de plus en plus à mesure qu'on s'éloigne de cette entrée.

M. Lallemand a pu constater, par un moyen analogue, la rotation du plan de polarisation par une lame de quartz, en la plongeant dans un liquide dépourvu de pouvoir rotatoire, comme le collodion pur, l'alcool absolu; les deux parties de la bande illuminée avant et après la lame n'étaient pas dans le même plan, la seconde ayant tourné de la quantité dont la lame était capable de dévier le plan de polarisation.

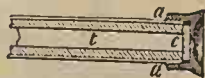


Fig. 2410.

3135. Appareil de Biot. — Pour observer la rotation par les liquides, on les enferme dans un tube de verre épais plus ou moins long *t* (fig. 2410), fermé à chacune de ses extrémités par un disque de verre *c* s'appliquant exactement sur ses bords rodés avec soin. Le tube est enveloppé d'une gaine de laiton, à l'extrémité de laquelle se visse une virole *aa*, qui presse le disque *c* contre l'extrémité du tube. Ce dernier se place entre un polariseur et un analyseur. On peut employer l'appareil de Norremberg en mettant le tube à la place de l'analyseur, qu'on transporte alors au-dessus du tube.

Quand on veut faire des expériences suivies, on emploie l'appareil de Biot: *bb'* (fig. 2411) est le tube contenant le liquide. Il reçoit de la lumière polarisée par réflexion sur un miroir mobile en verre noir *m*. En *p*, est l'analyseur, qui peut tourner sur lui-même, de quantités angulaires mesurées par le cercle gradué *r*; *l* est une petite lunette, à travers laquelle on observe les images colorées. On peut incliner le cercle gradué *r* autour du genou *o*, de manière à le placer perpendiculairement à l'axe du tube *bb'*. Pour cela, on remplace momentanément ce tube par une fourchette à trois branches *f*, dont les extrémités sont dans un plan perpendiculaire à la tige qui la porte, et avec lesquelles

¹ Annales de chimie et de physique, 4^e série, t. XXII, p. 223.

on fait coïncider le plan du cercle r . Le support de ce cercle peut s'allonger plus ou moins et peut se déplacer latéralement et longitudinalement, au moyen de vis de rappel v et v' , de manière qu'il soit facile d'amener le centre du cercle r exactement sur l'axe du tube bb' . Ce tube repose dans une cornière ou gouttière cc' , liée au polariseur m par la pièce d . Toute la partie mde' de l'appareil peut s'incliner plus ou moins en tournant autour du genou 0 . Des barres articulées t, t' passant à travers des pièces de fer u, u' qui peuvent glisser sur une fente longitudinale garnie d'une armature de fonte, servent à fixer l'appareil dans une position déterminée, au moyen des vis de pression u, u', u, u' .

Pour observer, on fait passer la partie m de l'appareil par l'ouverture du volet d'une chambre noire. On fait coïncider la section principale de l'analyseur

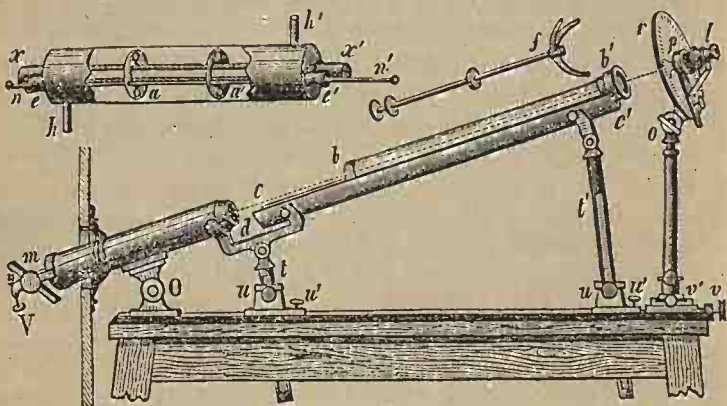


Fig. 2111. — 1/13.

avec le plan d'incidence, puis on place le tube, et l'on fait tourner l'analyseur jusqu'à ce qu'on obtienne de nouveau l'extinction d'une des images si l'on opère avec la lumière rouge, ou la teinte sensible si l'on se sert de lumière blanche ayant d'abord traversé une lame de quartz, ce qui est beaucoup plus précis.

Quand on veut opérer à différentes températures, on se sert d'un tube fixé dans une étuve cylindrique de laiton xx' (fig. 2111), dont on pose les extrémités x et x' sur les fourchettes qui terminent les barres t, t' , après avoir enlevé la gouttière cc' . L'étuve est traversée par un courant de vapeur passant par les tubes h, h' , ou bien on la remplit d'eau chaude qu'on agite au moyen des disques percés a, a' , mis en mouvement par la tige m' qui passe à travers des boîtes à étoupe e, e' .

Soleil a simplifié l'appareil de Biot, et l'a rendu portable : l'analyseur et le polariseur sont fixés à la gouttière cc' , qui est articulée par le milieu, à un pied

unique sur lequel on peut l'incliner plus ou moins. Une tringle, articulée par un bout à l'extrémité de la gouttière, et par l'autre à un anneau qui peut glisser sur la colonne du pied, assure la stabilité du système.

3136. De l'explication du pouvoir rotatoire des liquides. — L'absence de structure dans les liquides, montre que la rotation que produisent certains d'entre eux est due à l'influence individuelle de leurs molécules, et non à leur arrangement; et il est à remarquer que ces liquides contiennent toujours des molécules organiques et par conséquent de composition compliquée. — Pour montrer encore mieux l'absence d'influence de la position relative des molécules, Biot a fait tourner dans un tube rempli d'essence, un disque autour d'un axe passant dans son plan et perpendiculaire au tube. La teinte sensible donnée par un polariscope était la même, quand le disque était en repos et quand il tournait par un mouvement d'horlogerie, assez rapidement pour ne pas intercepter la lumière.

Double réfraction des liquides à pouvoir rotatoire. — Après la découverte de la déviation du plan de polarisation par l'essence de térébenthine, Fresnel a prouvé que ce liquide possède la double réfraction, et a pu dès lors lui appliquer la théorie qu'il avait établie pour le quartz.

1° Fresnel observa obliquement sous l'angle de polarisation, des anneaux colorés formés entre une plaque de verre et un prisme un peu convexe; il interposa dans le faisceau réfléchi une colonne d'essence de près de 2 mètres, et le nombre d'anneaux n'augmenta pas. Ayant ensuite placé un prisme biréfringent dans la lunette à travers laquelle il observait, il vit deux images présentant beaucoup plus d'anneaux qu'auparavant. Les nouveaux anneaux ne peuvent s'expliquer qu'en supposant une diminution dans la différence de marche des rayons réfléchis aux deux surfaces de la lame mince; c'est-à-dire en admettant qu'une partie, A, des rayons réfléchis à la première surface de cette lame a marché dans le liquide un peu plus lentement qu'une partie, B, de ceux qui sont réfléchis à la seconde surface, pour donner lieu aux nouveaux anneaux dans une des images; tandis que la partie A' des premiers rayons marchait un peu plus vite que la partie B' des autres, et donnait lieu aux nouveaux anneaux de l'autre image. A doit être sensiblement égal à A', et B à B'. Arago avait obtenu des résultats semblables, au moyen d'une lame de quartz perpendiculaire à l'axe au lieu d'une colonne d'essence.

2° La lumière polarisée par une pile de glaces traverse le tube d'essence, et vient se réfléchir sur les plaques de Brewster (2925). Au lieu d'un seul système de franges, on en distingue, avec une loupe, trois différents. Le premier, le plus intense, est formé par le concours des rayons qui ont subi la même réfraction dans l'essence; les deux autres par le concours de ceux qui ont été réfractés inégalement.

3137. Rotation du plan de polarisation de la chaleur par les liquides.

— Nous avons vu (3129) comment on a constaté la rotation du plan de polarisation de la chaleur par le quartz; il était important d'expérimenter le même phénomène

sur les liquides. C'est ce qu'ont fait MM. de la Provostaye et P. Desains¹. La chaleur solaire, venant d'une zone déterminée d'un spectre bien pur, était reçue par un prisme analyseur tourné de manière à détruire toute la chaleur du faisceau ordinaire; un tube rempli d'essence de térébenthine ou d'une dissolution de sucre, était ensuite interposé, et aussitôt l'aiguille du thermomultiplicateur indiquait l'arrivée de la chaleur. L'effet disparaissait quand on faisait tourner convenablement l'analyseur. On a reconnu ainsi que le plan de polarisation des rayons calorifiques est dévié dans le même sens et du même nombre de degrés que celui des rayons lumineux de même réfrangibilité. Cependant, il y a une différence quand on opère sur les rayons rouges extrêmes; ce qui tient à ce que, le faisceau calorifique étant assez large, on observe les effets de rayons obscurs, qui sont les plus intenses, pendant que les rayons lumineux reçus, qui sont plus réfrangibles, sont, par conséquent, un peu plus déviés. Les lois relatives à la rotation de la lumière par les liquides s'appliquent donc à la chaleur. L'identité se poursuit dans les détails les plus minutieux; ainsi, une dissolution de 31 de camphre dans 69 d'essence de térébenthine fait éprouver sensiblement la même rotation à tous les rayons colorés; et MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé qu'il en est de même des rayons de chaleur qui accompagnent la lumière verte et la lumière rouge du spectre.

3138. LOI DE BIOT. — Quand l'effet n'est dû qu'à l'influence individuelle des molécules, et que ces molécules n'éprouvent pas de modifications de structure pendant les expériences, la rotation du plan de polarisation est proportionnelle au nombre des molécules rencontrées par les rayons lumineux, quel que soit l'écart qu'elles peuvent avoir reçu de la part de la chaleur ou de divers dissolvants inactifs. Biot, qui a découvert cette belle loi, l'a établie sur de nombreuses expériences². Par exemple, ayant fait passer des rayons polarisés dans un tube rempli d'essence de térébenthine, il vit la couleur observée dans une certaine position de l'analyseur, rester la même à -10° et à 100° , quand les colonnes liquides avaient des longueurs en raison inverse des densités aux deux températures. — L'essence de térébenthine mêlée de différentes huiles grasses, ou d'éther, en remplissant le tube, en partie, de cette essence, achevant de remplir avec l'autre liquide et mélangeant, donne la même couleur que l'essence seule. — Les essences de térébenthine et de citron mélangées en quantités proportionnelles aux déviations inverses qu'elles font subir au plan de rotation de la lumière rouge, donnent un mélange complètement inactif. — Le camphre artificiel formé par la combinaison d'essence de térébenthine et d'acide chlorhydrique, qui est inactif, étant dissous dans l'alcool, produit dans la lumière rouge une déviation à gauche, de 24° ; le calcul, d'après la densité de l'essence seule dans la combinaison, donne $26^{\circ} 36'$, nombre peu différent. Ce camphre

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXX, p. 267.

² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. X, pp. 5, 175 et 307.

artificiel dissous dans l'essence, donne la rotation de l'essence contenue dans le camphre, jointe à celle de l'essence qui le dissout. — Nous verrons (3143) dans quelles conditions cette loi se vérifie.

3139. Pouvoir rotatoire moléculaire. — Biot nomme *pouvoir rotatoire moléculaire* ou *spécifique* d'une substance, la déviation du plan de polarisation qu'elle produit sous une épaisseur égale à l'unité, et en supposant sa densité ramenée à l'unité par une modification convenable de la distance de ses molécules. Pour évaluer ce pouvoir, considérons une substance, de densité d , et déviant le plan de polarisation des rayons rouges, d'une quantité α sous l'épaisseur l . Le pouvoir spécifique ρ sera, d'après les lois ci-dessus :

$$\rho = \frac{\alpha}{dl};$$

S'il s'agit d'une dissolution dans un liquide inactif, d représentera la densité de la substance active dissoute. Cette densité se calcule facilement quand on connaît le poids de cette substance et celui du dissolvant; car, appelons p et π ces poids, d la densité de la substance active sous le volume v de la dissolution, et δ la densité de celle-ci, on aura $d = p : v$. On a aussi $v = \frac{p + \pi}{\delta}$; donc, $d = \frac{p\delta}{p + \pi}$. Remplaçant d par cette valeur dans la formule précédente, il vient

$$[1] \quad \rho = \frac{\alpha(p + \pi)}{lp\delta}; \quad \text{d'où} \quad \alpha = \rho \frac{lp\delta}{p + \pi}. \quad [2]$$

La formule [2] donne, en fonction de ρ , la déviation α produite par une colonne l de la substance, mêlée avec une substance inactive, dans la proportion de p à π en poids, la densité du mélange étant δ .

Mélanges. — Si l'on a deux substances actives mélangées ne modifiant pas mutuellement leur action rotatoire, on calculera séparément les déviations de chacune d'elles comme si elle était seule, et on les ajoutera ou on les retranchera suivant qu'elles tournent dans le même sens, ou en sens contraire. Soient α et α' les déviations produites par l'unité de longueur des deux solutions ayant des densités δ et δ' ; p , p' les poids de ces solutions, dont le mélange pèse P et dont la densité est D ; soit enfin L , la longueur de la colonne de mélange traversée par la lumière, on aura, pour la déviation,

$$x = \frac{LD}{P} \left(\frac{\alpha}{\delta} p \pm \frac{\alpha'}{\delta'} p' \right) = \frac{LD}{P} (\rho p \pm \rho' p');$$

car on a $\alpha = \rho\delta$, et $\alpha' = \rho'\delta'$. — Si l'on veut que les deux solutions se neutralisent quand elles agissent en sens inverse, il faut que l'on ait $xp : \delta = x'p' : \delta'$; ou $xv = x'v'$, en appelant v et v' les volumes mélangés, et remplaçant p par $v\delta$ et p' par $v'\delta'$; ce qui exprime que les dissolutions

doivent être mélangées en volumes inversement proportionnels aux déviations qu'elles produisent séparément sous l'unité de longueur. Biot a vérifié ce résultat avec les rayons rouges, sur des mélanges d'essence de térébenthine et d'essence de citron; et sur des mélanges de sirop de sucre ordinaire, qui tourne à droite, et de sirop de sucre *inverti*, c'est-à-dire rendu *lévogyre* par l'action de l'acide chlorhydrique.

En mesurant le pouvoir rotatoire spécifique d'une même substance sous différents états, à différentes températures, dissoute, ou combinée, on pourra reconnaître si les molécules ont, dans ces différentes circonstances, été altérées dans leur constitution, ou, dans le cas de corps solides, si elles ont reçu un arrangement différent. Si le pouvoir rotatoire n'a pas changé, c'est que les molécules n'ont été modifiées ni dans leur structure, ni dans leur arrangement. Dans le cas contraire, il y a eu des modifications permanentes ou passagères.

3140. Approximation de la loi de Biot. — Les résultats sur lesquels a été établie la loi de Biot ne sont pas aussi nets qu'on l'avait cru d'abord. Cette loi n'est qu'une loi limite, dont même beaucoup de substances s'écartent notablement, les molécules actives éprouvant presque toujours des modifications de structure en présence du dissolvant, ou formant avec lui des groupes moléculaires variables. C'est ce que Biot avait reconnu lui-même, comme nous le verrons (3143). M. Oudemans a fait des expériences nombreuses à ce sujet, en employant la lumière jaune du sodium¹. Il a constaté que la loi s'applique rigoureusement à certains corps, comme la phlorizine, et à très-peu près au sucre de canne, à l'essence légère de cubèbe, ... Mais les alcaloïdes et leurs sels s'en écartent beaucoup. Ainsi, les pouvoirs rotatoires de la cinchonine dissoute dans l'alcool ou le chloroforme, sont 228° et 212°; de la brucine dans les mêmes liquides, 35° et 127°; de l'azotate de cinchonine dans l'eau et l'alcool, 154° et 172°. — Il suffit quelquefois de quelques gouttes d'un liquide dans une dissolution, pour modifier son pouvoir; ainsi, $\frac{1}{500}$ d'alcool dans la solution de cinchonine dans le chloroforme, élève son pouvoir de plus de 4°.

3141. Effets de la chaleur sur le pouvoir rotatoire des liquides. — Nous avons vu que le pouvoir rotatoire du cristal de roche *augmente* par la chaleur; ses molécules changent donc de positions relatives quand on l'échauffe; ce que nous savions, du reste, ce cristal se dilatant d'une manière différente parallèlement et transversalement à l'axe (II, 1001).

L'essence de térébenthine n'est pas dans le même cas; car, à 55°, et même quand elle est congelée, elle conserve sensiblement le même pouvoir qu'à 10°. Toute la chaleur est donc employée à écarter les molécules, aucune partie sensible ne pénétrant dans leur intérieur pour en modifier la structure, et la solidification ne leur donnant pas d'arrangement régulier.

L'acide tartrique en dissolution dans l'eau présente un pouvoir moléculaire

¹ *Annales de Poggendorff*, t. CXLVIII (1873), p. 337, et *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. II, p. 223.

qui croît avec la température et reprend les mêmes valeurs quand elle redescend. Laurent a trouvé moyen de fondre cet acide solide, sans perte d'eau, et de l'obtenir en masses solides amorphes transparentes, et Biot a reconnu que, dans cet état, la chaleur a aussi une influence marquée sur le pouvoir rotatoire, qui est à droite, à 20°, diminue par le refroidissement, devient nul, puis tourne à gauche. A la température de 3°, et sous l'épaisseur de 0^m,07, la déviation est de — 3°,3, pour les rayons rouges.

Le pouvoir spécifique des sels de quinine augmente aussi notablement et d'une manière passagère, pour des températures qui ne dépassent pas celles de l'atmosphère. Les solutions de sucre de raisin et d'une foule d'autres substances éprouvent des variations analogues.

M. D. Gernez¹ a étudié avec beaucoup de soin l'influence de la température sur divers liquides, par la méthode de MM. Fizeau et Foucault, employée par M. Brocq (3120). Comme les inégalités de température dans la colonne liquide auraient empêché de distinguer les raies spectrales, il plaçait après cette colonne et l'analyseur, le collimateur d'un spectroscopie, dont la fente était remplacée par le foyer linéaire très-étroit et très-brillant d'une lentille cylindrique. Le tube de laiton contenant le liquide était placé horizontalement dans la partie centrale d'une étuve à double enveloppe, disposée comme celle qui sert à marquer le point d'ébullition du thermomètre (II, 822). Il était soutenu par des prolongements tubulaires traversant la double paroi. La température était donnée par des vapeurs d'eau bouillante, ou d'essence de térébenthine qui était condensée dans un serpentín refroidi. D'autres expériences étaient faites en portant la colonne à zéro dans la glace fondante. — Il résulte des expériences faites sur les essences d'orange, de térébenthine et de bégarrade, que le pouvoir rotatoire de ces liquides va en diminuant quand la température s'élève, et que, jusqu'à 160°, il peut être représenté par la formule parabolique $\alpha = a - bt - ct^2$, dans laquelle c est très-petit. M. Gernez a reconnu, en outre, que la loi des dispersions, étudiée sur les raies C, D, E, F, G est la même pour les trois essences.

3142. Pouvoir rotatoire des vapeurs. — Biot, lors de ses recherches sur la polarisation rotatoire spécifique, remarqua que, si la loi était vraie en principe, le passage d'un liquide à l'état de vapeur, en l'absence de tout dissolvant, ne devrait pas changer son pouvoir spécifique, et il entreprit de vérifier ce qu'il en est, sur la vapeur d'essence de térébenthine, pensant d'ailleurs que si elle perdait son pouvoir rotatoire, on serait en droit d'admettre que dans le passage à l'état gazeux, ses molécules éprouvent quelques modifications dans leur état².

Comme les molécules de la vapeur sont très-écartées, il crut devoir opérer sur une longue colonne. L'appareil, installé dans l'orangerie du Luxembourg,

¹ *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, t. I (1864), p. 4.

² *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. II (1818), p. 125.

à Paris, se composait d'un tube de fer-blanc de 30^m de longueur, fermé à ses extrémités par des glaces et enveloppé dans toute sa longueur, d'un second tube plus gros. Le tout était soutenu par des cordes tendues par des contre-poids, afin de maintenir le tube rectiligne, malgré les changements de température. A une extrémité était un miroir vertical de verre noir renvoyant dans le tube la lumière d'une lampe, et à l'autre, l'analyseur, mobile sur un cercle gradué. La vapeur d'essence venant d'une petite chaudière, fut d'abord introduite dans le tube enveloppant, puis, quand le tube intérieur fut échauffé, on ouvrit des robinets, et elle passa dans ce dernier tube, entrant par une extrémité et sortant par l'autre. Tant que ce tube resta plein d'air, l'analyseur donna une seule image qui était blanche; mais, dès que la vapeur l'eut rempli, l'image blanche se colora, et la seconde image apparut, avec la couleur complémentaire. Malheureusement, au moment où Biot allait mesurer la déviation du plan de polarisation, la chaudière éclata, une immense flamme s'éleva jusqu'au plancher supérieur, et occasionna un incendie qui exigea les secours publics.

Cette expérience célèbre, quoique incomplète, avait prouvé que l'essence de térébenthine possède encore un pouvoir rotatoire quand elle est à l'état de vapeur; mais la question demandait à être reprise. C'est ce qu'a fait M. Gernez, vers 1863, en opérant sur les vapeurs du camphre et des essences de térébenthine, d'orange et de bigarade. Ayant à sa disposition la méthode si précise de MM. Fizeau et Foucault, il put expérimenter sur des colonnes de 4^m seulement.

L'appareil employé se compose de deux tubes de fer placés l'un dans l'autre, et fermés par des glaces. L'intervalle qui les sépare est rempli d'huile, que l'on chauffe en dehors, au moyen d'un tuyau parallèle percé d'une série de trous par lesquels s'échappe du gaz enflammé. Ce tuyau est relié avec le système des tubes de fer, de manière à lui rester parallèle, malgré les dilatations irrégulières. Comme les essences chaudes s'altèrent au contact de l'air, on chassait ce gaz au moyen d'un courant d'acide carbonique sec, pendant qu'on chauffait la couche d'huile. Quand on avait atteint une température un peu supérieure à celle de l'ébullition de l'essence, on ouvrait un robinet qui laissait couler dans le tube central un peu de ce liquide, contenu dans un entonnoir supérieur; la vapeur se formait et chassait le gaz carbonique, et l'on faisait les observations au moyen du spectroscopé (3141). M. Gernez a constaté d'abord, en opérant sur les raies D, E, F, G, que les vapeurs du camphre et des trois essences étudiées, suivent les mêmes lois de dispersion du plan de polarisation, à l'état liquide et à l'état de vapeur; car, pour chaque substance, il a trouvé sensiblement le même rapport entre les pouvoirs de deux mêmes raies quelconques. Il suffisait donc, dès lors, d'expérimenter sur une seule couleur; la teinte sensible fut naturellement choisie, et il n'y avait qu'à remplacer le polariscopé par une simple lunette.

M. Gernez a reconnu ainsi que le pouvoir spécifique est de même signe et de même valeur à l'état liquide et à l'état de vapeur, pour la même température. Comme il n'est pas possible d'opérer sous les deux états à une même tempéra-

ture, on construisait la courbe des pouvoirs à l'état liquide, et à des températures différentes prises pour abscisses, dont la plus élevée se rapprochait le plus possible du point d'ébullition, et l'on constatait que la courbe restait continue quand on construisait ensuite un point correspondant au pouvoir rotatoire à l'état de vapeur. — On voit donc que les molécules des quatre substances étudiées ne sont pas altérées pendant leur passage à l'état de vapeur.

III. Application de la polarisation rotatoire moléculaire.

3143. Applications aux dissolutions. — Biot a employé la polarisation rotatoire à la détermination de l'état dans lequel se trouvent les molécules d'une substance active dissoute dans un liquide inactif; état que la chimie est souvent impuissante à découvrir. On distingue à cet égard 4 cas :

1^o Il peut arriver que le dissolvant n'ait pas d'autre effet que d'écarter les molécules des corps dissous, sans se combiner avec elles et sans en modifier la structure et les propriétés. Alors le pouvoir, ρ , reste le même à l'état solide et à l'état de dissolution.

2^o Le dissolvant inactif peut, en petite quantité, produire son *maximum* d'effet sur une partie des molécules, soit en se combinant avec elles, soit en y adhérant simplement et modifiant leur action sur la lumière. Si l'on augmente la quantité du dissolvant, le nombre des molécules ainsi modifiées augmentera, et la valeur de ρ variera d'une manière continue, jusqu'à ce que toutes les molécules aient éprouvé la même altération. Alors une plus grande quantité de dissolvant ne modifiera plus le pouvoir spécifique, et le composé formé rentrera dans le premier cas; mais il s'en distinguera en ce que la valeur de ρ variera avec la nature du dissolvant. En ajoutant de la substance dissoute avant d'arriver à la limite, on modifiera la valeur de ρ , d'une quantité que l'on pourrait calculer au moyen du pouvoir moléculaire propre à cette substance (3139).

3^o Toutes les molécules peuvent être partiellement et également affectées par le dissolvant pris en petite quantité; leur altération augmente avec cette quantité d'une manière continue, jusqu'à ce qu'elles aient toutes subi le *maximum* de modification de la part du liquide; ρ varie donc encore d'une manière continue, pour rester ensuite constant. En ajoutant de la substance dissoute, la valeur de ρ est modifiée d'une manière qui dépendrait d'un pouvoir moléculaire différent de celui qui est propre à la substance pure.

4^o Enfin, il peut arriver que le dissolvant, après s'être combiné avec toutes les molécules, ne fasse que les diluer, ce qui laisserait ρ constant, jusqu'à ce que la quantité en soit tellement augmentée, qu'il puisse former une nouvelle combinaison, d'après la loi des proportions multiples de la chimie; alors ρ changerait brusquement de valeur, pour rester de nouveau constant jusqu'à ce qu'il se forme une nouvelle combinaison définie.

3144. Application à divers cas. — Biot a reconnu que le premier cas

paraît être un cas idéal qui n'est jamais réalisé rigoureusement ¹. Les substances qui s'en rapprochent sont toutes organiques; telles sont l'essence de térébenthine dissoute dans l'alcool ou les huiles, ou combinée avec l'acide chlorhydrique; la gomme, le camphre dissous dans l'eau, l'alcool ou l'éther. Le pouvoir rotatoire de ces substances s'accroît légèrement avec la quantité de dissolvant, excepté pour le camphre, qui donne une diminution. Le sirop de sucre de canne éprouve une légère augmentation, mais très-faible; car des expériences précises de M. Arndtsen, faites par la méthode de M. Broch (3120), ont donné les mêmes valeurs de ρ pour des dissolutions contenant 0,3, 0,4 et 0,6 de sucre, et en opérant sur les rayons colorés correspondant à cinq des principales raies du spectre. Biot a aussi reconnu que la modification moléculaire produite par le dissolvant, demande quelquefois un temps très-long pour être complète; par exemple, le pouvoir des dissolutions d'essence dans l'alcool ou les huiles, augmente encore sensiblement après plusieurs mois. Ainsi, pour la plupart des substances actives, les molécules sont impressionnées par celles du dissolvant, et l'on peut regarder ces substances comme formant avec lui, des systèmes liquides dont toutes les molécules sont dans un état actuel de combinaison, déterminé par leur mutuelle présence et sans proportions définies. Cette conclusion est surtout confirmée par les propriétés de l'acide tartrique, chez lequel les phénomènes sont tellement prononcés qu'ils ont conduit Biot à reprendre ses expériences sur les autres substances, et à généraliser des propriétés qui paraissaient d'abord n'appartenir qu'à cet acide.

Acide tartrique. — Cet acide nous présente un exemple remarquable du troisième cas ². Biot a étudié les dissolutions de ce corps dans l'eau, l'alcool et l'esprit de bois, et a vu la valeur de ρ augmenter rapidement avec la proportion de dissolvant (tandis que cette valeur n'est que de $4^{\circ},6$ pour 0,4 d'eau, elle devient $12^{\circ},37$ pour 0,95 de ce liquide), et il a représenté les résultats de ses expériences par la formule $\rho = A + Be$, dans laquelle e représente la proportion de dissolvant, B une constante qui dépend de sa nature, et A une autre constante, la même pour tous les dissolvants, croissant avec la température, et qui exprime le pouvoir moléculaire propre à l'acide seul. Cette formule représente une ligne droite, et les valeurs des constantes sont telles, qu'elle fait un angle très-petit avec l'axe sur lequel on porte les valeurs de ρ . Aussi Biot a-t-il soupçonné que cette droite n'était que la tangente initiale de la courbe qui exprime la loi; il a alors posé $\rho = A + \frac{Be}{e+C}$, équation qui donne les résultats de l'expérience, et qui représente une hyperbole équilatère ayant ses asymptotes parallèles aux axes des coordonnées. Il résulte de là que le pouvoir spécifique des dissolutions d'acide tartrique augmente indéfiniment avec la quantité d'eau. Chaque proportion de ce liquide correspond donc à une modifi-

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXVI, p. 257.

² *Ann. de ch. et de ph.*, 3^e série, t. X et XI, et *Mém. de l'Ac. des sc.*, t. XVI.

cation incomplète de toutes les molécules du liquide ; ou, en d'autres termes, « l'acide, en quelque faible proportion qu'il soit, impressionne toute la masse d'eau mise en sa présence. »

Biot a aussi étudié les mélanges de solutions aqueuses d'*acide tartrique* avec des proportions variables d'*acide borique*, qui est inactif. Il a reconnu que les pouvoirs du mélange augmentent rapidement avec les quantités du dernier acide. Par exemple la solution contenant 25 pour 100 d'acide tartrique, et donnant $\rho = 9^{\circ},87$, ayant reçu 0,0018 d'acide borique, a donné $\rho = 11^{\circ},05$; et avec la proportion de 0,049, $\rho = 37^{\circ},35$. Les courbes représentant les variations de ρ comparées à celles des quantités d'acide borique, sont encore des hyperboles équilatères. — Si l'on mêle l'acide borique à l'acide tartrique à l'état solide, en les faisant fondre et coulant le mélange dans des vases chauds, où il se solidifie sans cristalliser, on trouve aussi que ρ augmente rapidement d'une manière continue avec la proportion d'acide borique.

Alcaloïdes dissous dans les acides. — Les alcalis végétaux dissous dans les acides ont donné à Bouchardat des résultats variés¹. Tandis que la *morphine* mêlée aux acides possède le même pouvoir moléculaire que lorsqu'elle est dissoute dans l'eau, ce qui permet d'admettre que ses molécules ne sont pas altérées, la *narcotine*, lévogyre avec l'eau, l'alcool et l'éther, devient dextrogyre avec les acides ; interversion remarquable, qui prouve que ses molécules sont modifiées par le contact des acides. De plus, l'altération persiste en partie ; car, si l'on chasse l'acide par l'ammoniaque, la dissolution filtrée reprend bien la rotation à gauche, mais elle est moins prononcée qu'auparavant.

La *strychnine*, la *brucine*, dissoutes dans l'alcool ou l'eau légèrement acidulée, tournent à droite, et la *cinchonine* à gauche. Les acides diminuent l'action, mais d'une manière passagère, car elle reprend sa première énergie quand on chasse l'acide au moyen d'une base. L'ammoniaque combinée à la *brucine* en augmente un peu le pouvoir rotatoire.

Les dissolutions de *quinine* sont toutes lévogyres, et les acides augmentent passagèrement leur pouvoir spécifique. La solution concentrée de sulfate de quinine dans l'eau aiguillée d'acide sulfurique, donne $\rho = -192^{\circ},95$, à la température de 21° . En partant de ce nombre, on peut reconnaître par une opération rapide, l'état de pureté de ce sel si souvent falsifié.

3145. Applications à la chimie. — On voit que le pouvoir rotatoire donne sur l'état chimique de certains composés, des indications que l'analyse ordinaire ne pourrait fournir ; car celle-ci ne fait connaître, en général, que les éléments et leurs proportions, sans tenir compte de leur mode d'arrangement. Biot a donc doté la mécanique chimique d'une méthode précieuse, qui permet de pénétrer, jusqu'à un certain point, dans la constitution moléculaire des composés dont un des éléments exerce le pouvoir rotatoire, et qui a déjà conduit à un grand nombre de résultats importants. Citons quelques exemples.

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. IX, p. 213.

Par cette méthode, on peut suivre pas à pas les changements que subissent certains composés organiques, comme la transformation des fécules, de la gomme en sucre, sous l'influence des acides étendus. — On peut distinguer les uns des autres les sucres de différents végétaux. — Le sucre de raisin est dextrogyre quand il est frais ; mais s'il a été une fois solidifié, sa dissolution dans l'eau est désormais lévogyre : il a donc éprouvé une modification moléculaire que les méthodes chimiques ne peuvent indiquer. — On reconnaît que la dissolution aqueuse de gomme, qui tourne de 12° à droite, tourne de 22° à gauche après avoir été traitée par les acides étendus. Le sucre de canne qui tourne de 42° à droite, tourne de 15° à gauche après avoir été *inverti* par les acides. La dextrine, dextrogyre, comme le rappelle son nom, se transforme en sucre par l'acide sulfurique faible, et son pouvoir rotatoire diminue, passant de 60° à 30° environ. Celui du sucre de lait, sous la même influence, augmente, au contraire, de 16° à 20° .

On a pu suivre pas à pas, par le même procédé et d'après les quantités de sucre contenues, les transformations des sucres des végétaux, pendant leur passage des racines dans la tige et les feuilles, et leur retour vers les racines ; les changements des fruits à mesure qu'ils approchent de l'état de maturité. On a pu également, en évaluant la quantité de sucre contenue dans les urines des malades affectés du diabète sucré, constater l'existence et suivre les phases de cette cruelle maladie. Bouchardat a fait, à l'Hôtel-Dieu de Paris, un grand nombre d'observations sur ce sujet.

Enfin, les substances *isomères*, composées des mêmes éléments dans les mêmes proportions, peuvent être distinguées les unes des autres par leur pouvoir rotatoire. Par exemple, l'acide tartrique et les tartrates tournent à gauche, et l'acide paratartrique et ses sels n'ont pas de pouvoir rotatoire.

3146. Application à la saccharimétrie. — Le pouvoir rotatoire des dissolutions sucrées a fourni à Biot une méthode rapide et sûre de reconnaître la proportion de sucre de canne qu'elles contiennent, même quand ce sucre est mélangé avec d'autres espèces de sucre dont le pouvoir rotatoire est différent du sien. M. Clerget a publié un Mémoire sur cette méthode, qu'il a appliquée à l'étude comparative des jus de canne à sucre et de betterave de différentes provenances, du jus de raisin, des sucres bruts, des mélasses, etc.¹ Si, d'abord, on sait d'avance qu'il n'entre pas dans le corps à analyser d'autre matière à pouvoir rotatoire que le sucre de canne, on dissout ce corps dans l'eau, en proportion connue, et l'on cherche la déviation produite dans l'appareil de Biot. Les formules (3139) donnent alors la proportion de sucre contenu dans un poids p de la substance employée, ρ étant supposé connu.

Quand le sucre de canne est mélangé avec d'autres espèces de sucre, pour le doser, on s'appuie sur sa propriété d'être transformé par les acides en sucre de raisin qui tourne à gauche, transformation qui n'a pas lieu pour les autres

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVI, p. 175.

substances que contiennent les sucres végétaux, ni pour les sucres bruts et les mélasses. Après avoir clarifié et décoloré la dissolution au moyen du sous-acétate de plomb, qui coagule et précipite la substance colorante sans rien changer au pouvoir rotatoire, on observe la rotation qu'elle produit. On transforme ensuite le sucre de canne en sucre interverti, en mêlant à la dissolution 0,01 en volume d'acide chlorhydrique fumant, chauffant au bain-marie à 68°, pendant 10 minutes, et refroidissant le vase dans l'eau. On mesure alors la nouvelle déviation, en mettant la liqueur dans un tube plus long de 0,01, pour tenir compte du volume d'acide ajouté. La différence entre cette déviation et la précédente, représente la somme des déviations individuelles du sucre de canne et du sucre interverti qui l'a remplacé. En effet, si le premier était seulement supprimé, on aurait une certaine différence, et cette différence s'accroît de l'effet inverse du sucre interverti qui a remplacé le sucre de canne.

Mitscherlich ayant reconnu que la chaleur modifie sensiblement le pouvoir rotatoire du sucre lévogyre, M. Clerget a construit une table qui permet de calculer le titre exact du sucre de canne, d'après l'expérience, quand on connaît la température, qu'on évalue en introduisant par une tubulure latérale un thermomètre, dont on soulève le réservoir pendant les observations, pour ne pas intercepter la lumière. — Les expériences de M. Clerget ont été

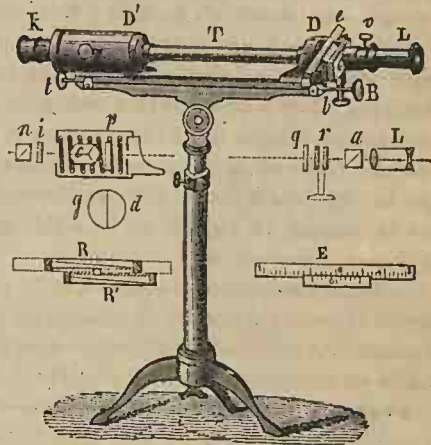


Fig. 2112. — 1/10.

faites d'abord avec l'appareil de Biot (3135), puis avec l'instrument suivant.

3147. Saccharimètre de Soleil. — Cet appareil (fig. 2112) contient une série de pièces dont on voit la coupe en nL . Le tube T , rempli de la dissolution sucrée, est placé entre deux diaphragmes percés; l'un, D , est fixe; l'autre, D' , peut s'écarter du premier, vers lequel il revient en obéissant à un ressort à boudin dont on voit la coupe en p , de manière à maintenir le tube et à faciliter son installation. La lumière incidente est polarisée par un prisme achromatisé c , à une seule image. En p est un biquartz à rotations inverses, gd , dont le diamètre de jonction est vertical. La lumière, après avoir traversé ce biquartz p , puis le tube T , arrive à une lame de quartz q normale à l'axe, traverse un compensateur r , est analysée par le prisme biréfringent a , et enfin est reçue dans une petite lunette de Galilée L .

On voit en RR' la coupe horizontale du compensateur, composé de deux

plaques prismatiques de quartz taillées perpendiculairement à l'axe, et de même rotation, contraire à celle de la lame q . Ces prismes peuvent glisser l'un sur l'autre horizontalement et en sens inverse, de manière à faire varier l'épaisseur traversée par la lumière. Le mouvement leur est imprimé par un pignon denté fixé au bouton b , et agissant sur deux crémaillères adaptées à la partie inférieure des montures des plaques, comme on le voit en RR' . Une des montures porte une échelle d'ivoire e , représentée à part en E ; et l'autre, un vernier qui glisse en sens contraire de l'échelle, et sert à mesurer les déplacements opposés des deux plaques.

Quand les zéros de l'échelle et du vernier coïncident, les deux plaques coïncident dans toute leur longueur, et la somme de leurs épaisseurs est égale à l'épaisseur de la lame q , dont l'effet rotatoire se trouve alors annulé. On peut ensuite, au moyen d'une vis sans fin v , donner à l'analyseur a une position telle que les deux moitiés du biquartz p présentent la teinte sensible. Si alors on installe le tube T , les deux moitiés g et d paraissent de couleur différente; et pour les ramener à l'égalité, il faut, au moyen du compensateur r combiné avec la plaque q , produire une rotation inverse de celle du liquide, soit en augmentant l'épaisseur du compensateur r , soit en la diminuant pour laisser dominer l'effet de la plaque q . Le sens dans lequel on fait marcher le vernier sur la règle, qui porte deux divisions opposées à partir du zéro, indique le sens de la rotation du liquide, et le déplacement du vernier donne l'angle de déviation, quand on sait à quelle épaisseur de quartz correspond une division de la règle. Ordinairement chaque division correspond à $0^{\text{mm}},1$, dont le vernier donne encore les dixièmes; de sorte qu'on évalue les centièmes de millimètre. La moitié de cette quantité suffit pour produire une différence de nuance appréciable dans les deux parties du biquartz.

Producteur des teintes sensibles. — Quand la lumière ou le liquide que l'on emploie sont colorés, leur couleur modifie la teinte sensible et nuit à l'observation. Pour neutraliser cette couleur, Soleil ajoute à l'extrémité k , un prisme biréfringent n , et une lame de quartz i , fixés dans une douille qu'on fait tourner sur elle-même au moyen d'une roue dentée sur laquelle on agit par la tige à pignon tB , la lame i est placée entre deux prismes n et c , dont le second fait l'office d'analyseur, et elle donne une couleur qu'on fait varier en faisant tourner le prisme n . On cherche la position de ce prisme, donnant une teinte capable de neutraliser sensiblement celle du liquide ou celle de la lumière employée. — Dans l'instrument qui suit, on n'a plus de couleurs à observer, de sorte qu'en n'a plus besoin de neutraliser la teinte que peut présenter le liquide à étudier.

3148. Saccharimètre à pénombre. — Cet appareil très-simple est dû à MM. Cornu et J. Duboscq. Le tube à liquide est placé entre deux diaphragmes, comme dans le saccharimètre précédent. En o (fig. 2113) est un nicol analyseur pouvant tourner sur lui-même de quantités mesurées sur un cercle gradué, et suivi d'une petite lunette, comme dans l'appareil précédent. La lumière,

fournie par une lampe Drummond ou par un brûleur de Bunsen, donnant la flamme jaune du sodium, est polarisée par un *nicol coupé*, ou de *Jellet*, qui constitue la partie originale de l'appareil, et se construit de la manière

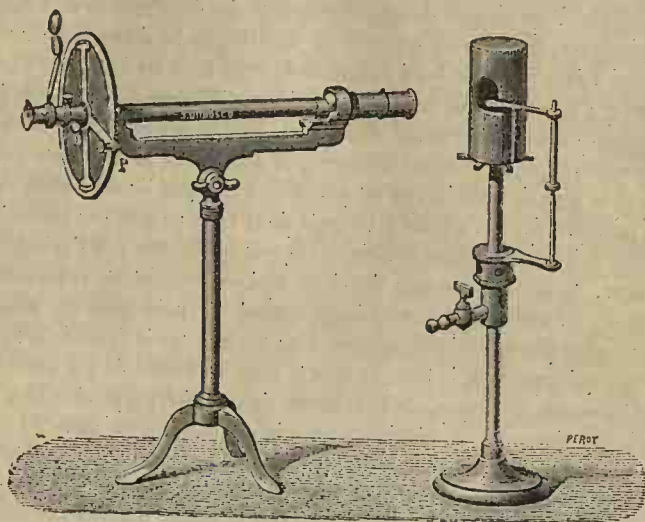


Fig. 2113.

suivante. Soit ABCD (fig. 2114) la base d'un nicol ordinaire dont la section principale est suivant AC. On le coupe suivant deux plans parallèles aux arêtes et inclinés d'un angle α de chaque côté de cette section, on enlève la masse en forme de coin qui remplit l'angle 2α , on rapproche et l'on colle les deux parties, de manière à former un nouveau prisme mDCB (fig. 2115). La section principale de la moitié de droite est alors

reportée en CA₁, formant un angle α avec mC, et celle de la moitié de gauche, en CA₂. Si l'on reçoit la lumière qui a traversé ce système, dans l'analyseur ayant sa section principale perpendiculaire à CA₁, toute la lumière de la moitié de gauche de l'ouverture du diaphragme



Fig. 2114.

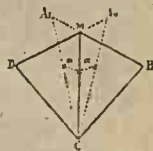


Fig. 2115.

sera éteint, tandis que celle de la moitié de droite conservera une partie de son éclat. Ce serait le contraire si la section de l'analyseur était perpendiculaire à CA₂. Si cette section est perpendiculaire à la bissectrice mC, faisant le même angle avec CA₁ et CA₂, les deux moitiés seront également éclairées. Si maintenant on interpose le tube contenant le liquide rotateur, le plan de polarisation

sera dévié, les deux moitiés paraîtront inégalement sombres, et l'angle dont il faudra faire tourner l'analyseur pour les ramener à l'égalité représentera la déviation produite.

Saccharimètre Laurent. — Ce saccharimètre perfectionné est à sensibilité variable. Pour obtenir la teinte changeante des deux moitiés de l'ouverture du diaphragme, M. Laurent recouvre la moitié gauche d'une lame de quartz parallèle à l'axe, auquel le bord diamétral de cette lame est lui-même parallèle. Cette lame a une épaisseur correspondant à une différence de marche de $\frac{1}{2} \lambda$ des rayons jaunes dont on fait usage. Ces rayons sont polarisés par un prisme dont on ne conserve que le faisceau ordinaire, et donnent la même teinte aux deux moitiés si le plan de polarisation est parallèle à la ligne de séparation; car les rayons polarisés dans la section principale de la lame ne sont pas modifiés en la traversant suivant sa section principale, et cela quelle que soit l'orientation de l'analyseur, la teinte commune des deux moitiés, variant du reste avec cette orientation. Si maintenant nous faisons tourner le polariseur de manière à incliner le plan primitif de polarisation, d'un angle α sur la ligne de séparation, les rayons qui traversent la lame de quartz étant en retard de $\frac{1}{2} \lambda$ sur ceux qui passent librement, la composante de la vitesse de vibration perpendiculaire à l'axe changera de signe, et sa résultante avec la composante parallèle à l'axe fera avec la ligne de séparation, mais du côté opposé, le même angle que la vitesse des rayons passant librement. Il y aura donc du côté de la lame un plan de polarisation faisant avec la ligne de séparation le même angle α que le plan de polarisation primitif, et nous sommes dans le même cas qu'avec le premier appareil; seulement, ici, on peut faire varier α à volonté en tournant plus ou moins le prisme polariseur. Cette facilité permet d'opérer sur des sirops colorés, auxquels les saccharimètres chromatiques ne pourraient s'appliquer.

3149. Saccharimètres à franges. — M. Wild, de Berne, a imaginé un saccharimètre à polariseur mobile, dans lequel il a utilisé les franges du polariscopes de Savart (3082). Dans cet appareil qu'il nomme *polaristrobomètre*, le polariseur est fixé au centre d'un cercle gradué qu'on fait tourner au moyen d'une longue tige à pignon denté. Les rayons polarisés, après avoir traversé la colonne à pouvoir rotatoire, rencontrent un polariscopes de Savart, une petite lunette et enfin un nicol analyseur, auquel on applique l'œil. Avant de placer la colonne, on tourne le *polariseur* de manière à faire disparaître les franges, ce qui a lieu quand le plan de polarisation est perpendiculaire à l'axe d'une des deux plaques superposées qui composent le polariscopes de Savart. On interpose ensuite la colonne, les franges reparaissent, et l'on tourne le *polariseur* jusqu'à ce qu'elles disparaissent de nouveau.

M. Hofmann a combiné, sous le nom de *polarimètre*, un saccharimètre fondé sur les mêmes principes, et qui est très-employé dans l'industrie du sucre. Cet instrument peut, comme le précédent et les saccharimètres à pénombre, se prêter à la mesure de la rotation du plan de polarisation par des liquides ou des solides quelconques.

3150. Dispersions particulières à l'acide tartrique, etc. — La solution d'acide tartrique, chez laquelle nous avons déjà constaté l'accroissement exceptionnel du pouvoir rotatoire avec la proportion de dissolvant (3144), présente aussi des propriétés particulières relativement à la dispersion. Non-seulement elle ne suit pas la 4^e loi, mais encore la déviation du plan de polarisation n'augmente pas toujours avec la réfrangibilité des rayons; par exemple, les rayons verts sont plus déviés que les violets. Les lois suivant lesquelles cette dissolution sépare les plans de polarisation des diverses couleurs diffèrent donc beaucoup de celles que suivent les autres liquides; de plus, ces lois varient avec la nature et la quantité de dissolvant, et avec la température. Biot a fait sur ce sujet de nombreuses expériences, reprises depuis par M. Arndtsen¹, qui a rapporté les couleurs aux principales raies du spectre en suivant la méthode de M. Broch (3120). Dans la figure 2116, les variations du pouvoir rotatoire de la solution aqueuse d'acide tartrique, pour les couleurs qui correspondent aux raies C, D, E, F, e, sont représentées par les ordonnées, et les proportions d'eau, allant de 0,5 à 0,95, par les abscisses. On voit combien le mode de dispersion change avec la proportion d'eau. M. Arndtsen pense qu'on peut rendre compte de ces propriétés singulières, en regardant l'acide tartrique comme un mélange de deux substances, l'une lévogyre, l'autre dextrogyre, dont les rotations augmenteraient avec les réfrangibilités des rayons, suivant des lois dif-

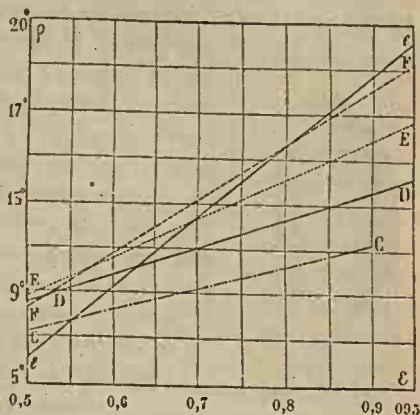


Fig. 2116.

férentes; les résultats dépendraient des proportions de ces deux substances dans le mélange. Or, Biot a trouvé qu'il existe des substances qui dispersent autrement que le quartz, le sucre, etc., par exemple le camphre; et M. Arndtsen a reconnu que, dissous dans l'alcool, il écarte les plans de polarisation des rayons simples suivant la même loi générale que les autres corps, mais que l'écart augmente bien plus rapidement avec la réfrangibilité des rayons.

3151. Relation entre le pouvoir rotatoire et l'hémiédrie cristalline. — Le cristal de roche tourne le plan de polarisation, tantôt à droite, tantôt à gauche (3117), et Herschel a remarqué une relation entre le sens de la rotation et les phénomènes d'hémiédrie que peut présenter ce cristal (I, 486). Deux cristaux de mêmes dimensions peuvent présenter l'hémiédrie *superposable*,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LIV, p. 403.

c'est-à-dire qu'ils peuvent être tournés de manière à pouvoir coïncider, par la pensée, comme cela a lieu dans la *boracite*, le *spath d'Islande*, l'*azotate de soude*; mais il peut arriver aussi que les modifications dans deux cristaux de même substance soient telles que l'un soit symétrique de l'autre, en soit comme l'image dans un miroir; alors ces deux cristaux ne peuvent coïncider, et l'on a l'hémiédrie *non superposable*. Or, le *crystal de roche* présente, dans la variété plagiédre, des facettes qui tronquent les angles tétraédriques formés par deux faces latérales du prisme et deux faces de la pyramide terminale, et ces facettes sont inclinées inégalement sur les faces contiguës; tantôt elles penchent vers la droite de l'observateur qui tient le cristal horizontalement, la pyramide terminale tournée vers lui, c'est-à-dire qu'elles entament en haut la face de droite plus que celle de gauche (*fig. 2117*); tantôt elles penchent vers la gauche. Herschel a reconnu que, dans le premier cas, le cristal est *dextrogyre*, et dans le second, *lévogyre*; d'où il conclut que la cause qui détermine le sens de la rotation, est la même que celle qui détermine le sens de l'inclinaison des faces



Fig. 2117.

plagiédrales. La théorie de Delafosse (I, 488) rend facilement compte de ces résultats; car les molécules dont la réunion constitue la molécule physique, peuvent être disposées de manière à former un certain polyèdre, ou le solide symétrique; par exemple, un tétraèdre non régulier, ou son symétrique; et alors deux cristaux formés par ces deux sortes de molécules physiques présenteront l'hémiédrie non superposable. On conçoit que les dispositions obliques en sens contraire, des sommets des deux sortes de molécules, déterminent une action de même intensité sur la lumière, mais de sens contraire.

Le periodate de soude, dans lequel M. Ulrich a reconnu un pouvoir rotatoire un peu plus grand que celui du quartz, présente les mêmes indications que ce dernier; M. Groth a constaté que le pointement rhomboédrique qui termine d'un côté le prisme hexagonal, porte des facettes hémiedres dont l'inclinaison plus prononcée à gauche ou à droite, indique le sens de la rotation.

3152. Propriétés des acides tartriques. — La relation importante entre l'hémiédrie du cristal de roche et le sens de sa rotation, était un fait isolé, lorsque M. Pasteur, dans de remarquables recherches sur les dissolutions d'acide tartrique et d'autres composés actifs, a découvert une relation entre le pouvoir rotatoire moléculaire des dissolutions actives et l'hémiédrie cristalline de la substance dissoute¹.

Il commence par établir, en s'appuyant sur les travaux cristallographiques de de la Provostaye, que tous les tartrates dérivent d'un prisme, droit ou à peine oblique, à base rectangle, dont deux dimensions sont sensiblement égales,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIV, p. 442, et XXVIII, p. 536.

la troisième variant seule avec la base chimique. Il constate ensuite que les tartrates, qui sont tous dextrogyres, sont hémiedres à droite; et il remarque que, chez les tartrates doubles isomorphes de soude et de potasse, de soude et d'ammoniaque, l'hémiedrie aurait pu avoir lieu en sens inverse relativement aux faces principales du cristal, et que cependant cette inversion ne se présente jamais.

En 1819, un fabricant de Thann, M. Karstner, avait obtenu, en traitant les tartres déposés par le vin des Vosges, un acide particulier analogue à l'acide tartrique avec lequel il est isomère. Cet acide, connu sous le nom d'*acide racémique* ou *paratartrique*, s'était formé par hasard entre les mains de M. Karstner et n'avait pu ensuite être reproduit. Plus tard, en 1860, MM. Perkin et Duppa sont parvenus à l'obtenir par une transformation de l'acide succinique; et M. Jungfleisch, en se servant du même acide préparé au moyen du gaz oléfiant ou éthylène, c'est-à-dire d'une matière qui n'a pas de pouvoir rotatoire.

Biot a reconnu que l'acide paratartrique et les paratartrates sont complètement inactifs; et, en 1844, Mitscherlich annonça que le paratartrate de soude et d'ammoniaque est aussi dans ce cas, quoiqu'il ait avec le tartrate des mêmes bases, identité complète de forme cristalline, de poids spécifique, de double réfraction, d'angle des axes. M. Pasteur a trouvé la cause de cette neutralité, dans l'association de deux acides tartriques, l'un *dextrogyre*, l'autre *lévoygre*, qui, réunis, forment l'acide paratartrique. En effet, ayant fait cristalliser le paratartrate double de soude et d'ammoniaque, il vit que certains cristaux présentaient l'hémiedrie à droite, et d'autres à gauche. Il tria avec soin ces deux sortes de cristaux, fit dissoudre à part ceux qui présentaient l'hémiedrie dans le même sens, et reconnut que leur solution déviait le plan de polarisation toujours d'une même quantité, et dans le sens indiqué par cette hémiedrie. Du reste, les deux sortes de cristaux sont identiques, sauf en ce qui concerne l'hémiedrie, l'un étant comme l'image de l'autre dans un miroir. Dissous ensemble et en même quantité, ils donnent un liquide *inactif*.

Chassant alors la base, en la remplaçant d'abord par la baryte, puis traitant par l'acide sulfurique, M. Pasteur obtint un acide dextrogyre avec les cristaux hémiedriques à droite, et un acide lévoygre avec ceux qui étaient hémiedriques à gauche. Le premier est identique sous tous les rapports avec l'acide tartrique ordinaire ou *acide dextrotartrique*; l'autre, nommé *acide tartrique gauche* ou *lévotartrique*, ne diffère du premier que par la constitution de sa molécule physique, qui présente la forme symétrique et non superposable de celle du premier. Ces deux acides ont même composition, même densité, même solubilité, même pouvoir rotatoire, sauf le sens, et dispersent de la même manière les plans de polarisation (3149). Tous les deux sont *pyro-électriques* (III, 1881) au même degré; mais les électricités qui se montrent aux extrémités homologues sont de signe contraire.

Ayant mélangé des dissolutions des deux acides, M. Pasteur a obtenu l'acide paratartrique *inactif*, et a reconnu qu'il se forme une véritable combinaison chimique, car il y a dégagement sensible de chaleur. Tous les essais faits pour

transformer l'acide droit en acide gauche, et *vice versa*, ont été infructueux; de sorte qu'on n'a pu, jusqu'à ce jour, obtenir l'acide lévotartrique, qu'en le tirant de l'acide paratartrique. — M. Pasteur a passé en revue les sels des acides *dextrotartrique* et *lévotartrique*; il a reconnu que deux sels de même composition présentent la même rotation et les mêmes caractères d'hémiédrisme, mais en sens inverse.

Ajoutons enfin que le même physicien a établi l'existence d'un 4^e acide tartrique, inactif, privé de pouvoir rotatoire et d'hémiédrisme comme l'acide racémique, mais ne pouvant se dédoubler comme celui-ci.

3153. — Ces faits remarquables conduisent aux deux questions suivantes : 1^o Toutes les substances dont les solutions dévient le plan de polarisation présentent-elles, quand elles peuvent cristalliser, l'hémiédrisme non superposable? 2^o L'hémiédrisme non superposable accuse-t-elle toujours l'existence de la propriété rotatoire, tandis que l'hémiédrisme superposable en indiquerait l'absence? M. Pasteur a fait des recherches étendues sur ce sujet important. Voici quelques-uns des résultats qu'il a obtenus.

L'*asparagine* présente l'hémiédrisme non superposable à gauche, et sa dissolution aqueuse dévie faiblement le plan de polarisation dans le même sens. Il en est de même quand elle est dissoute dans les alcalis, tandis qu'elle dévie à droite avec les acides. Cependant les alcalis et les acides agissent sur cette substance d'une manière tout à fait semblable, en donnant naissance à l'*acide aspartique*, qui possède aussi la propriété rotatoire à gauche avec les alcalis, et à droite avec les acides.

L'*acide malique* présente, avec l'acide tartrique, de nombreuses analogies; la dissolution aqueuse est lévogyre, et la déviation augmente avec la température et avec la proportion d'eau; l'acide borique agit aussi comme sur l'acide tartrique (3144). Le *bimalate d'ammoniaque* tourne à droite, ainsi que le *malate neutre de chaux*, tandis que le bimalate de chaux est lévogyre. Tous les trois présentent l'hémiédrisme non superposable. Le *malate neutre de zinc*, et le *malate double d'ammoniaque et d'antimoine*, dévient à droite.

Les dissolutions d'*acide fumarique* et de ses sels ne dévient pas le plan de polarisation; et leurs cristaux ne présentent rien qui annonce l'hémiédrisme.

Le *formiate de strontiane* et le *sulfate de magnésie* présentent l'hémiédrisme non superposable; cependant, leurs dissolutions n'ont donné aucun signe de rotation. Mais M. Pasteur fait remarquer qu'il suffirait de changer certains angles des cristaux, de quelques minutes, pour que l'hémiédrisme devint superposable. Il semble donc que, si la propriété rotatoire existe, elle doit être trop faible pour être observable.

On peut conclure des faits qui précèdent, que l'hémiédrisme non superposable indique l'existence du pouvoir rotatoire, et en fait connaître le sens quand les dissolutions sont formées avec des liquides chimiquement neutres. On peut admettre aussi que les substances dont les solutions possèdent la propriété rotatoire, sont susceptibles de présenter l'hémiédrisme dissymétrique, quoiqu'il

puisse arriver qu'on ne l'ait pas observée; c'est ainsi que M. Pasteur n'avait pu d'abord la produire en faisant cristalliser les bimalates de chaux et d'ammoniaque. C'est après avoir observé l'hémiédrie non superposable, sur certains cristaux du système régulier, que M. Marbach a été conduit à découvrir la propriété rotatoire dans ces sortes de cristaux (3128).

315-1. Acides aspartique et malique inactifs. — Nous avons vu l'inutilité des efforts faits pour transformer l'acide tartrique droit en acide gauche (3152). Pendant longtemps la chimie a montré la même impuissance pour former des composés dont la molécule physique aurait la constitution nécessaire pour produire la rotation. Il semble donc que toutes les substances dont les dissolutions dévient le plan de polarisation possèdent naturellement cette propriété, ou la doivent à une autre substance entrant dans leur composition et l'ayant elle-même puisée dans les phénomènes vitaux du corps d'où elle a été extraite. Par exemple, M. Pasteur a montré que les acides *aspartique* et *malique* tirés de l'acide *fumarique*, qui est inactif, ne possèdent pas la propriété rotatoire des mêmes acides tirés directement des végétaux¹. — M. Dessaignes, en 1850, ayant fait agir l'acide chlorhydrique sur le *fumarate d'ammoniaque*, en tira un *acide aspartique* complètement inactif comme la substance qui lui a donné naissance. M. Piria, ayant transformé de l'acide aspartique en acide malique, en le traitant par l'acide nitrique nitreux, trouva cet acide malique actif ou inactif, suivant que l'acide aspartique était lui-même actif ou inactif. Il y a donc deux espèces d'acide aspartique et deux espèces d'acide malique. L'une des espèces est active, et s'extrait directement de certains végétaux; l'autre est inactive, et dérive de l'acide fumarique, qui est inactif. Les sels de deux acides de même nom ont même composition et mêmes propriétés chimiques, mais ils ont des cristallisations différentes, et ceux qui contiennent l'acide actif possèdent seuls le pouvoir rotatoire. — On serait porté à croire que l'acide inactif est le produit de deux acides actifs de sens inverse, comme pour l'acide racémique; mais M. Pasteur remarque que l'acide inactif provient de l'acide fumarique, dont il faudrait supposer les molécules partagées par la chaleur en deux groupes binaires *symétriques*, à moins d'admettre une constitution binaire dans l'acide fumarique; hypothèses également inadmissibles.

Malgré tous ces faits, on ne peut plus admettre aujourd'hui que le pouvoir rotatoire ne peut être engendré que sous l'influence de la vie, car M. Jungfleisch a formé des acides tartriques actifs au moyen de substances tirées du règne minéral². Déjà il avait pu transformer par la chaleur les acides tartriques actifs, soit en acide racémique, soit en acide inactif ne pouvant se dédoubler, et transformer ces deux derniers acides l'un dans l'autre, de sorte que le dernier donnait l'acide racémique dont on pouvait séparer des acides actifs sans l'intervention des forces organiques. Mais M. Jungfleisch a été encore plus loin;

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXXIV, p. 30.

² *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. III, p. 237.

il a tiré l'acide racémique, d'acide succinique obtenu, suivant la méthode de M. Maxwell Simpson, au moyen de gaz oléfiant ou éthylène, par l'intermédiaire du cyanure d'éthylène. Quant à l'éthylène, il se tire de l'acétylène, qui peut enfin être obtenu directement, comme l'a découvert M. Berthelot, par l'union directe du carbone et de l'hydrogène. L'acide racémique ainsi obtenu présente toutes les propriétés de celui qui a une origine purement organique.

D'autres recherches, faites sur de nombreuses substances actives, ont donné au même observateur des résultats analogues à ceux que lui ont fourni les acides tartriques, et n'ont fait que confirmer la conclusion à laquelle l'avaient conduit les transformations de ce dernier composé.

§ 2. — POLARISATION ROTATOIRE MAGNÉTIQUE

3155. — Dans la séance du 27 novembre 1845, Faraday annonça à la Société royale de Londres ce fait capital, qu'une masse homogène transparente, solide ou liquide, acquiert, sous l'influence d'un fort aimant, ou mieux d'un électro-aimant, la propriété de faire tourner le plan de polarisation des rayons polarisés qui la traversent suivant la ligne des pôles magnétiques, et que le sens de la déviation change avec celui du courant dans l'hélice magnétisante. Faraday paraît avoir été tenté d'abord d'attribuer ces phénomènes à une action directe du magnétisme sur la lumière, mais il reconnut bientôt qu'ils sont produits par une modification qu'apporte le magnétisme intense dans l'arrangement des molécules pondérables. Cette découverte, qui fut le point de départ de ses recherches sur l'universalité du magnétisme (III, 2359), fut connue en France par une lettre adressée à M. Dumas, et aussitôt les physiciens, Pouillet un des premiers, s'empressèrent d'étudier le nouveau phénomène.

3156. Modes d'observation. — Dans les expériences de Pouillet, un parallépipède rectangle de verre, à bases bien polies, était appuyé, comme un *contact*, sur les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval. Les deux extrémités d'un saccharimètre de Soleil, séparées et installées sur un banc de diffraction, de chaque côté de la pièce de verre, servaient, l'une à polariser, l'autre à analyser le rayon qui la traversait.

M. E. Becquerel pose sur les pôles de l'électro-aimant vertical, deux pièces polaires de fer doux, entre lesquelles il place les corps transparents. Ces pièces, forées suivant l'axe des pôles de l'électro-aimant, portent, l'une le polariseur, l'autre l'analyseur. Les déviations du plan de polarisation sont ainsi beaucoup plus prononcées; un flint de 48^{mm} d'épaisseur, qui ne donnait qu'une déviation de 6°,30 sans les armatures, en donnait une de 25°,6, avec les armatures.

L'appareil que Ruhmkorff a construit pour ces expériences, donne des effets encore plus marqués. Dans cet appareil (*fig.* 2118), dont nous avons indiqué d'autres usages (III, 2237), les cylindres de fer doux enveloppés par les bobines, sont forés suivant leur axe. En *m* est un prisme de Nicol polariseur, en *o*, le

prisme analyseur avec cercle gradué, R. La pièce transparente est en *t*, et peut être déplacée transversalement au moyen d'une vis de rappel qui agit sur son support, qui, en outre, peut glisser sur la règle *ll*. Les pièces en équerre qui portent les bobines peuvent se placer à différentes distances et être fixées au moyen de vis *v*, *v'*. Un commutateur *c*, permet de renverser à volonté le sens du courant.

Faraday a montré qu'on peut opérer avec de simples hélices, dans l'intérieur desquelles on place le parallépipède transparent, et l'on trouve qu'il est indifférent que ce corps soit sur l'axe ou à côté de l'axe de l'hélice, pourvu qu'il reste en dedans; car l'action est nulle quand il est placé latéralement en dehors.

Voici maintenant comment on procède : l'analyseur étant disposé de manière à donner l'obscurité avec la lumière simple, ou la teinte sensible avec une lame

de quartz, dans la lumière blanche, on lance le courant dans l'électro-aimant; aussitôt la lumière reparait, ou la teinte change. En tournant l'analyseur, on rétablit l'état lumineux primitif, et l'on voit de combien de degrés et dans quel sens a

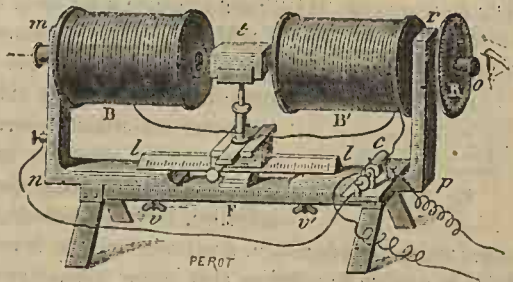


Fig. 3118.

tourné le plan de polarisation. — M. Bertin projette le faisceau émergent, sur un écran, en enlevant les diaphragmes qui en limitent la grosseur, polarisant la lumière solaire avec une pile de glaces, et employant pour analyseur un gros prisme biréfringent, dont les deux images s'éteignent alternativement quand on le fait tourner. En mettant immédiatement après la pile de glaces, la plaque à deux rotations de Soleil, on observe les changements de teinte des deux moitiés.

On a reconnu, par ces diverses méthodes, que le plan de polarisation tourne d'une quantité angulaire qui dépend de la nature de la substance, de son épaisseur, de l'intensité du courant, de la distance des pôles magnétiques, et enfin de la direction des rayons lumineux par rapport à la ligne des pôles; l'action étant *maximum* quand les rayons sont parallèles à cette ligne, et nulle quand ils lui sont perpendiculaires.

3157. Sens de la rotation. — Faraday a reconnu que le sens de la rotation ne dépend pas des substances, pourvu qu'elles ne contiennent pas certains métaux magnétiques, et qu'il est le même que le sens du courant dans l'hélice magnétisante, de sorte que, si l'on renverse ce courant, la déviation change de sens. — Quand le corps transparent est appuyé sur les pôles de l'électro-aimant, on détermine le sens au moyen de celui qu'auraient les

courants d'Ampère (III, 2177) dans une pièce de fer doux mise à la place de ce corps. Si ce dernier est simplement placé dans une hélice, la rotation se fait dans le sens du courant.

Il résulte de là que : 1° Si la pièce transparente appliquée sur les pôles de l'aimant les dépasse, les portions qui dépassent feront tourner le plan de polarisation en sens contraire de la portion placée entre les pôles ; car un barreau de fer doux ainsi placé aurait deux points consécutifs, avec deux pôles contraires aux extrémités. Il peut donc arriver que l'effet soit nul, comme l'a constaté Pouillet. 2° Si, le courant restant le même, les rayons lumineux passent en sens inverse, ce qui oblige l'observateur à aller se placer du côté opposé de l'appareil, il voit la déviation se faire en sens contraire ; ce qui est tout différent de ce qui a lieu avec les substances à pouvoir rotatoire moléculaire (3117). Faraday a profité de cette circonstance pour amplifier l'effet produit : la pièce de verre (*fig.* 2119) étant argentée à ses deux extrémités, excepté sur une étendue de 3^{mm}, on fait réfléchir le rayon plusieurs fois intérieurement ; s'il se réfléchit quatre fois, la rotation est la même que s'il avait traversé une masse de verre cinq fois plus longue. On peut, en employant cet artifice, opérer sur des masses peu épaisses, ce qui permet de rapprocher beaucoup les pôles magnétiques, et d'employer alors un fort aimant ordinaire. — Cette méthode, appliquée à une plaque



Fig. 2119.

à pouvoir rotatoire moléculaire, n'augmenterait pas la rotation, qui serait même nulle, si le nombre de réflexion était impair, comme pour une plaque de quartz placée sur le miroir inférieur de l'appareil de Norremberg. — Si, au contraire, on place sur ce miroir, comme l'a fait M. Bertin, une lame de verre après avoir appliqué en dessous un pôle d'électro-aimant, on constate facilement la rotation, surtout si l'on place sous l'analyseur, le biquartz de Soleil (3122).

3158. Cas des substances magnétiques. — Les substances *diamagnétiques* tournent toutes le plan de polarisation dans le sens du courant. Mais il n'en est pas de même de tous les corps magnétiques, comme il résulte des expériences sur un grand nombre de liquides, faites par Verdet¹. Il établit d'abord, en opérant sur des solutions étendues à divers degrés, que, dans une solution aqueuse d'un sel, les molécules salines et celles du liquide agissent sur la lumière polarisée indépendamment les unes des autres, chacune d'elles apportant son *pouvoir rotatoire magnétique* spécial, de manière que la rotation produite est la somme des rotations individuelles produites par les molécules des deux substances. Il constate ensuite que certains sels dissous dans l'eau diminuent la déviation qu'elle produit seule, et peuvent même la renverser ; comme pour la solution concentrée de perchlorure de fer, qui donne une déviation égale à peu près à celle du verre pesant de Faraday, et égale, par conséquent, à 6 ou 7 fois celle de l'eau pure ; et nous avons ainsi une solution

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LII, p. 129.

qui fait tourner le plan de polarisation *en sens inverse du sens du courant*. En employant un dissolvant agissant moins fortement que l'eau, comme l'alcool, l'éther, et surtout l'esprit de bois dont l'action rotatoire magnétique est à peine sensible, on arrive plus facilement à obtenir de ces effets inverses. Par exemple, une partie de perchlorure de fer dans 4 d'éther, tourne en sens inverse du courant; et avec deux fois plus d'éther, la solution se trouve inactive. Une solution de 11 de perchlorure de fer dans 9 d'esprit de bois, produit une forte rotation inverse.

Les liquides qui font tourner le plan de polarisation en sens inverse du courant, sont dits posséder un pouvoir rotatoire magnétique *négalif*. Il était important de constater cette propriété dans des corps non dissous. Tous les essais tentés jusqu'à présent sur des corps solides ont été infructueux; mais Verdet a trouvé une substance, le *bichlorure de titane*, qui est liquide à la température ordinaire, et qui donne une rotation magnétique négative sans intervention d'aucun dissolvant.

Verdet a conclu de ses nombreuses expériences, que tous les corps *diamagnétiques* dans lesquels il n'entre aucun métal magnétique, ont un pouvoir rotatoire *positif*. On n'en peut dire autant de ceux qui contiennent un métal magnétique, et l'on peut, à cet égard, diviser les métaux en trois classes, ayant pour types le *fer*, le *nickel* et le *manganèse*. Les métaux de la première classe (fer, titane, cérium, lanthane...) communiquent aux substances qui les contiennent, le pouvoir rotatoire *négalif*, et ceux de la seconde (nickel, cobalt, molybdène), le pouvoir *positif*. Le manganèse forme un type intermédiaire, dont les composés ont un pouvoir tantôt positif, tantôt négatif.

3159. Pouvoir rotatoire magnétique des diverses substances. —

Tous les liquides et tous les solides transparents non cristallisés qu'a essayés Faraday, lui ont montré, à divers degrés, le pouvoir rotatoire magnétique. M. Matthiessen n'en a trouvé aucun signe dans l'acide phosphorique fondu, le silice, l'agate et le fluorure de calcium. Les gaz n'en ont aussi donné aucun signe. Quand une substance possède naturellement la propriété rotatoire, le magnétisme agit comme si elle était inactive, et le pouvoir rotatoire qu'il produit s'ajoute à celui que possède naturellement la substance, ou s'en retranche, suivant le sens du courant.

Cristaux. — Les corps cristallisés semblent, en général, rebelles à l'action magnétique. Sur une centaine de cristaux, M. Matthiessen n'a trouvé que le sel gemme qui la subisse, et à un haut degré, car il dévie le plan de polarisation à peu près autant que le verre pesant (boro-silicate de plomb). Les cristaux de chlorure de mercure, de carbonate et de chromate de plomb sont insensibles, et cependant les mêmes substances amorphes prennent un pouvoir remarquable. M. E. Becquerel a produit la rotation magnétique dans le cristal de roche rendu inactif par la réunion de deux plaques de rotation inverse¹, et

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XVII, p. 437.

il l'a aussi observée au moyen du biquartz; l'une des moitiés tournait au rouge, et l'autre au bleu, sous l'influence du magnétisme. M. Bertin, avec l'appareil de Norremberg disposé comme nous l'avons dit plus haut (3157), n'emploie qu'une seule lame de quartz, dont la rotation moléculaire est annulée par les deux trajets du rayon réfléchi sur le miroir inférieur de l'appareil. M. Lütgde a aussi observé la rotation magnétique du quartz, même en dehors de l'axe. M. E. Becquerel a encore obtenu des signes de rotation, avec le héril et la tourmaline, et il a reconnu qu'ils sont d'autant plus marqués que les substances sont moins pures. M. E. Bichat n'en a obtenu aucun signe sur la glace provenant d'eau très-pure.

On a fait beaucoup d'expériences pour comparer les pouvoirs rotatoires magnétiques des divers corps placés dans les mêmes conditions. On a longtemps regardé le verre pesant comme ayant le plus grand pouvoir; mais, sur 200 espèces de verres artificiels, M. Matthiessen en a trouvé 23 plus énergiques; parmi lesquelles, le silicate de plomb lui a donné une déviation plus que double (20 au lieu de 9)¹. Verdet a produit, avec la dissolution de 11 de perchlorure de fer dans 9 d'esprit de bois, une rotation *negative* presque double de celle du verre pesant, et triple de celle du sulfure de carbone. D'après M. Matthiessen, les silicates et peut-être les chlorures, ont le plus grand pouvoir rotatoire. La base qui, introduite dans un verre, augmente le plus ce pouvoir est l'oxyde de plomb. Ensuite viennent les oxydes de bismuth, d'antimoine, de zinc, de mercure, d'argent. La magnésie, la strontiane, la baryte, ne paraissent pas avoir d'influence; la chaux, la potasse, la soude, diminuent l'effet.

Voici quelques résultats trouvés par M. Bertin, le pouvoir rotatoire magnétique du verre pesant étant représenté par 100 :

Verre pesant.....	100	Protochlorure de phosphore.....	51
Flint de Guinand.....	87	Dissolution de chlorure de zinc.....	55
Flint de M. Matthiessen.....	83	Dissolution de chlorure de calcium... .	45
Flint commun.....	53	Eau.....	25
Bichlorure d'étain.....	77	Alcool à 36°.....	48
Sulfure de carbone.....	74	Éther.....	15

On ne peut donner les déviations absolues, parce qu'elles dépendent de diverses conditions : poids de l'électro-aimant, distance de ses pôles, longueur et grosseur du fil de l'hélice magnétisante, force de la pile.

De La Rive ayant comparé les pouvoirs magnéto-rotatoires de divers liquides à ceux de l'eau, a reconnu que les liquides isomères présentent des pouvoirs sensiblement différents.

3160. — Relation avec l'indice de réfraction. — De La Rive avait

¹ Bibliothèque universelle de Genève (Arch. des sc.), t. V. p. 426.

énoncé que les corps très-réfringents possèdent généralement un grand pouvoir magnéto-rotatoire. Mais Verdet avait cru que les corps arrangés par ordre, relativement aux deux propriétés, formaient des séries différentes.

M. Henri Becquerel a fait de nombreuses recherches sur ce sujet¹. Il disposait de forts électro-aimants verticaux, à deux branches munies de pièces polaires forées et assez larges pour que le corps pût être légèrement déplacé entre les surfaces polaires, sans que l'effet magnétique fût sensiblement modifié. Pour tenir compte des variations de l'intensité de la pile, on comparait les résultats à ceux que donnait une substance prise pour terme de comparaison, ordinairement le sulfure de carbone, dont on mesurait les déviations a et a' , avant et après l'observation, et l'on comparait celle-ci à la moyenne $\frac{1}{2}(a + a')$. Les déviations étaient mesurées, dans le cas des corps incolores, au moyen de la teinte sensible et en s'aidant, dans certains cas, du biquartz ou du compensateur de Soleil (3147). Dans le cas de corps colorés en jaune, on employait la flamme jaune du sodium, et pour les corps rouges, celle du lithium, que l'on observait au moyen du polarimètre à pénombre (3148).

En comparant les résultats obtenus sur un grand nombre de substances solides et liquides, M. H. Becquerel a été conduit à représenter le pouvoir magnéto-rotatoire R , par la formule $R = An^2(n^2 - 1)$, dans laquelle n représente l'indice de réfraction, et A un facteur, sensiblement égal à 1 pour les corps de même famille chimique ou composés d'un même radical; de sorte que le rapport $\frac{R}{n^2(n^2 - 1)}$ reste sensiblement constant pour chaque groupe.

Pour les corps n'appartenant pas à la même famille, A est d'autant plus grand que le corps est plus diamagnétique. Du reste, la nature chimique du corps intervient, et il peut y avoir indépendance entre les effets produits par les éléments combinés; comme cela a lieu, entre autres, avec les dissolutions, dont, en outre, les pouvoirs magnétiques moléculaires sont sensiblement constants, quel que soit le degré de concentration. Pour les corps très-magnétiques, les pouvoirs croissent au contraire très-vite avec la concentration des dissolutions et paraissent dépendre de l'intensité du magnétisme développé dans les molécules par suite de leurs réactions mutuelles.

L'angle de déviation produit par un même corps soumis à la même action magnétique dépend aussi de diverses influences que nous allons passer en revue : température, actions mécaniques, état physique.

3161. Influence de la température. — Dans le cas des *liquides*, de la Rive² a trouvé, pour ceux qui sont peu dilatables, comme l'eau, l'acide sulfurique, que le pouvoir magnéto-rotatoire *diminue* plus vite que la densité quand la température s'élève; mais pour les liquides très-dilatables, comme l'alcool, l'iodure d'éthyle, l'alcool amylique, le rapport des rotations aux densités reste

¹ *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. XII, p. 5.

² *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XXII, p. 24.

sensiblement constant. M. E. Bichat a confirmé ces résultats, sur un plus grand nombre de liquides¹. Il a reconnu de plus que, si α est la rotation donnée par un liquide à 0°, la rotation α_t à t ° est donnée par la formule $\alpha_t = \alpha - at - bt^2$. Quand t est éloigné du point d'ébullition du liquide, la diminution du pouvoir magnéto-rotatoire est proportionnelle à celle de la densité; mais quand on s'approche du point d'ébullition, le pouvoir diminue beaucoup plus vite que la densité.

Solides. — Pour les *solides*, les résultats, peu prononcés, obtenus par divers physiciens sont contradictoires. Matteucci avait trouvé que le pouvoir magnéto-rotatoire augmentait avec la température; par exemple, le verre pesant, qui, à froid, donnait une déviation de 6°, lui en donna une de 8° immédiatement après avoir été retiré de l'huile bouillante. M. Lütge annonça plus tard que la chaleur produisait, au contraire, une diminution, mais les variations étaient extrêmement faibles. M. E. Bichat trouva également que la rotation diminue plus vite que la densité quand la température s'élève; par exemple, une masse de flint qui déviait de 1°,30' à la température ordinaire ne déviait plus que de 1°,24', à 140°.

Pour décider la question, il fallait opérer à des températures plus élevées. C'est ce qu'a fait M. Joubert, qui a poussé ses expériences jusqu'à 582°, point de fusion du verre. Il a constaté que la chaleur *augmente* le pouvoir rotatoire, de $\frac{1}{10}$ de sa valeur, entre 10° et 582°. Le flint était placé dans un tube de porcelaine traversant une fourneau spécial, et la température était déduite de la rotation produite par une lame de quartz (3121) placée dans un second tube croisant le premier à angle droit. On observait successivement dans les deux tubes, au moyen du polarimètre Laurent (3148) et avec la lumière jaune du sodium. De la limaille de cuivre enveloppait les tubes à leur point de croisement pour rendre leur température bien égale. On prenait la précaution de chauffer lentement, autrement le verre donnait des signes de double réfraction indiquée par une croix noire, et la rotation était notablement diminuée. Peut-être est-ce là une des causes des discordances entre les résultats antérieurement obtenus.

3162. Actions mécaniques. — Il résulte des expériences de MM. Matteucci², Edlund et Wertheim, que la compression amortit la sensibilité magnétique des substances transparentes, en gênant les mouvements moléculaires. Matteucci comprimait la plaque transparente, au moyen de la petite presse de Brewster (3059), dans laquelle il employait des pièces d'acier bien planes. Il se servait du biquartz à rotations inverses : l'analyseur donnant la teinte de passage, il comprimait le corps, et les deux moitiés présentaient des nuances différentes, ce qui montre que la compression seule fait tourner le plan de polarisation. Il rétablissait l'égalité en tournant l'analyseur, et faisait passer le

¹ *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 2^e série, t. II (1873), p. 27.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIV, p. 354, et t. XXVIII, p. 493.

courant, les teintes changeaient, et en les ramenant à l'égalité, il mesurait la déviation du plan de polarisation produite par le magnétisme. Cette déviation était plus grande quand le magnétisme agissait dans le même sens que la compression, que lorsqu'il agissait en sens opposé. La différence a été à peu près du simple au double dans presque tous les cas observés. Une compression un peu forte sur le crown le rendait tout à fait insensible à l'action du magnétisme. — Wertheim a expérimenté sur des pièces de verre soumises à l'action de sa presse (3064) entre les deux pôles de l'appareil de Ruhmkorff. Il a vu la rotation diminuer par l'augmentation de pression; mais il n'a pu déterminer le moment où elle cesse de se montrer, la double réfraction produite rendant visibles simultanément les deux images de l'analyseur biréfringent. Cependant, en opérant avec des rayons homogènes, il a reconnu que la rotation disparaissait à peu près au moment où la différence de marche devenait égale à $\frac{1}{2}\lambda$; car alors l'image ordinaire était complètement obscure.

Ces effets sont passagers comme la compression elle-même, ce qui montre qu'ils dépendent du déplacement des molécules. De la Rive ayant expérimenté sur un bloc de verre, percé par la décharge d'une bobine de Ruhmkorff, reconnu que l'espèce de trempé communiquée par la décharge, et attestée par la double réfraction (3056), lui avait enlevé son pouvoir magnéto-rotatoire. M. Lütge a vu, de son côté, ce pouvoir diminuer notablement dans le verre, par la trempé ordinaire.

Un autre fait prouve l'existence de déplacements moléculaires : Faraday a vu le pouvoir rotatoire augmenter graduellement pendant quelques secondes après l'introduction du courant, mais cesser subitement dès qu'on le supprimait. M. Matthiessen a reconnu qu'on rend l'augmentation plus sensible quand on interrompt plusieurs fois le courant, ou qu'on en change brusquement le sens; surtout quand le verre est légèrement trempé, et cette trempé se trouve modifiée. Par exemple, le verre pesant légèrement trempé éprouve une augmentation de pouvoir rotatoire après plusieurs secousses, et perd cet accroissement après le repos. Les verres contenant un métal magnétique ou du bismuth, perdent leur trempé pendant ces alternatives.

3163. Influence de l'état physique. — M. Bertin avait vu certaines substances dissoutes dans l'eau, en augmenter le pouvoir magnéto-rotatoire; par exemple, le protochlorure d'étain; et d'autres, comme le sulfate de fer, le diminuer, et d'autant plus que ces matières entraînent en plus grande proportion dans la dissolution. Verdet a reconnu que chacune des substances conserve sensiblement son pouvoir dans le mélange.

Dissolutions. — M. E. Bichat a comparé les pouvoirs magnétiques d'un même corps, à l'état solide et à l'état de dissolution. Après de nombreux essais, il a opéré sur le sucre et sur l'acide tartrique, et a trouvé que les pouvoirs de ces deux substances se conservent intégralement dans le passage à l'état de dissolution. Pour obtenir les matières solides amorphes, après les avoir fondues avec des précautions particulières, on les coulait dans des tubes de 31^{mm} de

longueur, fermés par des glaces minces. Des tubes identiques recevaient les dissolutions. Les armatures de même diamètre que les bobines, donnaient un large champ magnétique, et pour tenir compte des variations de l'intensité du courant, on comparait les déviations à la moyenne $\frac{1}{2}(a + a')$ des déviations que donnait un flint, observé avant et après le corps en expérience (3160).

Voici comment on comparait les pouvoirs sous les deux états. Soit δ la densité propre de la matière dissoute, δ' celle de l'eau à la température de l'expérience, P, P' les poids de substance et d'eau formant la dissolution, dont la densité est d , et enfin α et α' les rotations produites par des colonnes de même longueur L du corps à l'état solide amorphe et de l'eau, dans les mêmes conditions magnétiques. Si les pouvoirs ne changent pas quand on dissout la matière, on devra avoir, pour calculer la rotation x du mélange,

$$\alpha \frac{P}{\delta} + \alpha' \frac{P'}{\delta'} = x \frac{P + P'}{d}$$

Les valeurs de x ainsi calculées ont toujours été d'accord avec celles qu'a données l'expérience; et il est probable qu'il en serait de même pour des substances autres que le sucre et l'acide tartrique.

Vapeurs. — Il était important de rechercher si le pouvoir magnéto-rotatoire se conserve sous l'état de vapeur. Des essais infructueux sur différents gaz avaient été faits par Faraday, mais avec de trop faibles épaisseurs. M. H. Becquerel et M. E. Bichat ont publié, en 1879¹, des expériences dans lesquelles ils ont obtenu des déviations sur divers gaz et vapeurs. M. H. Becquerel, en employant la méthode des réflexions multiples, a pu réussir, même à la température et à la pression ordinaire de l'atmosphère. Le gaz était renfermé dans un tube de cuivre de 3^m de longueur et de 12^{cm} de diamètre, fermé par des glaces et enveloppé de 6 grosses bobines de 50^{cm} de longueur. La rotation des glaces était évaluée à part, pour en corriger les résultats; l'épaisseur de gaz traversée représentait, par suite des réflexions, environ 9 fois la longueur du tube, ou 27^m environ. La déviation observée en lançant successivement dans les deux sens, le courant de 66 couples à acide nitrique, a été, pour l'air dans les conditions ordinaires de l'atmosphère, de 4',98 avec la lumière du sodium, et de 5',29 avec la lumière blanche. La vapeur de sulfure de carbone mélangée à l'air à la température de 28°,6, a donné, pour un trajet de 21^m, une déviation de 12',45, déduction faite de celle de l'air mélangé. En supposant que les rotations soient proportionnelles aux pressions entre des limites rapprochées, la rotation serait de 22',7 pour la pression de 0^m,76, ce qui correspond à un pouvoir rotatoire égal à 0,000706; et donne, pour le rapport $\frac{R}{n^2(n^2 - 1)}$, le nombre 0,234; or, le sulfure de carbone liquide a donné 0,231, nombre presque identique.

¹ *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. VIII, pp. 198 et 204.

M. E. Bichat a observé, de son côté, la rotation des vapeurs de sulfure de carbone et de bichlorure d'étain, et a reconnu que le pouvoir rotatoire moléculaire du liquide éprouve, à la température de l'ébullition, une diminution brusque comparativement à la densité. La vapeur était contenue dans un tube de 3^m,6 de longueur entouré d'un manchon, dans lequel on pouvait faire circuler de l'eau chaude, de l'huile ou de la vapeur d'eau.

3164. Dispersion par rotation magnétique. — M. Bertin a constaté sur le flint, que les déviations magnétiques des diverses couleurs suivent la même loi approximative que pour la rotation moléculaire du quartz (3117). Ayant compensé la rotation du flint par le compensateur de Soleil (3147), il vit l'image rester blanche dans toutes les positions de l'analyseur. Ce résultat, que M. E. Becquerel a trouvé de son côté, a été vérifié par M. Wiedemann sur l'essence de thérébentine. Des expériences de Verdet, en 1863, sur le sulfure de carbone et la créosote, lui avaient aussi donné des rotations en raison inverse de λ^2 , suivant la 4^e loi de Biot.

M. H. Becquerel a repris la question par la méthode de MM. Fizeau et Foucault (3120), au moyen de la lumière Drummond tamisée par des verres de couleur. Avec les substances très-diamagnétiques, les pouvoirs magnéto-rotatoires des divers rayons colorés traversant une même substance, satisfont à la relation $n^2 (n^2 - 1) \frac{1}{\lambda^2}$; n étant l'indice de réfraction. Mais pour les corps très-magnétiques, la formule est $n^2 (n^2 - 1) \frac{1}{\lambda^4}$; par exemple, pour le bichlorure de titane, dont la rotation négative est très-prononcée.

3165. Relation entre l'action rotatoire et l'intensité. — MM. Bertin et Wiedemann ont, les premiers, cherché une relation entre les pouvoirs magnéto-rotatoires, la force magnétisante et la distance aux pôles magnétiques. M. Wiedemann plaçait le corps transparent dans une hélice; M. Bertin se servait d'un électro-aimant. Nous reviendrons sur les résultats qu'ils ont obtenus, après avoir exposé les recherches plus étendues de Verdet, qui s'est proposé principalement de trouver la relation entre l'action élémentaire exercée en un point du corps transparent et l'action magnétique qui existe en ce point¹.

Comme, à la petite distance à laquelle s'exerce l'action, elle ne peut être la même sur tous les points du corps, Verdet forme, suivant la méthode de Faraday et de Plucker, un *champ magnétique* uniforme, en vissant aux pôles de l'appareil (fig. 2118), deux plaques polaires percées, de diamètre égal à celui des bobines, et entre lesquelles un point magnétique est partout également influencé, excepté près des bords, les différences de distance étant compensées par les différences d'obliquité des actions exercées. Du reste, Verdet a vérifié la constance dans les effets, au moyen d'une pièce de verre pesant; tant qu'elle ne touchait pas une des armatures circulaires et n'était pas trop près des bords, il

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XLI, p. 370.

pouvait la déplacer sans que la teinte sensible de son analyseur fût modifiée. On peut conclure de là que les propriétés optiques développées dans la masse du verre sont les mêmes, sauf la grandeur de la rotation, que celles qui sont développées dans un élément quelconque infiniment petit de cette masse.

Cela posé, Verdet a cherché l'action magnétique exercée en un point donné occupé par un élément du verre, et à laquelle est dû le pouvoir rotatoire qu'il possède. Pour cela, il s'est appuyé sur une conséquence qu'il déduit des lois de MM. Newman et W. Weber, relative aux courants induits dans un circuit fermé qu'on déplace en présence d'un pôle magnétique. Il prouve que, si dans un espace où l'action magnétique est constante en grandeur et en direction, on dispose un courant circulaire dont le plan soit parallèle à la direction de l'action magnétique, et si on le fait tourner de 90° autour d'un axe perpendiculaire à cette direction, il se développe un courant induit proportionnel à l'action magnétique.

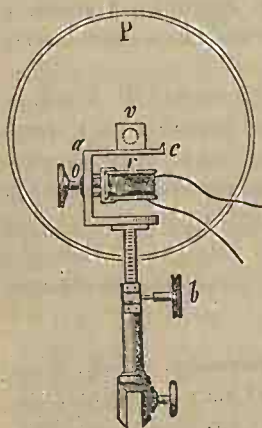


Fig. 2119.

Cela posé, une petite bobine circulaire, r (fig. 2119), dont le diamètre est 0,2 environ de celui des plaques polaires, P, de l'appareil de Ruhmkorff, est placée entre ces plaques. Cette bobine est mobile autour d'un axe horizontal, o , parallèle aux plaques, et son support peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'un système de crémaillère avec pignon, b , fixé sur la règle W (fig. 2118). Le fil de la bobine présente la même résistance que celui d'un rhéomètre ou magnétomètre de Weber (III, 2058), avec lequel on le met en communication. La bobine circulaire étant d'abord horizontale, on la fait tourner rapidement de 90° autour de l'axe o ; un courant d'induction se déve-

loppe et imprime au barreau aimanté du rhéomètre, une impulsion première dont l'angle se mesure par la méthode de Gauss. On démontre par l'analyse que cet angle est proportionnel à l'action magnétique qui a donné naissance au courant induit. La force magnétique une fois mesurée, on remplace la bobine, par la pièce transparente v posée sur une tablette de cuivre ac , que l'on fait descendre à la place de la bobine, et l'on observe la rotation du plan de polarisation, soit avec la lumière blanche et la teinte sensible, soit avec des rayons solaires auxquels une dissolution ammoniacale de sulfate de cuivre, a donné une teinte voisine de la raie G du spectre. On mesurait une seconde fois la rotation en renversant le courant, puis on faisait une nouvelle évaluation de la force magnétique.

Les expériences ont porté sur le verre pesant de Faraday, le flint et le sulfure de carbone. L'action magnétique était modifiée, soit en faisant varier le nombre des couples de la pile, de 4 à 20; soit en changeant la distance des

armatures, de 50 à 90^{mm}. Le quotient de la force magnétique par la déviation a toujours été le même avec la même substance; d'où cette loi très-simple : *la rotation du plan de polarisation est proportionnelle à l'action magnétique*. Cette loi a été vérifiée dans le cas de la rotation négative, sur la dissolution de bichlorure de fer dans l'esprit de bois. La déviation était mesurée à 5' ou 6' près, et l'erreur probable de l'évaluation de l'action magnétique était d'une division de l'échelle du magnétomètre; incertitudes qui expliquent les faibles différences qu'ont présenté les résultats.

La loi qui précède étant la même pour tous les éléments des corps transparents, et l'action magnétique variant en raison inverse du carré de la distance, on peut dire que le *pouvoir rotatoire développé par un centre magnétique, dans une tranche infiniment mince du corps transparent, varie proportionnellement à l'action magnétique, et en raison inverse du carré de la distance*. Il résulte de là que, pour un même état de l'appareil, la déviation doit être proportionnelle à l'épaisseur traversée par la lumière. — Du reste, cette déviation est indépendante du diamètre de la colonne traversée, comme l'a constaté M. de la Rive.

M. Wiedemann avait trouvé antérieurement¹, par le procédé de M. Broch (3120), que la rotation produite par un liquide naturellement inactif, introduit dans une bobine parcourue par un courant, est proportionnelle à l'intensité du courant. Cette loi est d'accord avec la précédente, car les actions exercées sur un point magnétique placé dans la bobine, seraient soumises à la même loi. Comme la rotation était très-faible, M. Wiedemann plaçait un tube d'essence entre la bobine et le polariseur, et il retranchait de la rotation observée, celle de l'essence seule.

M. Bertin avait reconnu, en faisant agir une seule branche d'électro-aimant sur une pièce de verre qu'il en éloignait peu à peu, que les distances variant en progression arithmétique, la rotation diminuait en progression géométrique², ce qui semble en désaccord avec la loi de Verdet. Mais, comme le fait remarquer ce dernier, la base du fer doux représente une surface magnétique qui ne peut être assimilée à un point. Du reste, il résulte d'expériences faites avec l'appareil même qui avait servi à M. Bertin, que l'action magnétique varie, à différentes distances de la surface terminale de l'électro-aimant, à peu près suivant la loi qu'il avait trouvée pour les angles de déviation; il n'y a donc pas désaccord entre les deux lois; seulement, celle de M. Bertin n'est vraie que dans les conditions où il expérimentait, tandis que l'énoncé de Verdet exprime la loi élémentaire du phénomène.

3166. Variation de la déviation avec l'obliquité de l'action magnétique par rapport aux rayons. — Faraday avait reconnu la diminution de l'action magnétique, quand elle s'exerce obliquement à la direction des rayons. Verdet s'est proposé de trouver la loi de cette diminution. Il lui a fallu,

¹ Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXXIV, p. 421.

² Annales de chimie et de physique, 3^e série, t. XXIII, p. 5.

pour cela, faire passer le rayon un peu au-dessus des armatures de l'électro-aimant, et cependant placer le corps transparent dans un champ magnétique uniforme. La figure 2120 représente la partie supérieure horizontale de l'appareil au moyen duquel ces conditions ont été remplies. AA, A'A' sont les extrémités des branches d'un électro-aimant vertical mobile autour d'un axe placé à égale distance de ces branches, et porté par un pied à vis calantes V, V, V, V. Un vernier v tourne avec le système, et mesure l'angle de rotation sur le cercle fixe CC. Chaque branche de l'électro-aimant porte une armature en fer doux, composée d'une pièce prismatique p , p' pouvant glisser dans des rainures rr , $r'r'$, et portant des lames de fer doux L, L'. Des expériences faites par la méthode que nous avons exposée (3165), ont prouvé que les actions optiques et magnétiques sont sensiblement les mêmes, entre les plaques et un peu au-dessus de leur bord supérieur.

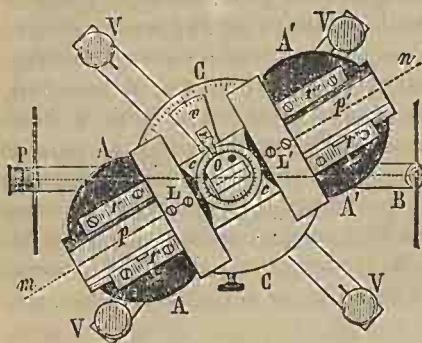


Fig. 2120.

Le corps transparent est soutenu un peu au-dessus de ces bords par un plateau circulaire o muni d'un vernier, et mobile au centre d'un second plateau gradué cc , porté par une colonne qui tourne sur elle-même, avec l'électro-aimant, le repère o et le vernier v . Une barre PB, fixée au pied de l'instrument, soutient en P un prisme polariseur, et en B un écran percé d'un petit trou. L'analyseur est à part, au-delà

de l'écran. Tout l'appareil est en cuivre, sauf l'électro-aimant et ses armatures.

Le plan des branches de l'électro-aimant étant placé dans la direction du rayon lumineux, et les faces d'entrée et de sortie de la pièce transparente étant normales à ce rayon, on observait la déviation magnétique du plan de polarisation. On tournait ensuite l'électro-aimant obliquement à mn ; la pièce transparente était ramenée à sa première position en tournant le plateau o en sens opposé; et l'on observait de nouveau la déviation du plan de polarisation. On répétait ensuite l'expérience, en déplaçant l'électro-aimant en sens contraire, et l'on prenait la moyenne des résultats. La pièce transparente était ainsi toujours traversée de la même manière par la lumière; il n'y avait de changé que la direction de l'action magnétique.

Verdet¹ a reconnu ainsi, que la rotation du plan de polarisation est proportionnelle au cosinus de l'angle compris entre la direction du rayon lumineux et celle de l'action magnétique. En d'autres termes, la rotation est proportionnelle à la composante magnétique parallèle à la direction du rayon. On voit pourquoi

¹ Annales de chimie et de physique, 2^e série, t. XLIII, p. 37.

il n'y a pas d'effet quand les rayons sont perpendiculaires à la ligne des pôles.

3167. Temps nécessaire à l'action magnétique. — M. Villari a cherché à évaluer le temps qu'il faut au courant pour influencer le flint. Il fait tourner entre les pôles de l'appareil de Ruhmkorff (3156), un cylindre vertical de verre, dont le mouvement, en l'absence de courant, ne change rien à la teinte sensible d'un biquartz. Le cylindre étant en repos, il lance le courant; le biquartz indique le déplacement du plan de polarisation, il rétablit l'égalité de teinte en tournant l'analyseur, et il met le cylindre en mouvement. Quand la vitesse est suffisamment grande, l'inégalité des teintes apparaît d'autant plus marquée que la vitesse est plus grande, de manière à indiquer une diminution dans le pouvoir rotatoire. Or, il n'y a pas d'action sur le verre dans la section perpendiculaire à la ligne des pôles; si donc cette section vient se placer suivant cette ligne en un temps plus court que celui que demande l'action magnétique pour produire les changements moléculaires dans le verre, il n'y aura pas de déviation du plan de polarisation pendant le mouvement du cylindre. Dans les conditions d'expérience de M. Villari, la diminution d'effet commençait, avec une vitesse d'une centaine de tours par seconde. Pour 110, 143, 180 tours, la rotation, qui était compensée par 19 divisions du compensateur de Soleil (3147) quand le cylindre était immobile, l'était par 17,9 et 2 divisions; cette rotation était donc presque annulée par une vitesse de 180 tours.

3168. Rotation sous l'influence magnétique de la terre. — M. H. Becquerel, ayant dirigé dans le méridien magnétique un tube de 50^{cm} de longueur rempli de sulfure de carbone et traversé par de la lumière polarisée, a constaté une différence de 6',5, dans la position du plan de polarisation, quand les rayons entraient par le nord, ou par le sud; ces rayons, parcourant 5 fois le tube, par suite de réflexions aux deux extrémités de la colonne liquide. La moitié de cet angle, 3',25, représentait la déviation produite par le courant terrestre, qui va de l'est à l'ouest (III, 2170). Quand le tube était perpendiculaire au méridien magnétique, on n'observait rien de semblable.

M. Joubert a obtenu de son côté la rotation du plan de polarisation par le sulfure de carbone, sous l'influence du magnétisme terrestre.

3169. Polarisation rotatoire magnétique de la chaleur. — Lors de la découverte de la rotation magnétique du plan de polarisation, M. Wartmann parvint à produire le même phénomène sur un parallépipède de flint, de 29^{mm} d'épaisseur, par divers moyens, entre autres en se servant de l'appareil au moyen duquel il a étudié la polarisation des rayons de chaleur de l'atmosphère; il employait la chaleur d'une lampe, mais les résultats étaient peu marqués. MM. de la Provostaye et P. Desains sont arrivés depuis à des résultats très-nets¹. Des rayons solaires, polarisés par un prisme de spath achromatisé dont on ne recevait que le faisceau ordinaire, traversaient un flint de 38^{mm} d'épaisseur, et entraient dans un second prisme dont la section principale était inclinée à 45°

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXVII, p. 232.

sur celle du premier. Avec cette inclinaison, la différence des intensités des rayons reçus par la pile d'un thermomultiplicateur est bien plus prononcée que lorsque les sections sont tournées à 90° ; en effet, si I est l'intensité de la lumière qui traverse le parallépipède de flint en l'absence du courant, et δ la déviation produite par le passage du courant dans l'appareil de Ruhmkorff, l'intensité devient $\cos^2(45^\circ + \delta)$, ou $\cos^2(45^\circ - \delta)$, suivant le sens de la rotation (3008), et la différence des intensités quand on renverse le courant est $\cos^2(45^\circ - \delta) - \cos^2(45^\circ + \delta) = \sin 2\delta$. Si les sections étaient perpendiculaires, on aurait $\cos^2(90^\circ + \delta) - \cos^2 90^\circ = \sin^2 \delta$ qui est beaucoup plus petit que $\sin 2\delta$, δ étant moindre que 45° . — Les rayons, au lieu d'être reçus dans l'œil, venaient frapper la base de la pile thermo-électrique, et l'on tournait le prisme analyseur de manière à conserver à l'aiguille du rhéomètre la même déviation. Avec une pile de Bunsen de 30 couples, on a pu ainsi constater des rotations de plus de 6° , le courant passant successivement dans les deux sens.

3170. De la cause des actions rotatoires magnétiques. — Le pouvoir rotatoire magnétique paraît dû à l'action du magnétisme sur les éléments pondérables, soit pour modifier l'arrangement des molécules élémentaires dans le groupe physique, soit pour donner à celui-ci une orientation particulière, qui dépend évidemment du sens du courant. Ces effets, sur l'arrangement des molécules, n'ont rien de surprenant, quand on se rappelle les mouvements moléculaires produits par les électro-aimants dans les corps magnétiques, et l'action du magnétisme sur tous les corps (III, 2439, 2359). Tout ce qui, dans les solides, gêne les déplacements des molécules, devra donc nuire au développement de la propriété rotatoire; nous avons vu, en effet, les cristaux ne la manifester que rarement, la compression l'affaiblir (3162), et la chaleur, qui écarte les molécules, l'augmenter sensiblement (3161). D'un autre côté, le pouvoir rotatoire magnétique a été trouvé le même dans divers corps à l'état solide amorphe et à l'état de dissolution, ou même de vapeur (3163).

Cependant, de la Rive¹ pensait que l'action magnétique pouvait s'exercer sur l'éther condensé autour des molécules; et, en effet, le pouvoir rotatoire qu'elle produit augmente avec l'indice de réfraction (3160). Mais comme il n'y a pas proportionnalité, que la présence des molécules pondérables est nécessaire, et que, plus elles sont rapprochées, c'est-à-dire plus la densité est grande, et plus est prononcé l'effet rotatoire, il est bien probable que les deux genres d'action existent en même temps.

Du reste, ces actions paraissent se faire sentir sur les molécules superficielles de certains corps. M. Kerr avait vu le plan de polarisation d'un rayon polarisé tourner d'une quantité sensible, quand ce rayon se réfléchissait sur du fer poli fortement aimanté. M. F. Fitzgerald² a reconnu que, dans ce cas, le rayon réfléchi est polarisé elliptiquement. Des armatures rectangulaires étaient

¹ *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. XV, p. 57.

² *Journal de physique de M. d'Almeida*, t. VI, p. 94.

appliquées sur les pôles d'un électro-aimant vertical, de manière qu'une arête de l'une d'elles était très-près d'une face latérale bien polie de l'autre armature. Un faisceau polarisé par un nicol et réfléchi sur cette face, était reçu dans un second nicol qui l'éteignait complètement, en l'absence de courant, quand les sections principales étaient perpendiculaires l'une à l'autre. Si alors on établissait le courant, la lumière reparaisait, et l'on ne pouvait l'éteindre en faisant tourner le second nicol; ce qui montre que la lumière réfléchie était polarisée elliptiquement.

Nous avons vu (3130) comment Fresnel a expliqué la rotation du plan de polarisation dans une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, par la décomposition du polarisé incident en deux polarisés circulaires de sens inverse inégalement retardés par la lame. M. H. Becquerel a montré que les corps homogènes soumis à l'action magnétique, produisent la rotation, en apportant aussi une différence de vitesse dans deux polarisés circulaires de sens inverse¹. Il montre d'abord qu'un polarisé circulaire est retardé dans son passage à travers un flint lourd soumis au magnétisme. Un faisceau polarisé circulairement à travers un nicol suivi d'une *lame quart d'onde* dont la section principale est inclinée à 45° sur celle du nicol, passe par une fente, est rendu parallèle par une lentille, et se divise en deux autres faisceaux en passant par deux fentes très-rapprochées parallèles à la première. Ces faisceaux donnent des franges d'interférence obtenues par la méthode de Fizeau et Foucault, traversent des parallépipèdes de flint lourd identiques, dont un est placé entre les pièces polaires d'un fort électro-aimant, et l'autre en dehors sur le prolongement de la ligne des pôles, de manière qu'ils donnent des rotations inverses sous l'influence du magnétisme (3157). Quand on lançait le courant, on observait un faible déplacement de franges, tantôt à droite, tantôt à gauche, suivant le sens de ce courant, indiquant une différence de vitesse entre les deux faisceaux qui avaient éprouvé la rotation en sens inverse.

Ces résultats montrent que la théorie de Fresnel peut s'appliquer à la rotation magnétique, et ils viennent à leur tour à l'appui de cette théorie, en montrant comment des modifications apportées dans l'état moléculaire d'une substance inactive, peuvent lui communiquer le pouvoir rotatoire.

CONCLUSION

Si nous jetons un regard en arrière sur la longue carrière que nous venons de parcourir, et si nous nous reportons aux détails historiques disséminés dans les diverses parties de cet ouvrage, nous verrons les phénomènes rapportés d'abord à des causes nombreuses et obscures; ces causes diminuer progressivement de nombre; les faits, isolés et sans liaison apparente, se rapprocher

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. LXXXVIII, p. 334.

pen à peu, et les théories se généraliser et se fondre les unes dans les autres. Bientôt on est arrivé à ranger tous les phénomènes sous quatre ou cinq causes générales qu'on est parvenu à définir, d'après leurs nombreux effets, et dont on a pu déterminer les lois dans les diverses circonstances où ces effets se manifestent.

Parmi ces causes générales, la *chaleur* et la *lumière* ont été spécialement étudiées au point de vue de leur nature première, et l'on est arrivé à expliquer les phénomènes qu'elles produisent, au moyen de l'hypothèse de l'*éther*, milieu universel sur lequel nous sommes revenu plus d'une fois, et dont l'existence, dans l'immense partie de l'espace que nous pouvons explorer au moyen de la vision aidée d'instruments perfectionnés, s'impose à notre entendement; car sans lui on ne pourrait expliquer la communication établie par la lumière entre notre globe et les corps célestes situés à des distances qui effrayent l'imagination. Cet éther, mis en vibration par les corps chauds et lumineux, sert d'intermédiaire entre les masses de matière pondérable disséminées dans l'espace, comme le fait l'air, au moyen du son, entre les objets terrestres en vibration. Hors des corps, les vibrations de l'éther peuvent produire, indépendamment des effets lumineux et calorifiques, des effets chimiques et des effets de phosphorescence et de fluorescence; et quand un rayon simple de réfrangibilité spéciale et isolé par le prisme, est capable de produire en même temps plusieurs de ces effets, il est établi qu'ils sont produits par les mêmes vibrations. C'est ce qui constitue le principe de l'identité, dont nous avons vu la confirmation dans la production des phénomènes d'*interférence*, de *double réfraction* et de *polarisation*, avec les *radiations calorifiques* et *chimiques*.

L'électricité doit être aussi considérée comme une manifestation de l'éther contenu dans les corps, et condensé autour de leurs molécules; comme l'attestent les phénomènes de la double réfraction. L'accumulation ou la raréfaction de cet éther dans un corps, le constitue dans un état électrique *en plus* ou *en moins*, dans lequel il tend à se débarrasser de son excès d'éther ou à s'approprier ce qui lui en manque; d'où des déplacements de ce fluide, qui se manifestent à l'extérieur par les phénomènes dits électriques. La translation du fluide éthéré à travers un conducteur étroit réunissant deux corps électrisés, l'un *en plus*, l'autre *en moins*, constitue un courant électrique.

Remarquons que, en dehors de nos sensations, les effets de l'électricité, et ceux de la chaleur obscure ou lumineuse, sont toujours des attractions ou répulsions, ou des actions intérieures dans lesquelles interviennent les *forces moléculaires*. Parmi ces forces, nous distinguons l'*affinité* chimique, qui produit des déplacements d'atomes sous l'excitation des mouvements de l'éther; déplacements qui, à leur tour, agissent sur l'éther en engendrant la chaleur et l'électricité. Dans ces réactions, les résultats se présentent toujours dans les conditions d'équivalence démontrées dans la thermodynamique, et généralisées par les lois de l'électrolyse, d'après lesquelles a été défini l'*équivalent d'électricité*, comparé aux équivalents chimiques des éléments que sépare le courant.

Ces échanges continuels, les uns dans les autres, des mouvements de l'éther et de la matière pondérable, ont conduit à admettre que tout mouvement est le résultat de la transformation d'un autre mouvement, qui l'a précédé et qui en est la cause immédiate. Le mot *force* n'est plus dès lors que l'expression de cette transformation; le mouvement naissant étant produit aux dépens de celui qui l'a précédé, et dont il représente l'équivalent mécanique, sans que nous puissions nous expliquer comment se fait cette transmission. Comme nous l'avons dit (I, 84), Descartes, expliquant tout par le mouvement aux prises avec la matière, avait, par un effort de génie, pressenti cette théorie, et c'est, en la développant, que les physiciens ont depuis été conduits à supposer, dans la partie de l'univers qui nous est connue, l'existence d'une certaine quantité de mouvement, provenant d'une impulsion première dont l'origine physique nous échappe, qui ne fait que se déplacer sous diverses influences, et produit ainsi tous les phénomènes que nous observons sur notre globe et dans l'immensité des espaces célestes.

Au milieu de toutes ces conceptions, se dresse une difficulté, jusqu'à présent insurmontable; c'est de concevoir les actions à distance, particulièrement les effets de l'*attraction*, mot qui ne fait qu'exprimer une tendance à l'agglomération, paraissant inhérente à la matière comme l'impenétrabilité elle-même, et s'exerçant entre les molécules de la plus petite parcelle de matière, aussi bien qu'entre les masses énormes et séparées par des distances immenses, qui se balancent dans les espaces célestes. La cause de cette tendance nous est inconnue, quoiqu'on pressente que l'éther, universellement répandu, joue encore ici le principal rôle; et cependant c'est à l'attraction au moins comme intermédiaire, que l'on est forcément conduit à rapporter tous les phénomènes, tant ceux que produit la gravitation et l'affinité chimique, que les phénomènes si variés qui sont dus à la chaleur, à la lumière et à l'électricité. Nous avons vu, en effet, que ces derniers agents ne sont que des causes secondaires, qui ne prennent naissance qu'aux dépens d'une certaine quantité de travail mécanique moléculaire ou extérieur. La cause première des phénomènes qui se rapportent à ces trois agents est donc celle du travail mécanique qui les fait apparaître. Or, nous ne trouvons en dernière analyse, comme origine des mouvements qui s'accomplissent dans l'espace et sur notre globe, que l'attraction. Voici comment cette force, toujours agissante, peut servir à expliquer les phénomènes de l'époque actuelle, et ceux qui ont présidé à la formation du système sidéral auquel nous appartenons.

A une époque, tellement reculée que les siècles ne sont en comparaison que des instants imperceptibles, la partie de l'espace accessible à nos investigations, était remplie de matière disséminée, dans un état de division extrême. Cette *matière cosmique*, douée d'attraction, s'est agglomérée peu à peu en amas séparés, plus denses, inégaux, et constituant ces *nébuleuses* que le télescope nous fait apercevoir aux confins de notre univers. La condensation, très-lente d'abord, puis de rapidité croissante, a été accompagnée d'un dégagement de

chaleur et de lumière, qui va lui-même en s'accélégrant, mais avec une lenteur telle que les changements n'en sont pas appréciables pour nous.

Certaines de ces nébuleuses, le travail de l'attraction continuant, se sont *résolues* en une infinité de foyers brillants; dans d'autres, un centre principal de concentration s'est formé, et, comme le mouvement de concentration n'a pu être partout dirigé vers un seul et même point, des mouvements opposés se sont croisés en convergeant les uns vers les autres et en imprimant à la masse une rotation, dont la vitesse a été en augmentant, à cause de la diminution de volume. Cependant, dans cette masse tourbillonnante, des foyers secondaires tournant sur eux-mêmes, se sont formés çà et là, entraînés dans la révolution générale. La chaleur dégagée par la concentration se dissipant ensuite, ces foyers se sont isolés, et l'ensemble a constitué un système semblable à notre système solaire, dans lequel les mouvements se font généralement dans le même sens, attestant ainsi la communauté d'origine de tous les corps qui le composent. Diverses nébuleuses, *diffuses, résolubles, spirales, à plusieurs foyers*, nous montrent ainsi des mondes en formation, à différents états d'avancement.

Les étoiles constituent des masses incandescentes analogues à notre soleil et retenant autour d'elles des masses plus petites, auxquelles le refroidissement, plus avancé, a fait perdre la faculté de répandre la lumière. Plusieurs centres, de masses comparables, peuvent se mouvoir dans un même système, et l'on a alors le phénomène des étoiles multiples, et en particulier des étoiles doubles dont les composantes possèdent des mouvements relatifs qui prouvent leur dépendance mutuelle.

Le soleil forme la masse centrale du système auquel appartient notre terre. La chaleur qu'il rayonne en tout sens, est le résultat de l'accumulation du travail de l'attraction qui en a aggloméré la masse, et une portion de cette chaleur, actuellement reçue par notre globe, s'y transforme en travail et y produit, comme nous l'avons vu (II, 609), les mouvements, c'est-à-dire tous les phénomènes, y compris ceux des êtres vivants qui, sans cette chaleur, ne pourraient subsister. On doit donc regarder ces phénomènes comme des conséquences d'une impulsion primitive, ayant pour origine immédiate l'attraction, et emmagasinée, pour ainsi dire, dans le soleil, qui nous en transmet peu à peu une faible partie. Dans notre système planétaire, il ne se créerait plus de travail, et tous les mouvements ne seraient que la conséquence du travail de l'attraction accumulée dans le soleil depuis une immensité de siècles. Notre système planétaire, et en particulier notre globe, sont dans un état transitoire, qui ne nous paraît constant qu'à cause de la lenteur des changements qui s'y accomplissent, comparée aux durées sur lesquelles portent nos observations.

On voit comment on peut concevoir la formation de notre monde solaire en partant de l'attraction. Celle-ci semble n'être elle-même qu'un effet encore obscur, il est vrai, de l'agitation de l'éther, agitation qui fait partie de ce mouvement primordial d'origine inconnue dont nous avons parlé, animant en

particulier les atomes de l'éther. La matière n'est plus dès lors douée d'attraction, et sa tendance au rapprochement lui viendrait du dehors.

Quant à cette matière elle-même, doit-on la considérer comme formée d'atomes aussi variés que ceux que l'on considère en chimie? Beaucoup de physiciens, particulièrement M. Saigey, admettent qu'il n'existe qu'une espèce d'atome; l'atome d'éther, dont tous les autres ne seraient que des agrégats en nombre varié, et avec arrangement différent; de sorte que la limite de divisibilité métaphysique de la matière s'arrêterait à l'atome d'éther.

La découverte de l'analyse spectrale est venue ajouter à cette hypothèse remarquable un appui inattendu. D'abord on a reconnu que les substances formées dans l'espace par la concentration de la matière cosmique, sont les mêmes que celles que nous observons sur notre globe. Ensuite, en dirigeant le spectroscope vers différentes régions de l'espace, on a constaté que les étoiles disséminées dans une même région présentent, en majorité, le même type, et se meuvent dans le même sens (2650), ce qui montre que ces astres ont une origine commune, et vient confirmer l'explication de leur formation.

Maintenant, comment s'effectue l'agrégation des atomes d'éther pour constituer les divers atomes pondérables? Comment l'agitation primordiale de l'éther peut-elle pousser les corps les uns vers les autres, dans les espaces célestes aussi bien que dans l'intérieur des corps en donnant lieu à la *cohésion* ou à l'*affinité*? Autant de questions auxquelles la science n'a encore fait que des réponses incertaines et incomplètes. Mais, dès à présent, la question est posée; quelques solutions heureuses, quoique vagues, ont déjà été données, et il est permis d'espérer que les voiles qui enveloppent ce grand problème tomberont peu à peu l'un après l'autre, et que dans un temps, moins éloigné peut-être qu'on ne serait tenté de le supposer, on pourra entrevoir avec quelque sûreté les principaux traits d'un système général rationnel embrassant dans une vaste synthèse tous les phénomènes de l'univers.

FIN



ERRATA

POUR LE QUATRIÈME VOLUME

Pages :	Lignes :	Au lieu de :	Mettre :
40	7 en remontant.	azote	azotate
50	23	$i' = i + n$	$i' = i + r$
85	3	A'r	A'a
88	2	traverse	transverse
135	4 en rem.	$on - oc \dots o'c =$	$(on - oc) : (o'n' - o'c) =$
140	6	en ll'	en ce'
177	16	(2564)	(2564)
194	17 en rem.	$(l - rv)$	$(l - 2r)$
264	17	de Cassiopée	de γ de Cassiopée
419	12	renverser le second rapport.	
432	9 en rem.	Dollend	Dollond
473	2 en rem.	(I, 45)	(I, 46)
490	10	$on - an =$	$on - An =$
531	10	(II, 694)	(II, 969)
627	6 et 9	$\sin^2(\alpha - \beta)$	$\cos^2(\alpha - \beta)$

Tome I, p. 680, lig. 5 :

Au lieu de la long. totale des deux branches développées; mettre la petite fraction à ajouter.

TABLE DES MATIÈRES

DU QUATRIÈME VOLUME

LIVRE VI

OPTIQUE

CHAP. I. — NATURE DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE		I. Miroirs plans. — Applications diverses. Réflexions multiples. Rayons en ligne courbe.....		46
§ 1. — De la nature de la lumière et de son origine.....	3	II. Goniomètres de réflexion. — Mesure de l'angle d'un prisme....		58
I. Systèmes sur la lumière.....	3	III. Héliostats. — Sidéostat.....		62
II. Sources de lumière. — Phosphorescence.....	5	§ 3. — Réflexion sur les surfaces courbes, et instruments d'optique qui s'y rapportent.....		71
§ 2. — Propagation de la lumière.....	41	I. Marche des rayons réfléchis. — Caustiques. Miroirs sphériques.	74	
I. Propagation en ligne droite. Ombres. — Ombre, pénombre, chambre noire simple.....	41	II. Miroirs sphériques à petite ouverture. — Formule. Foyers conjugués. Images focales. Images vues dans les miroirs sphériques.	75	
II. Mesure de la vitesse de la lumière. — Méthode de Rømer. Aberration. Mesure sur de faibles distances.....	46	III. De quelques miroirs courbes non sphériques. — Phares de réflexion. Anamorphoses.....	86	
§ 3. — Photométrie. — Lois de l'intensité. Photomètres divers. Résultats. Absorption par les milieux.....	24	CHAP. III. — DIOPTRIQUE		
CHAP. II. — CATOPTRIQUE		§ 1. — De la réfraction simple et de ses lois.....		90
§ 1. — Lois de la réflexion. Pouvoirs réflecteurs.....	39	I. Réfraction dans les solides et les liquides. — Lois de la réfraction. Angle limite.....		90
I. Lois de la réflexion. — Réflexion diffuse.....	39	II. Réfraction atmosphérique. Mirage. — Tables de réfraction..		400
II. Pouvoirs réflecteurs.....	43	§ 2. — Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces planes.....		409
§ 2. — Réflexion sur les surfaces planes, et instruments d'optique qui s'y rapportent.....	46			

I.	Rayons entrant par la surface plane d'un milieu indéfini. — Diacaustiques.....	109
II.	Rayons traversant un milieu terminé par des plans. Prismes. — Lamé à faces parallèles. Prismes. Déviation. Chambres claires....	112
§ 3.	— Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes. Lentilles..	124
I.	Surface sphérique terminant un milieu indéfini.....	124
II.	Lentilles. — Formule. Cas de plusieurs lentilles. Point lumineux hors de l'axe. Images focales.....	129
III.	Instruments relatifs aux images projetées par les lentilles. — Chambres noires. Mégascopes. Appareils de projection. Phares de réfraction.....	144
§ 4.	— Mesure des indices de réfraction.....	159
I.	Indices de réfraction des solides et des liquides. — Méthode de Newton; par réflexion totale....	159
II.	Indices de réfraction des gaz. — Vapeur d'eau. Vapeurs à températures élevées.....	172

CHAP. IV. — CHROMATIQUE

§ 1.	— Dispersion. — Spectre. Différente réfrangibilité des rayons. Recomposition de la lumière.....	180
§ 2.	— Décomposition de la lumière par absorption. — Polychroïsme.....	195
§ 3.	— Décomposition de la lumière par réflexion diffuse. Théorie des couleurs. — Couleurs des corps; des flammes. Mélange des couleurs. Nomenclature.....	203
§ 4.	— Achromatisme.....	215
I.	Dispersion. — Pouvoir dispersif, etc.....	215

II.	Prismes achromatiques. — Diaporamètres.....	220
III.	Lentilles achromatiques. — Cas de deux lentilles.....	225

CHAP. V. — ÉTUDE DES RADIATIONS

§ 1.	— Effets lumineux et calorifiques.....	228
I.	Distribution de la chaleur et de la lumière dans le spectre.....	228
II.	Des raies du spectre. — Spectre du soleil, de diverses sources..	230
III.	Analyse spectrale. — Spectroscopes. Cartes spectrales.....	239
IV.	Renversement du spectre. — Spectroscopie sidérale.....	256
§ 2.	— Effets chimiques. Photographie.....	268
I.	Photochimie. — Spectre chimique. Comparaison des rayons chimique et lumineux.....	268
II.	Photographie. — Sur plaque, sur papier, sur verre. — Héliogravure. Chromophotographie.....	276
§ 3.	— Effets phosphorogéniques.....	297
I.	Phosphorescence excitée par la lumière. — Phosphoroscopes...	297
II.	Fluorescence.....	303
§ 4.	— Effets physiques divers. — Radiomètre.....	307

CHAP. VI. — MÉTÉORES DÉPENDANT DE LA RÉFLEXION ET DE LA DISPERSION DE LA LUMIÈRE

§ 1.	— Absorption et dispersion par l'atmosphère. — Couleur bleue. Scintillation, Crépuscule, aurore.....	316
§ 2.	— Arc-en-ciel.....	327
§ 3.	— Halos, parhélies et phénomènes concomitants... ..	338

CHAP. VII. — DE LA VISION

§ 1.	— Vision simple.....	349
I.	Description de l'organe de la vue et mécanisme de la vision.....	349

II. De la netteté de l'image et des conditions de sa formation.....	354
III. Ajustement de l'œil, besicles. — Rôle du cristallin. Défauts de la vue. Optomètres.....	358
IV. Phénomènes relatifs à la sensibilité de la rétine. — Durée de l'impression.....	368
V. Rapport entre le jugement et la sensation. — Vision binoculaire, Stéréoscope.....	379
VI. Appréhension des couleurs. Couleurs accidentelles.....	395
§ 2. — Vision aidée des instruments grossissants.....	401
I. Microscopes. — Loupe. Microscope composé. Application à la mesure des indices de réfraction.....	401
II. Lunettes et télescopes. — Lunettes astronomiques, terrestres. Télescopes de réflexion.....	420
CHAP. VIII. — SYSTÈME DES ONDULATIONS. COMPARAISON A CELUI DE L'ÉMISSION	
§ 1. — Du système des ondulations.....	441
I. Principe du système des ondulations. — Principe d'Huyghens; des interférences. Longueur d'ondulation..	444
II. Explication de la réflexion et de la réfraction. — Réfracteurs interférentiels. Influence du mouvement d'un milieu sur l'éther.....	455
III. Décomposition de la lumière. Action sur les corps.....	468
§ 2. — Comparaison du système de l'émission à celui des ondulations.....	472
I. Réflexion et réfraction dans le système de l'émission.....	472
II. Expériences qui décident entre les deux systèmes.....	475
CHAP. IX. — DE LA DIFFRACTION RÉSEAUX	
§ 1. — Diffraction.....	480
I. Diffraction par des bords rectilignes	

indéfinis. — Bord d'un écran. Fente. Écran étroit.....	480
II. Diffraction par des ouvertures ou écrans très-petits dans tous les sens. — Apparences au foyer des lunettes.....	491
§ 2. — Réseaux.....	496
§ 3. — Météores dépendant de la diffraction. — Arcs-en-ciel surnuméraires. — Couronnes...	503
CHAP. X. — ANNEAUX COLORÉS	
§ 1. — Anneaux dans les lames minces.....	509
I. Faits et lois expérimentales.....	509
II. Théorie des anneaux dans les lames minces.....	516
§ 2. — Couleurs dans les lames épaisses.....	523

CHAP. XI. — DOUBLE RÉFRACTION

§ 1. — Cristaux à un axe.....	529
I. Phénomènes et lois de la double réfraction — Cause générale. — Construction d'Huyghens.....	529
II. Micromètre à double image.....	543
§ 2. — Cristaux à deux axes... ..	516

CHAP. XII. — POLARISATION RECTILIGNE

§ 1. — Caractères de la lumière polarisée et explication de la polarisation.....	551
I. Définition de la polarisation. Polariscopes divers.....	551
II. Explication de la polarisation par les ondulations. — Direction des vibrations de l'éther.....	555
§ 2. — Polarisation par réflexion et réflexion de la lumière polarisée.....	562
I. Lois de la polarisation par réflexion. — Angle de polarisation. — Polarisation de la chaleur. — De l'atmosphère.....	562
II. Réflexion de la lumière polarisée et théorie mécanique de la réflexion. — Formules de Fresnel. Changement du plan de polarisation....	572

III. Théorie de la polarisation par réflexion.....	580
§ 3. — Polarisation par réfraction, et réfraction de la lumière polarisée.....	583
I. Lois de la polarisation par réfraction. — Piles de glaces. Polarisation par émission.....	583
II. Réfraction de la lumière polarisée et théorie de la polarisation par réfraction. — Cas des radiations calorifiques et chimiques.....	588
§ 4. — Polarisation par double réfraction, et théorie de la double réfraction.....	592
I. Polarisation par double réfraction et double réfraction de la lumière polarisée.....	592
II. Application à la photométrie et à la polarimétrie. — Résultats photométriques.....	597
III. Théorie de la double réfraction. — Construction des rayons réfractés. Réfraction conique.....	605
CHAP. XIII. — POLARISATION CHROMATIQUE	
§ 1. — Rayons parallèles.....	619
I. Couleurs dans les lames cristallines. — Influence de l'épaisseur. Théorie de Fresnel. Applications.....	619
II. Couleurs dans la double réfraction accidentelle. — Application à l'élasticité.....	633
§ 2. — Lumière convergente..	641
I. Anneaux dans les cristaux à un axe. — Théorie de Fresnel.....	641
II. Courbes dans les cristaux à deux axes. — Angle des axes.....	647
III. Lames croisées. Dichroïsme. Houppes.....	653
§ 3. — Étude des cristaux par la polarisation chromatique. — Microscopes polarisants. Application à l'isomorphisme...	659
CHAP. XIV. — POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE	
§ 1. — Caractères et origine de la polarisation circulaire et elliptique. — Polariscopes circulaires et elliptiques.....	664
§ 2. — Polarisation elliptique par réflexion.....	674
I. Réflexion totale et réflexion métallique. — Parallépipède de Fresnel. Différence de phase. Couleur des métaux.....	674
II. Polarisation elliptique par réflexion sur les corps transparents. — Formules de Cauchy. Réflexion métallique sur des corps non métalliques.....	684
III. Lumière polarisée des anneaux dans les lames minces.....	686
CHAP. XV. — POLARISATION ROTATOIRE	
§ 1. — Polarisation rotatoire moléculaire.....	689
I. Phénomènes. Lois. Théorie. — Mesure du pouvoir rotatoire. Théorie de Fresnel.....	689
II. Polarisation rotatoire des fluides. — Liquides. Vapeurs.....	706
III. Applications de la polarisation rotatoire. — Dissolutions. Études chimiques. Saccharimétrie. Hémiétrie cristalline.....	745
§ 2. — Polarisation rotatoire magnétique. — Sens de la rotation. Lois.....	728
— CONCLUSION.....	744

TABLE ALPHABÉTIQUE ET ANALYTIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LES QUATRE VOLUMES

NOTA. — Les chiffres romains indiquent les tomes, et les chiffres arabes, les pages.

A

- Abatage** des arbres par l'électricité, III, 446.
- Aberration** des étoiles; application à la vitesse de la lumière, IV, 19.
- A. de réfrangibilité** ou *chromatique*, des lentilles, IV, 193; de l'œil, 354.
- A. de sphéricité** des miroirs sphériques, IV, 77, 83; dans la réfraction par les surfaces sphériques, 123; des lentilles, 144; de l'œil, 354.
- Absorptiomètre**, I, 413.
- Absorption**, dans la préparation des gaz, I, 331; des gaz par les liquides, 412; des gaz par les solides poreux, 456, 419; application à la liquéfaction des gaz, II, 386; — développe de la chaleur, I, 157; II, 536.
- A. de la chaleur** par les lames diathermanes, II, 55; par les gaz et vapeurs, 58, 60; des différents rayons, 66; formule, 71; des rayons solaires par le prisme, II, 74.
- A. atmosphérique** de la chaleur solaire, II, 495; de la lumière, IV, 38, 316.
- A. de la lumière** par les milieux, loi, IV, 195; mesures photométriques, 37; par les substances colorées, formules d'absorption, 195; représentations graphiques, 196; influence de la chaleur, 198; explication dans le système des ondulations, 469.
- A. à travers les cristaux**, IV, 655; des rayons ordinaire et extraordinaire, 656.
- A.** des rayons chimiques par les milieux diaphanes, IV, 274; des rayons ultra-violetts par le sulfate de quinine, 306.
- Accès** de facile réflexion et de facile transmission, IV, 515.
- Accidentelles** (auréoles, couleurs), IV, 399.
- Accord** consonnant, I, 584; parfait, 585; théorie, 606.
- Accord** des tuyaux d'orgue, I, 633; par les battements, 603.
- Achromatisme** (α *privatif*; $\chi\rho\omega\mu\alpha$, couleur), IV, 215; premiers essais, 219; — des prismes, 220; — des lentilles, 225.
- A.** du microscope, IV, 408; des télescopes, 423, 431.
- Achromatopsie** (α , $\chi\rho\omega\mu\alpha$, $\delta\psi\iota\varsigma$, vue), IV, 396.
- Acide carbonique**, liquéfaction et solidification, II, 386.
- *tartrique*, pouvoir rotatoire, IV, 716; dispersion rotatoire, 723; propriétés, 724. — **A. racémique**, 725. — **A. aspartique**, malique inactifs, 727.
- Acides**, leur décomposition par la pile, III, 482.
- Acier**, trempe, I, 491; couleurs irisées à la surface, 492; force coercitive, III, 46, 42.
- Acoustèle** ($\acute{\alpha}\kappa\omicron\upsilon\omega$, entendre; $\tau\eta\lambda\epsilon$, loin, I, 642.

- Acoustique** (ἀκοῦσις, entendre), I, 511.
- Actinomètre** (ἀκτις, rayon; μέτρον), pour la chaleur solaire, II, 493, 499; pour la température de l'espace, 644.
- A. électrochimique, IV, 271.
- Actions chimiques**, source de chaleur, II, 538 (voy. SOURCES DE CHALEUR); sources d'électricité, III, 343 (voy. SOURCES D'ÉLECTRICITÉ).
- Adhésion**, I, 153; capillaire, 279; des liquides aux ajutages, 221; produite par les gaz qui s'écoulent, 396.
- Aérolithes**, cause de l'incandescence, II, 528.
- Aérostats** (aer, air; stare, se tenir); découvert, I, 431; premiers voyages aériens, 433; construction, 434; manière de les gouverner, 436. Applications à la guerre, 440; à la science, 442.
- Aérostiers**, I, 440.
- Affaiblissement de la pile**, cause, III, 364.
- Agents naturels**, I, 1, 13.
- Agomètre** (ἀγός, conducteur; μέτρον, mesure), IV, 593, 611.
- Aigrette électrique**, III, 214.
- Aiguille aimantée**, III, 17; libre, 18, 699; des boussoles, 63.
- A. d'inclinaison, III, 21; dans les différents azimuts, 22; astatique, 24. — Variations de l'aiguille aimantée, 78 (voy. VARIATIONS).
- A. est déviée par les courants électriques, III, 339.
- A. électrique, III, 98; de Haüy, 317; électromagnétique tournant par le magnétisme du globe, III, 650.
- A. thermo-électrique, II, 511.
- Aimant naturel**, III, 6; artificiel, 7 (voy. AIMANTATION). Propriétés générales des aimants, 7; pôles, 8, 15, 21. — Théorie de Coulomb, 14; action sur le fer doux, 12; éléments magnétiques, 13; action de la terre, 17, 54, 690.
- A. Comparaison de la force des A., III, 28; distribution de la force, 28, 32; étude par arrachement, 29 (voy. MAGNÉTISME). — Circonstances qui influent sur la force, volume, forme, 41; trempe, 42; armatures, 46; chaleur, 52.
- A. *Feuilletés*, III, 49.
- A. Actions sur les courants, III, 688; assimilation aux solénoïdes, 698; théorie électromagnétique, 696; rotation des courants par les aimants, 701; des aimants par les courants, 703.
- A. *terrestre* (hypothèse de l'), III, 49, 21; théorie électrodynamique, 688.
- A. *de Ceylan* (tourmaline), III, 392.
- Aimantation** par les aimants, III, 35; simple touche, 36; double touche, 37; — par la terre, 40; par les électroaimants, III, 647.
- A. par les courants, hélices dextrorsum et sinistrorsum, III, 641; — par l'électricité ordinaire, 642; circonstances qui influent, 642, 644.
- Mouvements moléculaires pendant l'aimantation, 656, 660; coexistence de deux états magnétiques, 662.
- Théorie électromagnétique de l'aimantation, III, 697.
- Air**, pesanteur, I, 307; composition, 425; lois de la compression, 333.
- A. comprimé, effets et applications, I, 375, 379; effets sur les êtres vivants, 380.
- A. raréfié, influence sur la vie, I, 329; sur les êtres vivants.
- A. manière de le faire vibrer, I, 547; vibration des colonnes, 617; des masses de forme quelconque, 630. — Indice de réfraction, IV, 172 (voy. ATMOSPHÈRE).
- Ajustement**, de l'œil, IV, 358; rôle du cristallin, 361.
- Ajutages** (d'ajouter), action sur l'écoulement des liquides, I, 220; des gaz, 396.
- Alambic** (al, article arabe; ἀμβύξ, vase), II, 384.
- Alcalis**, décomposés par la pile, III, 481.
- Alcaloïdes**, propriété rotatoire, IV, 717.
- Alcarazas** (mot arabe), II, 352.
- Alcool absolu**, I, 204; sa congélation partielle, II, 312; décomposition par la pile, III, 485.
- Alcoomètres** (alcool, μέτρον, mesure), I,

- 204; centésimal, 204; par dilatation, II, 210 (voy. ANÉOMÈTRE).
- Alizés** (vents), (*alis*, régulier, vieux français), II, 687.
- Alliages**, loi de leur élasticité, I, 459; de leur chaleur spécifique, II, 283; de leur chaleur latente, 348.
- Allotropie** (ἄλλο; différent; τρέπω, tourner), I, 162.
- Allumage** du gaz par l'électricité, III, 781.
- Allumoir** électrique, III, 446.
- Altazimuth**, I, 26.
- Altitude**, mesurée au moyen du baromètre, I, 427; au moyen de la température d'ébullition, II, 366.
- Alternatives** (méthode des), III, 148; voltaïques, action sur les muscles, 438.
- Aluminium**, comme électrode, III, 480, 779.
- Ammonium**, par électrolyse, III, 482.
- Anaclastique** (ἀνάκλω, réfracter), IV, 90 (voy. DIOPTRIQUE).
- Analyse**, par électrolyse, III, 479.
- A. spectrale, IV, 239; des astres, 256.
- A. d'un mélange de sons, I, 580, 637.
- Analyseur polariscopique**, IV, 551; de Delezenne, 552 (voy. POLARISCOPE).
- Anamorphoses** (ἀνά, exprime qu'on défait; μορφή, forme), par réflexion, IV, 89.
- Anche battante**, libre, I, 643; théorie, 644; instruments à anche, 646.
- Anémographes**, II, 677, 679.
- Anémomètres**, (ἀνεμος, vent, μέτρον), II, 675; de rotation, 676; enregistreurs, 677; électromagnétiques, 679; électrochimiques, 682.
- Anémoscopes** (ἀνεμος, σκοπέω, observer), II, 671; enregistreurs, 672, 679.
- Anéroïde** (baromètre) (α, ρεω, couler), I, 325.
- Angle** de raccordement capillaire, I, 264.
- A. des cristaux (mesure de l'), IV, 58, des prismes, 61 (voy. GONIOMÈTRE).
- des axes des cristaux biaxes, IV, 649.
- A. de dispersion, IV, 215.
- A. limite de réfraction, IV, 95; explication dans le système des ondulations, 458; de l'émission, 474.
- A. de polarisation, IV, 564, 682; de rotation du plan de polarisation, 493.
- A. visuel, IV, 12.
- Animaux** dans le vide, I, 370.
- A. à sang chaud ou froid, température, II, 511, 515; hibernants, 513; — produisent de l'électricité, 417 (voy. ÉLECTRICITÉ PHYSIOLOGIQUE). — Action des courants électriques, 435. (voy. COURANTS).
- A. phosphorescents, IV, 7.
- Anion**, III, 479.
- Anneaux colorés** dans les lames minces, IV, 509; lois, 413; théorie des accès, 515; explication dans le système des ondulations, 516; anneaux à centre blanc, 518; vus obliquement, 519; sont polarisés, IV, 686.
- A. formés dans la lumière polarisée, 687.
- A. dans les lames épaisses, de Newton, etc., IV, 523, 526.
- A. autour de l'axe des cristaux uniaxes, IV, 641; explication, 644; cas des biaxes, 647.
- A. Per se, IV, 646; du quartz perpendiculaire, 698.
- A. par diffraction, IV, 491; au foyer des lunettes, 493.
- A. produits par les corpuscules, couronnes, IV, 504, 507.
- A. par réflexion dans un tube, IV, 52.
- A. produits par l'électricité; de Priestley, III, 224; de Nobili, 493.
- Anode**, III, 479.
- Anorthoscope**, IV, 375.
- Anthélie** (ἀνθλιος, opposé au soleil), IV, 339; explication, 346.
- A. ou cercle d'Ulloa, IV, 508.
- Antipodes** réciproques, I, 91.
- Aplatissement** de la terre, I, 126; cause, 126; mesure, 127.
- Apophyllite**, anomalies dans la lumière polarisée, IV, 646.
- Apothéose**, ombres frangées; IV, 508.
- Appareil** de Biot pour la polarisation rotatoire, IV, 707; de Cavendish, I, 145; d'induction volta-électrique, III, 759; magnéto-électriques, 783; — à couronne, II, 217; électromusical, III,

- 648; de Haldat, I, 472; d'Inghenousz, II, 444; de Leslie, II, 88; de Melloni, II, 33; de Norremberg, IV, 649; de projection des phénomènes de polarisation, IV, 620; de Soleil pour l'angle des axes des cristaux, IV, 643; de Thilorier, II, 386; etc. (voy. MACHINES).
- Araignée de Franklin**, III, 444, 489.
- Arbre de Saturne**, III, 547.
- Arc-en-ciel**, IV, 327; rayons efficaces, 329; explication de l'arc intérieur, 331; de l'arc extérieur, 333; arcs surnuméraires, 333, 503; expériences, 334; la lumière est polarisée par réflexion, 569; cas particuliers, 336.
- *blanc*, ou *cercle d'Ulloa*, IV, 508.
- Arcs tangents des halos**, IV, 339, 343, 244.
- Arc voltaïque**, III, 463; transport des particules dans l'arc; influence des électrodes, 464; échauffement inégal, 467; action du magnétisme, 469; effets calorifiques, 470; lumineux, 472; (voy. ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE). — Stratification de la lumière de l'arc, 473, 774; cause, 777.
- Archet**, théorie, I, 658.
- Archimède** (*principe d'*), I, 480; applications aux corps flottants, 484; applications diverses, 486.
- (*problème d'*), I, 483.
- Aréomètre** (*ἀραιός*, léger; μέτρον), Ar. *balance*, I, 493; de *Fahrenheit*, 198.
- A. *à poids constant*, de *Baumé*, 200; universel, 204; formule, 202.
- Armature des aimants**, III, 46; des aimants naturels, 49; des électro-aimants, influence sur leur force, 654.
- Armatures des condensateurs électriques**, III, 488.
- Arrosage du globe**, II, 735, 738.
- Arrosoir magique**, I, 331; électrique, III, 445.
- Ascenseur hydraulique**, I, 478.
- Astérisme** (*ἀστὴρ*, étoile) des cristaux, IV, 638.
- Astigmatisme** (*α* priv.; στήλαξ, marque), IV, 367.
- Aspirateur**, simple, double, II, 703; à mercure, I, 369.
- Aspiration dans les ajutages**, I, 396.
- Astres**, translation évaluée par le spectroscope, IV, 266. — Photographiés, 289.
- Astromètre**, IV, 36.
- Atmidomètre** (*ἀτμός*, vapeur; μέτρον), II, 718.
- Atmolyse** (*ἀτμός*, vapeur; λύω, délier), I, 409, 422.
- Atmosphère**, I, 307; constitution, I, 424; hauteur, 425; *id.* par le crépuscule, IV, 325; poids, 427; phénomènes barométriques, II, 660 (voy. BAROMÈTRE); — température, II, 643 (voy. TEMPÉRATURE); rôle dans la distribution de la chaleur sur le globe, 646. — état électrique, III, 286 (voy. ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE).
- A. *réfraction*, IV, 400; décompose la lumière, 349; éclat dû à la réflexion, 347; mesure, 348; couleur bleue, 349; — polarise la lumière par réflexion, 570; la chaleur, 572.
- A. *solaire*, II, 494 (voy. SOLEIL).
- Atomes** (*α* priv.; τέμνω, couper), I, 46 (voy. MOLÉCULES).
- Atomiques** (*poids*), relation avec la chaleur spécifique, II, 254, 260; avec le magnétisme spécifique, III, 782.
- Attraction universelle**, I, 86 (v. GRAVITATION); des montagnes, 443.
- A. *moléculaire*, 454, 460; est sensible chez les gaz, 346; comment elle y varie avec la distance, 348.
- A. *et répulsion capillaire*, I, 278.
- A. *électrique*, III, 402; explication, 444; dans la théorie d'un seul fluide, 442; lois, par la balance électrique, 437; par les oscillations, 450; balance biffle, 441.
- A. *magnétique*, III, 44; lois, méthodes des oscillations, balance de torsion, 25.
- A. *d'un aimant par un courant*, III, 639.
- Atwood** (*machine d'*), I, 404; électromagnétique, III, 871.
- Audition**, I, 444, 733 (voy. OÛIE).
- Auréole solaire**, II, 492; IV, 261.
- Auréoles accidentelles** (vision), IV, 399.

- Aurore et crépuscule**, IV, 323; couleurs de l'aurore, 324.
- A. boréale, polaire**; description, III, 300; explication, 304; action sur l'aiguille aimantée, III, 91, 300; son spectre, IV, 255.
- Averse**, action sur le baromètre, II, 746.
- Avertissements météorologiques**, II, 699.
- Avertisseur des télégraphes électriques**, III, 815.
- Axe cristallographique des cristaux**, I, 449.
- A. optique**, IV, 533; des biaxes, 546, 610; définition exacte, 618; détermination et mesure de l'angle, 649; d'élasticité des cristaux, 606.
- A. d'un miroir sphérique**, II, 48, et IV, 75, 80; principal d'une lentille, 129; secondaire, 136.
- B.**
- Bain électrique**, III, 441.
- Balance** (*bis, lanx, bassin*), théorie, I, 136; sensibilité, 137; de précision, 139; de Roberval, 142; de Cavendish, 145; hydrostatique, 182.
- B. magnétique** de Coulomb, III, 25; *électrique*, *id.* 137; bifide de Harris, 141; — *électromagnétique*, 574.
- Balancier des machines à vapeur**; forme d'égale résistance, I, 483.
- B. électrique**, III, 190.
- Ballons**, I, 431 (*voy. AÉROSTATS*).
- Banc de diffraction**, IV, 449, 482; de Melloni, II, 53; des plaques, I, 684.
- B. de résistance électro-dynamique**, III, 609.
- Bandes isothermes**, II, 627.
- Banquise des mers polaires**, II, 657.
- Barocentrique** (*courbe*), I, 127.
- Baromètre** (*βάρος, poids; μέτρον, mesure*), construction, I, 308; théorie, 310; de précision, 313; à cadran, 324; sans mercure, 325; tronqué, 360; suisse, 428.
- (*corrections du*), I, 317; observation au moyen de l'électro-magnétisme, III, 870; — usages, I, 322; indique les changements de temps, 323; mesuro des hauteurs, 427; formule de Laplace, 429.
- B. à maximum et minimum**, II, 661; enregistreur, 620, 661.
- B. balance**, II, 662.
- B. (hauteurs moyennes du)**, II, 664; variations accidentelles, 666; var. horaires, 668.
- Barométrographe** (*baromètre, γράζω*), II, 661; photographique, 620.
- Baroscope** (*βάρος, σκοπέω, voir*), I, 308.
- Barre** (lois des températures), II, 151, 153; dans un fil, 155.
- B. de Savart**, I, 577.
- Barreaux aimantés**, III, 7, disposition dans leur boîte, 46.
- Base de sustentation**, I, 95.
- Bateaux à vapeur**, invention, II, 465; propulseur à hélico, 468; disposition des chaudières, 470.
- Bâtiments de graduation des salines**, II, 384.
- Battements**, I, 601; son résultant, 603; usage pour accorder l'orgue, pour évaluer le nombre de vibrations, 603.
- B. par influence mutuelle de deux corps vibrants**, I, 727.
- B. dans le fer pendant le passage intermittent d'un courant**, III, 664.
- Batterie électrique**, III, 190; manière de régler la charge, 191.
- *d'induction*, III, 768.
- *électro-tellurique*, III, 789.
- *secondaire à lames de plomb*, III, 380; effets, 382.
- *galvanique ou voltaïque*, III, 334; voltaïque à gaz, 384, 509.
- Bec d'Argand**, II, 546; de Bunsen, 548; multiple des phares, IV, 34, 157.
- Bélier hydraulique**, I, 226.
- Bémols et dièses**, I, 590.
- Besicles** (*bis, oculi*), IV, 364.
- Biaxes, axes, sections principales**, IV, 547; structure, 548.
- Bijoux électromagnétiques**, III, 874; colorés par diffraction, IV, 501.
- Bi-prisme** (*interférences*), IV, 451.

Biquartz à deux rotations, IV, 696.
Bobine de Ruhmkorff, III, 762; cloisonné, 764; effets, 766; applications, 781; de Siemens, 792.
Boîte à étoupe, ou *presse-étoupe*, I, 168.
Bouche, influence des cavités sur les sons articulés, 743; étude phonéoscopique, IV, 522.
B., embouchure des tuyaux d'orgue, I, 615.
Bougie Jablochhoff, III, 881.
Bouilleurs des chaudières à vapeur, II, 454.
Boule périscopique, IV, 85.
Bouquet magique, IV, 86.
Bourçons des jeux d'orgue, I, 617.
Boussole (*buzola*, boîte), de déclinaison, III, 58; de Gambey, 59; diverses, 60; marine, 63; — influence du fer des navires, 54; — historique, 64.
B. d'inclinaison, III, 69; — des variations en déclinaison, 79; en inclinaison, 82.
B. des intensités, 75.
B. des sinus, des tangentes, III, 574.
Bouteille de Leyde, III, 187; l'électricité reste sur le verre, 188; mouvements produits par l'électricité libre, 190.
 — *électrométrique* de Lane, III, 192, 633.
Bouton de Barthon, IV, 502.
Brachistochrone ($\beta\rho\chi\iota\sigma\tau\omicron\varsigma$, le plus court; χρόνος, temps), I, 108.
Briquet, à gaz hydrogène, I, 157; à pierre, II, 519; à air, 527; électrique, III, 222; de Saturne, 446.
Brises, de terre et de mer, II, 685; des montagnes, 685.
Bronze, effet de la trempe, I, 493.
Brouillards, II, 733; locaux, 734; secs, glacés, 734.
Bruit, analyse des sons qui le composent, I, 599; son bref, 599; limite de durée, 600.
Brûleur de Bunsen, II, 548.
Brume, II, 733.

C

Cabinets parlants, I, 566.
Câbles télégraphiques sous-marins, III, 847.

Cadavres, reviennent à la surface de l'eau, I, 186; excités par l'électricité, III, 430.
Caisse catoptrique, IV, 56.
C. des instruments à cordes, I, 635, 669; de résistance électrodynamique, 595.
Caléidophone ($\kappa\alpha\lambda\omicron\varsigma$, beau; $\epsilon\dot{\iota}\delta\omicron\varsigma$, apparence, $\varphi\omega\nu\eta$), I, 677.
Calorescence, II, 86.
Calorie, unité de chaleur, II, 257.
Calorifères, à eau chaude, II, 174; à air chaud, 255; à vapeur, 441.
Calorimètre, de glace, II, 260, 261; de Regnault, 278; compensateur, 337; à mercure, 264; électro-thermique, 266; à glace par changement de volume pendant la fusion, 268.
C. de Rumford, II, 406, 552; de Despretz, 513, 553; de Dulong, 514, 554; de Dauriac et Saluquicé, de Fabre et Silbermann, 557.
Calorique, II, 40 (*voy. CHALEUR*).
Camera lucida, IV, 122.
C. obscure, IV, 145.
Gaoutchouc, sa dilatation, II, 191.
Capacité d'un vase, évaluation, I, 207; comparaison à celle d'une division, 299; — variation par la compression, 461; par la chaleur, II, 186.
C. calorifique des corps, II, 256 (*voy. CHALEUR SPÉCIFIQUE*).
C. électrique, III, 154.
Capillarité, description et lois, I, 251; théorie, 260; relation avec la forme de la surface, 269, 274; équilibre d'un cylindre liquide sans pesantier, 273; — action de la chaleur, 281; mouvements produits par la capillarité, 278.
C. est une source de chaleur, II, 526; d'électricité, III, 320; phénomènes électro-capillaires, 499.
Capsules manométriques, I, 581, 624, 745.
Carillon électrique, III, 144; application à l'électricité atmosphérique, 241; C. à bouteille de Leyde, 189.
Carreau étincelant, III, 210; magique, 185, 211; fulminant, 219.
Cartes magnétiques, III, 66.
C. spectrales, IV, 251.

- C. synoptiques de météorologie*, II, 697; d'orages, III, 266.
- Casse-vitre**, I, 328.
- Cascade** (*charge des batteries par*), III, 190.
- Cascades**, dégagent de la chaleur, II, 522.
- Castor et Pollux**, III, 256.
- Catacaustique**, IV, 71 (v. CAUSTIQUE).
- Cathète d'incidence**, IV, 46.
- Cathétomètre** (κλίτρος, *vertical*; μέτρον, *mesure*), I, 22.
- Catoptrique** (κατά, *contre*), IV, 39 (voy. RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE, MIROIRS).
- Causes naturelles**, I, 11; générales, 12; premières, 13.
- Caustiques** (καυστικός, *brûlant*) par réflexion, IV, 71; des miroirs sphériques, IV, 71; construction de la génératrice, 73. — par réfraction, IV, 109; cas d'une surface plane, 110; cas des lentilles, 141.
- Cautérisation** par les fils incandescents, par les courants, III, 445.
- Centre des forces parallèles**, I, 72; de gravité, 92; d'oscillation du pendule, 113.
- C. de pression*, 174; de poussée, 182.
- C. optique d'une lentille*, IV, 135.
- Cerceau électro-dynamique**, III, 713.
- Cercle répéteur**, I, 38.
- C. chromatique*, IV, 213.
- C. parhélique des balos*, IV, 339, 345.
- C. d'Ulloa*, IV, 508.
- Cerf-volant électrique**, III, 241.
- Chaîne galvanique**, III, 442; magnétique, 42.
- Chaleur**, effets généraux, II, 7; nature, 8, 9; systèmes de l'émission et des oscillations, 10; — expl. des phénomènes de chaleur dans ce dernier système, principe de l'identité, 91; — interférences, IV, 454; diffraction, 481. — polarisation de la chaleur, IV, 570, 590, 577, 596; double réfraction, 529; impressions de chaleur, II, 83; effets mécaniques, 576, 589 (voy. THERMODYNAMIQUE).
- C. influence sur les phénomènes capillaires*, I, 281; sur les propriétés physiques des solides, 458, 487, 499; — sur le magnétisme, III, 50, 915; sur le pouvoir rotatoire, IV, 694, 712; etc.
- C. animale*, II, 511; mesure de la quantité de chaleur, 544; origine, 545.
- C. des végétaux*, II, 517.
- C. atmosphérique*, II, 613 (voy. TEMPÉRATURE DE L'AIR).
- C. latente*, de liquidité, II, 311; de dissolution et de dilution, 332; — de la glace, mesure, 335, 336; des métaux, 339, 344; relation avec la chaleur spécifique, 341; avec l'élasticité, 344. — des vapeurs ou d'élasticité, II, 351; mesure, 405; sous différentes pressions, 406; de divers liquides, 412; des gaz liquéfiés, 413. — absorbée par l'expansion des gaz, 528; relation avec le travail mécanique, 598.
- C. obscure*, II, 43; séparation au moyen du sulfure de carbone ioduré, 75.
- C. spécifique*, II, 556; méthode des mélanges, 258; de la fusion de la glace, 260, 261; du refroidissement, 261; du calorimètre à mercure, 264; à glace, par changement de volume pendant la fusion, 268. — résultats généraux, 269; liquides, 273; eau, 274; sels hydratés, 276; loi des atomes simples, 277; expér. de Regnault, 277, 280; cas des corps composés, 283. — des dissolutions, 288. — Considérations théoriques, 289. — des gaz, II, 291 (voy. GAZ).
- C. rayonnante*, II, 43; intensité suivant la distance, 114; suivant l'obliquité, 116, 117 (voy. RAYONNEMENT DE LA CHALEUR ET THERMOCHROSE).
- C. solaire*, II, 489; quantité fournie, 492; totale, 496; proportion absorbée par l'air, 495; envoyée à la terre, 495; température du soleil, 498, 502; aux divers points du disque, 505.
- C. terrestre*, exp. dans les mines, II, 506; puits artésiens, 507; feu central, 508; résultats du calcul, 509.
- C. (sources de)*, II, 488 (voy. SOURCES DE CHALEUR).
- C. est une source d'électricité*, III, 391. (v. THERMO-ÉLECTRICITÉ ET PYRO-ÉLEC.).

- Chalumeau**, II, 547; à vapeur combustible, 548; oxyhydrique, 549; *aérhydrique*, 550.
- Chambre**; *barométrique*, I, 309; — de Saussure, II, 175; machine solaire, 176.
- C. claire**, IV, 122; application au microscope, 416; — *noire*, simple, 16, 25; composée, 145; à miroir sphérique, 85.
- Chameaux floteurs**, I, 187.
- Champ d'une lentille**, IV, 144; des lunettes, 421, 430; du microscope, 407; du miroir plan, 47; de la vision, 355.
- C. de glace**, II, 657.
- Chamzin** (*Chamsin*, arabe, cinquante), II, 693.
- Changements d'état des corps**, II, 308 (voy. FUSION, SOLIDIFICATION, VAPEURS).
- Charbon**, conductibilité pour la chaleur; II, 446; pour l'électricité, III, 401. — fusion dans l'arc voltaïque, III, 471.
- Charbons pour électrodes**, III, 879.
- Charge du condensateur**, III, 180; par cascade, des batteries, III, 190; résiduelle, 186.
- C. dynamique d'un circuit**, III, 550.
- Chariot électrique**, III, 244; — à recul, I, 394.
- Chaudières à vapeur**, calcul de leur résistance, I, 479; description, II, 452; alimentation, 455; appareils de sûreté, 457; causes d'explosion, 372, 461, 463. — des bateaux à vapeur, *tubulaires*, II, 470; des locomotives, 474, 477.
- Chauffage par les cheminées**, II, 161, 253 (Voy. CALORIFÈRES).
- Chemin de fer**, atmosphérique, I, 371; aérien, 81.
- Cheminées (tirage)**, II, 353; du Nord, 161.
- Recherche-fuite par diffusion**, I, 411.
- Chercheur**, des télescopes, IV, 422.
- Chimie**, définition, I, 4; application du spectroscope, IV, 244; du pouvoir rotatoire, 717.
- Chirurgie**, applications de l'électricité, III, 441, 445.
- Choc des corps**, I, 499, 501; direct des corps mous, 502; des corps élastiques, 503; dans une série de billes, 506, 531. — oblique, 507.
- C. d'une veine liquide contre un plan**, I, 239; de deux veines opposées, 246.
- C. latéral ou en retour**, par l'électricité, III, 220; par la foudre, 251.
- Chromatique** (*χρῶμα*, couleur), IV, 180 (voy. COULEUR, DISPERSION).
- Chromatisme de l'œil**, IV, 356.
- Chromatope** (*χρῶμα*, couleur; *τρέπω*, tourner), IV, 376.
- Chronographe** (*χρόνος*, temps; *γράφω*, écrire) électromagnétique pour la vitesse des projectiles, III, 866.
- Chronomètre**, I, 34; — manière de compenser, II, 499; influence du fer des navires, III, 57; invariable par vibrations communiquées, I, 725.
- Chronoscopes**, III, 867.
- Chute des corps**, lois, I, 98 (v. PESANTEUR).
- Cinématique** (*κίνημα*, mouvement) I, 54.
- Circuit galvanique ou voltaïque**, III, 336.
- Cirrus**, (*cirrus*, boucle), II, 725, 734.
- Claque-bois**, I, 677.
- Climat** (*κλίμαξ*, degré), II, 611; classification des climats, causes qui les modifient, e. marin, continental, 633; climats locaux, 634.
- Climatologie**, II, 611.
- Clivage** (*Klæben*, fendre), des cristaux, I, 446; produit l'électricité, III, 316.
- Cloches**, vibrations, I, 693; danger de les sonner en temps d'orage, III, 258.
- Clou d'épreuve**, pour l'étude des aimants, III, 29.
- Coefficient** (*cum*, avec; *efficere*, faire), de conductibilité pour la chaleur, II, 148; de dilatation, 182; d'élasticité, I, 456; de dispersion, IV, 215, 216, etc.
- Coercitive (force)**, III, 16; circonstances qui la modifient, 42.
- Coexistence des petites oscillations**, I, 530; IV, 442.
- Cœurs agités de Wheatstone**, IV, 357.
- Cohésion**, I, 151; dans les gaz, 346.
- Colloïde** (*κολλῶν*, coller), corps, I, 421. — Influence sur l'ébullition, II, 368.

- Colonnes d'air, vibrations**, I, 617; solaires (halos), IV, 347.
- Coloration des métaux**, par dépôt de peroxyde de plomb, III, 545.
- Colorigrade** (*gradus*, degré), IV, 632.
- Combinaisons chimiques**, — variation de volume, I, 207; — sources de chaleur, II, 538; mesure de la chaleur dégagée, 552; cas des combinaisons par voie humide, 566.
- dégageant de l'électricité, III, 343; réaction des dissolutions, 347; des liquides sur les métaux, 351; des décompositions, 350.
- Combustion**, source de chaleur, II, 539; source d'électricité, III, 344.
- Comma** (*κόμμα*, *m. signif.*), I, 587.
- Commotion électrique**, III, 485, 218; *voltaïque*, influence du sens du courant, 436; — des machines magnéto-électriques, 786; des machines électro-voltaïques, 760.
- Communication du mouvement** entre deux corps, I, 499; — des mouvements vibratoires, 732; entre deux pendules, 725; d'un solide à un fluide, 727; membrane et colonne d'air, 728; corps qui étouffent les sons, 730.
- Commutateurs électro-dynamiques** (*commutare*, changer), III, 667.
- Comparateur**, I, 26.
- C.** optique des vibrations, 611.
- Comparaison des pyromètres** entre eux, II, 40; des thermomètres à gaz et à mercure, 240, 242.
- C.** des systèmes des ondulations et de l'émission, IV, 472; expér. qui décident entre les deux systèmes, 475.
- C.** des sons, I, 584; méthode optique, 607.
- Compas des variations**, III, 63 (*voy. BOUSSOLE*).
- Compensateurs**, pendules, II, 496; des chronomètres, 499.
- C.** magnétique, des boussoles, III, 55.
- C.** optique, IV, 462, 670.
- Complémentaires**, couleurs, IV, 204.
- Composition des vitesses**, I, 58; des forces, 67.
- Composition des vibrations sonores**, I, 608.
- des courants, III, 676.
- C.** des couleurs, IV, 188, 210; construction de Newton, 214; formule, 212.
- Compressibilité des corps**, I, 47; — des liquides, 465, 296; au moyen du son, 657; au moyen des indices de réfraction, IV, 465.
- C.** des gaz, loi, I, 333; cas des hautes pressions, 335; gaz quelconques, 337; sous très-fortes pressions, 342; à hautes températures, 344; conséquences, 346, 348; — machines à comprimer les gaz, 372.
- Compression**, diminue la capacité des vases, I, 460.
- dégage de la chaleur dans les solides, II, 525; dans les liquides, 525, IV, 464; dans les gaz, II, 527; sa mesure, I, 629; II, 530.
- C.** et détente des vapeurs, 604.
- produit la double réfraction, IV, 534; modifie celle des cristaux, 549; produit des couleurs dans la lumière polarisée, 635; — modifie la conductibilité des corps, II, 466; le pouvoir rotatoire magnétique des corps, 734.
- Compteurs électro-chronométriques**, III, 863.
- Concamération des tuyaux sonores**, I, 617
- Condensateur électrique**, III, 177; force condensante, 180; — décharge, par contacts successifs, 183; instantanée, 184; l'électricité est sur la lame isolante, 185, 188; effets de la décharge, 200 (*voy. DÉCHARGE*).
- C.** d'Épinus, III, 179; de Volta, 193; application aux électromètres, 194.
- C.** voltaïque, III, 745.
- Condenseur de Watt**, II, 431.
- C.** de lumière, IV, 86, 88.
- Conducteurs bons ou mauvais de la chaleur**, II, 145, 148; — de l'électricité, III, 100.
- C.** secondaire des mach. élect., III, 125.
- Conductibilité des corps pour la chaleur**, II, 142; loi dans un mur, 146;

- intérieure, extérieure, 148; dans une barre, etc., 151; dans un fil, 155.
- Conductibilité** des corps non homogènes, 162; comprimés, 166; des cristaux, 164, 167; du fer, modifiée pendant l'action du magnétisme, III, 661.
- des liquides, II, 168; des gaz, 172; de l'hydrogène, 173 (voy. GAZ).
- C. électrique**, III, 225; comparaison des cond. des métaux, 228.
- des corps isolants, 165; superficielle des cristaux, 168.
- des fils métalliques pour l'électricité dynamique, III, 576; mesure, 593, 597. (voy. LOIS D'OHM ET POUILLER).
- des corps non métalliques, 601; propre des liquides, III, 517, 712. — mesure, 604; dissolutions salines, 606; influence de la chaleur, 608.
- des flammes, des gaz chauds, 614.
- Conduction**, II, 142 (voy. CONDUCTIBILITÉ).
- Cône double** sur un plan incliné, I, 96.
- Congélation**, II, 312 (v. SOLIDIFICATION).
- de l'eau dans le vide, II, 351; par les mélanges frigorifiques, 332; des dissolutions, 331.
- Congélateur**, II, 334; par évaporation, 354.
- Constantes** des piles, III, 593
- Contact**, comme source d'électricité; théorie de Volta, III, 324; objections, 387.
- Contraction**, de la veine liquide, I, 214; partielle, 217; de la veine gazeuse, 399.
- Contraste** simultané des couleurs, IV, 400.
- Convection** (convection, transport), dans les liquides, II, 170.
- Cor d'harmonie**, I, 647.
- Cordes vibrantes**, lois, I, 659; influence de la rigidité, 662; nœuds, 664; résonance multiple, 666; — instruments à cordes, 668; — vibrations longitudinales, 700.
- C.** effets de l'humidité, II, 700.
- C. de Véra**, I, 260.
- Cornet acoustique**, I, 551, 640; analyste, 580. — d'harmonie des tuyaux à anche, I, 645.
- Corps**, I, 1, 43; trois états, 44; constitu-
- tion, forces moléculaires, 151; hypothèse d'Ampère, 161; théorie mécanique, 162.
- C.** plongés, équilibre, I, 180; — flottants, 184; par capillarité, 276 — éclairés, IV, 5.
- C.** solides, structure, I, 444 (voy. SOLIDES).
- Corrections successives** (méthode), I, 38.
- Corrélation** des phén. météorologiques, II, 743; des phén. calorifiques et lumineux, principe de l'identité, 81.
- Côtes**, influence sur la température de la mer, II, 656.
- Couche** de température invariable du sol, II, 651.
- Couleurs** du spectre, IV, 182; théorie de Newton, 184; recomposition de la lumière blanche, 189; théorie de Brewster, 200.
- C.** accidentelles, IV, 397, 398.
- C.** simples, composées, 203; complémentaires, 204; mélange, 210.
- C.** des corps, 205, 469; explication, 469, 516; analyse au moyen du prisme, 209; flammes, 209; construction de Newton, 211; formule de Biot, 212.
- C.** (nomenclature des) tons et nuances, IV, 213; reprod. par la photographie, 294.
- C.** bleue de l'atmosphère, IV, 319.
- C.** dans les lames minces, IV, 509; dans les lames épaisses, 523 (voy. ANNEAUX COLONÉS).
- Couleurs** de la lumière polarisée, IV, 619; par double réfraction accidentelle, 633 (voy. POLARISATION CHROMATIQUE).
- C.** des métaux polis, IV, 678.
- C.** du quartz perpendiculaire à l'axe, IV, 692 (voy. POLARISATION ROTATOIRE).
- Couple**, système de forces, I, 71.
- Couple** de la pile voltaïque, III, 326; chimique, 357; évaluation de la force électromotrice, méthodes diverses, III, 613; unité de force électromotrice, 621.
- Courants** de la mer, II, 654.
- Courants électriques**, effets généraux, III, 336; identité dans tout le circuit, 550; dans la section du rhéophore, 551; état de

- l'électricité, 552; état variable en commençant et en finissant, 554, 555; mesure de l'intensité, 566 (v. RHÉOMÈTRE).
- C. résistance des fils aux courants, lois d'Ohm et Pouillet, III, 579, 581. formule des piles, 581; application aux rhéomètres, 583; vérifications, 586; loi des tensions, 588.
- C. dérivés, formules, III, 584.
- C. actions mutuelles, III, 667 (voy. ÉLECTRO-DYNAMIQUE).
- C. d'Ampère, III, 696.
- C. hydro-électriques, galvaniques ou voltaïques, sens, effets généraux, III, 336; dans la pile, 360.
- effets physiologiques; animaux morts, III, 430; lois de la contraction, 432; alternatives voltaïques, sens du c., 433; animaux vivants, faibles courants, 435; commotion voltaïque, 436; courant continu, 438.
- action sur les végétaux, sur la germination, 443.
- actions calorifiques sur les fils métalliques, III, 444; influence de la résistance, 447; chaleur ou froid aux soudures, loi, 448, 449; phénom. électrothermiques, 451 — lois de l'échauffement des fils, 452; influence du milieu, 455; échauffement des liquides, 457; origine de la chaleur chimique, III, 459; chaleur totale du circuit, relation avec la force électromotrice, 630 (v. ARC VOLTAÏQUE).
- actions mécaniques, sur les métaux, III, 474; transport de liquides, lois, 476, 477; sons dans les fils métalliques, 663.
- actions chimiques, III, 337, 479 (v. ÉLECTROCHIMIE).
- actions magnétiques, III, 339, 635 (voy. ÉLECTROMAGNÉTISME).
- C. induits, par les courants, III, 709; par les aimants, 710; par la terre, 712; comparaison par leurs effets, 721; égalité du direct et de l'inverse, 722; influence de l'intensité magnétique, de la longueur du courant inducteur, 725; de la résistance du circuit induit, 726; des lames interposées, 728; intensité, 727.
- C. explication des cour. induits, III, 717.
- de différents ordres, III, 730; par la décharge, 732; sens déterminé par la polarisation des électrodes, 734; — influence des métaux rapprochés, sur la décharge induite, 736; sur les effets physiologiques, 737; sur les autres effets, 739 (voy. EXTRA-COURANT).
- C. musculaire, III, 422, 423; lois, 424; origine, 425; produit par la contraction du bras, 425; propre de la grenouille, 422.
- des végétaux, III, 428.
- C. terrestre, III, 690, 693; attribué au magnétisme de rotation, 758.
- C. thermo-électriques, III, 396 (voy. THERMO-ÉLECTRICITÉ).
- Courbe pour représenter les lois des phénomènes, I, 9.
- réfractoire, IV, 412.
- C. isochromatiques de la lumière polarisée, dans les cristaux, IV, 648, 651.
- C. magnétique, III, 31.
- Couronne, de l'aurore boréale, III, 301; explosive des gaz, I, 395.
- C. autour du soleil ou de la lune, IV, 504; explication, 505; — antisolaire, 508.
- Courroies de transmission, produisent de l'électricité, III, 312.
- Crépuscule, IV, 323; — courbe crépusculaire, 324; rayons crépusculaires, 325; pronostics qu'il fournit, 327.
- Crève-vessie, I, 327.
- Cri, de certains métaux, I, 452.
- Cristal de roche, propriété rotatoire, IV, 689; pour la chaleur, 701 (v. ROTATION DU PLAN DE POLARISATION).
- Cristallisation, I, 47, 462, 444; dans les dissolutions, II, 328.
- Cristallin (κρυσταλλος, glace) de l'œil, IV, 351; rôle dans l'accommodation, 361.
- Cristallographie, I, 445; loi de symétrie, 446; — théorie de Delafosse, 448; application à la polarisation rotatoire, IV, 724.
- Cristaux (κρυσταλλος, glace), division en six systèmes, I, 450: hémédrie, 446, IV, 723, 724; élasticité, I, 718.
- Conductibilité pour la chaleur, II, 464,

- 167; superficielle pour l'électricité, III, 168; *pyro-électricité*, 391; dilatation, II, 193.
- C. étude par la lumière polarisée, IV, 659; à un axe, 529; section principale, axe, 532, — positifs, négatifs, 534; manière de les distinguer, 548, 649.
- C. à deux axes, IV, 546; détermination des axes et mesure de leur angle, 649 (*voy. AXE*).
- Croûte du globe, formation, II, 508.
- Culbuteur *chinois*, I, 96.
- Cryophore (*κρύος*, *glace*), II, 352.
- Cuvette de jauge, I, 220.
- Cyanomètre, (*κύανος*, *bleu*; *μέτρον*), IV, 319, 632.
- Cycloïde (*κύκλος*, *cercle*), I, 108.
- Cyclones, II, 694; III, 267.
- Cylindre *électrodynamique*, III, 698 (*voy. SOLÉNOÏDE*).
- C. remontant un plan incliné, I, 96.
- Cymbales, I, 693.

D

- Daguerréotype, (Daguerre; *τύπος*, *empreinte*), IV, 279; panoramique, 280 (*voy. PHOTOGRAPHIE*).
- Daltonisme, IV, 396.
- Danse *électrique*, III, 415.
- Décharge *électrique*, du condensateur par contacts successifs, III, 183; disruptive, 184, 200.
- résistance de l'air, des gaz à la décharge, III, 201, 203.
- effets *physiologiques*, III, 218; *physiques*, inflammations, 220; fusion des fils métalliques, 222; résistance, 225; loi de l'échauffement, 225.
- effets *mécaniques*, III, 229; *chimiques*, 235; *magnétiques*, 238; — produit la phosphorescence, IV, 9.
- Déchargeurs des télégraphes *électriques*, III, 846.
- Déclinaison de l'aiguille aim., III, 17; mesure, 58; valeur aux différents points du globe, 65; lignes sans déclinaison, 66;
- méridiens magnétiques vrais et parallèles magnétiques*, 68.
- D. *variations*, 79; séculaires, 85; annuelles, 86; diurnes, en différents pays, 87; *perturbations*, 90; — influence des aurores boréales, 91; des mouvements atmosphériques, 92.
- Déclinomètre, III, 80.
- Décomposition des forces, I, 68, 70, 71; des vitesses, 59.
- D. *de la chaleur* par réfraction, II, 73.
- *de l'électricité*, par influence, III, 108.
- D. *de la lumière* par réfraction, IV, 184; par l'atmosphère, 319; par absorption, 195, 469; par réflexion diffuse, 203, 205; par interférences, 445; par diffraction, 481; par les lames minces, 511; dans la polarisation chromatique, 622; par réflexion de la lumière polarisée, 565; par rotation du plan de polarisation, 689.
- D. des composés par la pile, III, 479 (*voy. ÉLECTROCHIMIE*).
- Dédaléum, IV, 377.
- Déflagrateur, III, 330.
- Degrés du méridien, augmentent vers le pôle, I, 127; de température, II, 18.
- Déliquescence, II, 700.
- Demi-lentille d'interférence, IV, 452.
- Densité des corps, I, 132; — de la terre, 143, 147. (*voy. POIDS SPÉCIFIQUE*).
- *maximum*, de l'eau, II, 216; des dissolutions salines, 222.
- D. des gaz, II, 244; des vapeurs, 416.
- D. *électrique* des batteries, III, 226.
- Densimètre, à mercure, I, 195; flottants arcométriques, 199, 204.
- Dépense (hydraulique), I, 216; circonstances qui la modifient, 214; calcul, 215.
- Déperdition de l'électricité par l'air, III, 160; par l'air raréfié, 162.
- par les supports, III, 165; pénétration de l'élect. dans les corps isolants, 165; quantité enlevée par une lame isolante, 166.
- Détente de la vapeur dans les machines, II, 442; variable, 443; travail produit, 446.

- D. *des gaz*, effets calorifiques, II, 602; des vapeurs, 604.
- Déviati**on du fil à plomb par les montagnes, I, 143, 144.
- D. de l'aiguille aimantée par un courant, III, 636 (voy. ÉLECTROMAGNÉTISME).
- D. des rayons lumineux dans un prisme, IV, 118; *minimum*, 120.
- Diacoustique**, IV, 109 (v. CAUSTIQUE).
- Diab**les cartésiens, I, 187.
- Dialyse** (διά, à travers; λύω, délier), 295.
- Dialyseur**, I, 296.
- Diagomètre**, (δι-ίγω, traverser; μέτρον), III, 336.
- Diamagnétisme**, III, 888; circonstances qui le modifient, 890; des liquides, 891, des flammes, des gaz, 893, 897; influence du milieu, 894; *polarité*, 899; de l'explication du diamagnétisme, 902.
- des cristaux, III, 916 (voy. MAGNÉTISME).
- Diamagnétomètre**, III, 901.
- Diamètre angulaire** ou *apparent*, IV, 12.
- Diapason**, I, 593; à *fourchette*, 679.
- Diaphragme** (διά, à travers; φράγμα, clôture) des piles électrochimiques, III, 374; résistance aux courants, 495; influence sur la force électromotrice, 617.
- effets sur les apparences au foyer des lunettes, IV, 493.
- Diasporamètres** (διασπορά, dispersion; μέτρον), IV, 223.
- Diathermansie** (διά, à travers; θερμη, chaleur), II, 52; des gaz, 58; des vapeurs, 59; expériences de Melloni, 53.
- Dichroïsme** (δεις, deux fois; γέζα, couleur) des corps colorés, IV, 197; des cristaux, 655.
- Diélectriques**, corps, III, 170, 174.
- Dièzes** et **Bémols**, I, 590.
- Diffraction** (*diffringere*, séparer en rom-pant), IV, 480; explication, 482; théorie de Fresnel, 483; franges par le bord d'un écran, 484; par une fente, 487; par deux fentes voisines, par un écran étroit, 489.
- D. par des ouvertures ou écrans très-petits dans tous les sens, 491; apparences au foyer des lunettes, 493; effets des dia-phragmes, 493; passage aux phénomènes des réseaux, 502; — météores qui dépendent de la diffraction, 503.
- D. *de la chaleur*, des rayons chimiques, 481.
- D. *du son*, I, 661.
- Diffusiomètre**, I, 165.
- Diffusion** des liquides, I, 290; des gaz qui se mélangent, I, 403; à travers les cloisons poreuses, 405.
- D. *de la chaleur* par réflexion, II, 51, 77; par réfraction, 80.
- D. *de la lumière* par réflexion, IV, 41; mesure du pouvoir, 45; par réfraction, 99; épipolique, 305.
- Digesteur** de Papin, II, 364.
- Dilatabilité** des corps, I, 48; II, 12, 177.
- Dilatation**, II, 12; force développée, 178.
- *linéaire* des solides, mesure, II, 180, 189; résultats, 182; formules, 184; applications, 196.
- *cubique* des solides, relation avec la dil. linéaire, 185; dil. des enveloppes, 180; mesure directe de la dil. cubique, 186; au-dessus de 400°, 188.
- de la glace, II, 194; des cristaux, 193.
- du verre, II, 190; produit des couleurs dans la lumière polarisée, IV, 636.
- D. *des liquides*, apparente ou absolue, II, 187; absolue du mercure, 201, 204; des autres liquides, 208; au-dessus du point d'ébullition, 212, 214; — *maximum* de densité de l'eau, 216; des dissolutions salines, 222.
- D. *des gaz*, II, 223 (voy. GAZ).
- D. *élastique*, I, 468.
- Dilatomètre** pour les liquides, II, 211.
- Dimorphisme**, (δεις, deux fois; μορφή, forme), I, 451.
- Dynamètre**, pour le grossissement des lunettes, IV, 425.
- Dioptrique** (διά, à travers; σκοποι, voir), IV, 90 (voy. RÉFRACTION).
- Diorama** (*dies*, jour; δράμα, spectacle), cause de l'illusion, IV, 389.
- Direction** de la force magnétique du globe, III, 21; — *moyenne des vents*, II, 673.
- Dispersion**, spectre solaire, 181; théorie de Newton, 184; de Brewster, 199,

- D. coefficient, angle, rapport de disp., IV, 215; mesure, 216; explication dans le système des ondulations, 468 (voy. DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE).
- D. des gaz par réfractomètre, IV, 465.
- D. atmosphérique, IV, 319.
- Disque de Newton, IV, 190.
- Dissociation, II, 551.
- Dissolution des solides, II, 327; sursaturation, 329; — chaleur absorbée dans la dissolution et la dilution, 332.
- D. des gaz dans les liquides, lois, I, 412; cas des fortes pressions, 415; eaux gazeuses, 417; échange de deux gaz à travers une cloison humide, 418.
- Dissolving-views, IV, 448.
- Dissonances, expliquées par les battements, I, 605.
- Distance, jugement dans la vision, IV, 384; angulaire, 42.
- Distribution de la vapeur dans les machines, II, 434.
- Divisibilité de la matière, I, 45.
- Division d'une droite en parties égales, I, 29, 31; des arcs de cercle, 33; des tubes en parties d'égale capacité, II, 49.
- Dorure galvanique, III, 539, 541; au trempé, 540; par la pile, appareils, 541; dépôt de divers métaux, d'oxydes, 544.
- Doublage des navires, préservé par actions électriques, III, 549.
- Double-réfraction, IV, 528; dans les cristaux à un axe, 529; cause générale, compression, 534; accidentelle, 633; — dans certains cristaux opaques, 685.
- lois, construction d'Huyghens, 535; vérification expér., 537; interprétation théorique, 540; émergence du rayon extraordinaire, 441.
- dans les cristaux à deux axes; il n'y a pas de rayon ordinaire, IV, 546; sections principales, 546; forme de la surface de l'onde, et vitesse des rayons, 547.
- Théorie de Fresnel, IV, 605; axes optiques, 610, 614, 618; surface de l'onde, 614; construction générale des rayons réfractés, 614; discussion de l'équation de la surface de l'onde, 614.
- D.-R., produit la polarisation, IV, 592, 593.
- D.-R. de la lumière polarisée, 593; loi de Malus ou du \cos^2 , IV, 594; — expérience des deux rhomboédres, 594.
- D.-R. circulaire dans le quartz, IV, 704; dans l'essence de térébenthine, 799.
- D.-R. de la chaleur, IV, 529.
- Doublets (microscopes), IV, 404.
- Drosomètre ($\delta\rho\sigma\tau\omicron\beta$ rosée; $\mu\acute{\epsilon}\tau\rho\omicron\nu$), II, 723.
- Ductilité, I, 486; causes qui la modifient, 491.
- Duplicateur d'électricité, III, 430.
- Dureté, I, 488; causes qui la modif., 491.
- Dynamide, I, 461, II, 594.
- Dynamique ($\delta\acute{\iota}\nu\alpha\mu\iota\kappa\omicron\varsigma$, force), I, 63.
- Dynamomètre, I, 60.
- D. enregistreurs, I, 61.
- D. électrodynamique de Weber, III, 687.
- D. chromatique, IV, 641.

E

- Eau, compressibilité, I, 47, 296; IV, 465; conductibilité pour la chaleur, II, 169; dilatation, max. de densité, 216; densité à diverses températures, 221; chaleur spécifique pour les hautes tempér., 274.
- chaleur latente de congélation, 335; de vaporisation, 405.
- indice de réfraction de l'eau comprimée, IV, 464.
- décomposition par la décharge électrique, III, 236; par la pile, 337, 480; — rôle dans l'électrolyse des sels, 515.
- oxygène, électrolyse, III, 513.
- eaux gazeuses (appareil des), I, 417.
- de cristallisation des sels, II, 328.
- atmosphérique, II, 699 (voy. HYDROMÉTÉORES).
- Ébranlement direct des molécules, source d'électricité, division mécanique, vibrations, flexions, III, 319.
- Ébullition, II, 364; loi de Dalton, 364; rôle des gaz dissous, 368; ébull. dans le vide, 360; — influence des vases, 373.
- phén. dans les vases chauds, 374; théo-

- rie, 378; incombustibilité des tissus vivants, 380; effets des sels dissous, 380.
- E. des mélanges de liquides, II, 382.
- Échelles thermométriques**, passage d'une échelle à une autre, II, 48.
- Éclair**, III, 242; de seconde classe, sans tonnerre, 242; spectre, IV, 255.
- Éclairage** (équivalent d'), IV, 35.
- E. électrique, III, 874; régulateurs de la lumière électrique, 875; bougies Jablochhoff, 881; lampes à incandescence, 884.
- Écho** (ἤχος. son), I, 552.
- Écoulement** des liquides, I, 208; principe de Toricelli, 210; constitution de la veine, 230; par les ajutages, 220; par les tuyaux, 222; — intermittent, 391; constant, 392, 393.
- par les tubes capillaires, 284; par les plaques poreuses, 286.
- E. des gaz, I, 394; constant, 401.
- Écrouissage**, (*crudus*, dur), I, 497.
- Écueils** vus par *suspension*, IV, 108; manière de les distinguer en mer, 587.
- Écume**, pourquoi paraît blanche, IV, 86.
- Effet utile** des machines, I, 76.
- Effluves** électriques, actions chimiques, III, 237.
- Elasticité**, I, 48, 453, de tension et compression, 454; — de flexion, I, 465; — de torsion, 471; — limite, 474.
- Étude par les vibrations, I, 743; — des corps non homogènes, 746; des cristaux, 718.
- Étude par la lumière polarisée, IV, 639.
- E. des liquides, I, 296; — des gaz, 333.
- Électricité** (ἤλεκτρον, *ambre*), III, 5; statique, 97, développée par frottement, 97, 99, 307; — corps conducteurs, 400; — des deux espèces d'élect., 402; actions mutuelles, 402.
- Théorie de Symmer, III, 105; de Franklin, 106; de l'éther électrique, 106.
- par influence, III, 108; dans les isolants, 411.
- attractions et répulsions expliquées, III, 412; lois, 437.
- se porte à la surface des corps, III, 443, 445; rôle de l'air, 446; tension, 456.
- E. distribution à la surface des corps, plan d'épreuve, 447; résultats, 449.
- théorie mathématique, 450; potentiel électrique, 451; pouvoir des pointes, 456.
- É. polaire, III, 472.
- É. atmosphérique, manière de l'observer, III, 286; électromètres de Saussure, de Peltier, 287; de Thomson, 288; emploi du rhéomètre, 290; enregistreurs, 291.
- distribution, 292; variations diurnes, mensuelles, 294; par les temps couverts, etc., 296; rôle dans la végétation, 297.
- origine, 298.
- effets sur les télégraphes électriq., 825.
- des nuages orageux, III, 241; origine, 268.
- É. dissimulée ou latente, III, 478 (voy. CONDENSATEUR).
- E. dynamique, III, 342; effets, 336, 430; propagation, 550 (voy. VITESSE, COURANTS, ÉLECTROCHIMIE, ÉLECTRODYNAMIQUE).
- association avec l'élect. statique dans les longs fils, III, 558; dans les fils enfouis, submergés, 559; effet dans les fils télégraphiques, 849.
- É. physiologique, poissons électriques, III, 417; courant de la grenouille, 422; courant musculaire, 423.
- Animale, analogie avec le fluide nerveux, III, 440.
- des végétaux, III, 428.
- É. polaire, des diélectriques, III, 144, 170.
- Électro-aimant**, III, 646; force, 650; saturation, 651; armatures, 654.
- différentes formes, 654; — d'Hugue, 837.
- Électrocapillaires** (phén.), III, 499; moteur, 501; mouvements sur le mercure, 502.
- Électrocaustique**, III, 446.
- Électrochimie**, III, 479; décomposition des oxydes, 480; des acides, 482; des sels oxygénés, 483; — des mélanges, des corps organisés, 484.
- Décomp. par l'élect. de tension, 286, 485.

- Électrochimie**, circonstances qui influent, III, 486; électrodes solubles, 488.
- Transport des éléments aux électrodes, III, 488 (voy. TRANSPORT).
- Lois des décompositions électroch.; loi de Faraday, III, 503; travail chimique dans la pile, 509; cas où il y a plusieurs équivalents, 512; inégalité apparente dans la puissance des pôles, 514; rôle de l'eau, dans les sels, 515 — actions lentes, 546; application de l'électrochimie, 531 (voy. DORURE, GALVANOPLASTIE, etc.).
- Électrode** (ὁδός, chemin), III, 326, 479;
- Électrodiapason**, III, 649.
soluble, 488, 532.
- Électrolyse** (λύω, délier), III, 337, 479, lois, 503, 512.
- Électrolyte**, III, 337, 479.
- Électrodynamique** (δύναμις, force), III, 342, 550.
- Théorie d'Ampère, III, 667; appareils, 669; actions des courants parallèles, 674; croisés, 672; contraires, 675; sinueux, 676; conséquences, 676 (voy. ROTATION).
- Lois mathématiques, III, 682; actions des éléments de courants, 683; résultats du calcul, 685 (voy. AIMANTS, TERRE).
- Électrographie**, III, 285.
- Électromagnétisme**, expérience d'OErsted, III, 635; lois, 636; action d'un élément de courant, 637; attraction et répulsion d'un aimant par un courant, 639.
- Théorie du magnétisme, III, 696, 701; applications, 804 à 886 (voy. MAGNÉTISME, AIMANTATION, ÉLECTRO-AIMANT).
- Électromètres**, III, 117; de Henley ou à cadran, 122; de décharge, 186; des sinus, 143; de Lanne, 192; de Cuthberston, 191; — à condensateur de Volta, 194; de Peltier, 194; à 3 plateaux, 195; double, 196; de Thomson, 197; de Branly, 198; capillaire, 500.
- É.** pour l'électricité atmosphérique, de Sausure; de Peltier, 287.
- Électromoteurs**, corps, 324.
- Électrophore** (εἰπω, porter), III, 129.
- Électroscopes**, pendule, aiguille, III, 98; à paille, etc., 116. — de Coulomb, 143; — de Bohnemberger, III, 335 (voy. ÉLECTROMÈTRE).
- Électrotint**, galvanographie, III, 537.
- Électrothérapie**, III, 441, 445.
- Électrotriense**, III, 873.
- Électrotype** (τύπος, empreinte), III, 532.
- Électrotypie**, III, 536.
- Éléments magnétiques**, III, 13, 661; de courant sur un élément magnétique, 637; sur un autre élément de courant.
- É.** de la pile, 326 (voy. COUPLES).
- Embouchure de flûte**, I, 614, 646; à bocal, 647.
- Émissif**, pouvoir, II, 87 (voy. POUVOIR).
- Émission** (système) de la chaleur, II, 10; de la lumière, IV, 4, 473; explicat. de la réflexion et de la réfraction, 472.
- Endosmomètre**, I, 289.
- Endosmose** (ένδον, dedans; ὁσμός, mouvement), et exosmose, I, 288. — électrique, III, 477.
- Enregistreurs des indications barométriques**, II, 664; thermométriques, 618, 620; magnétiques, III, 84; électriques, 291; du passage des étoiles, 870.
- E.** photographiques, II, 620.
- Entonnoir magique**, I, 331.
- Éolipyle** (έολη, πύλη, porte), II, 363.
- Épaisseur**, mesure, par la vis micrométrique, I, 27, 28; par le déplacement des franges d'interférence, IV, 460; par les anneaux colorés, 514; — des corpuscules, des filaments, par les couronnes, IV, 505.
- Éprouvette de la machine pneumatique**, I, 360; de la m. de compression, 374.
- Équateur magnétique**, III, 19; sa forme, 71, 72; — thermal, II, 629.
- Équilibre**, I, 62; des corps suspendus par un point, 92; appuyés sur un plan, 94; — stable ou instable, 93; des corps flottants, 184.
- É.** mobile de température, II, 113, 118, 120.
- Équivalent calorifique**, II, 470; d'un corps en eau, 258; d'électricité, III, 508; optique, IV, 457; d'éclairage, 35.
- É.** mécanique de la chaleur, II, 581; (voy. THERMODYNAMIQUE).

- Eriomètre** (ἔριον, *duvet*; μέτρον), IV, 505.
- Espace**, I, 2; — *planétaire*, température, II, 643; est rempli par l'éther, II, 5.
- États de la matière**, I, 44, 46; forces moléculaires dans les trois états, 151, 158, 160.
- *sphéroïdal des liquides*, II, 379; — *hygrométrique*, 701.
- Étendue**, propriété de la matière, I, 43.
- Étésiens** (ἔτισιος, *annuel*), vents, II, 686.
- Éther**, I, 15, 161; II, 5; IV, 441; action des milieux en mouvement, 466 — Éther électrique, III, 406
- Éthroscope**, II (ἀνερίξ, *air libre*), 649.
- Étincelle électrique**, III, 117; bruit, 119; à travers les liquides, 119; tirée par une pointe, 157; forme, 205; couleur, 207; durée, 208; jeux de l'étincelle, 210.
- É. ambulante, III, 476.
- É. *d'induction*, III, 770; effets, 769; constitution, 770; composée, 772.
- Étoiles** (*aberration*), IV, 19; comparaison de leur éclat, 36, 601 — vues en plein jour, 374; du fond d'un puits, 371; avec les lunettes, 426 — scintillation, 321, 454; leur spectre, 232; différents types, 263; déplacement calculé au moyen du spectroscopie, 266.
- Eudiomètre** de Volta (εὐδοίος, *pur*; μέτρον) III, 221.
- Évaporation**, II, 349; dans le vide, 355; dans les gaz, 357; froid qu'elle produit, 354; applications, 352.
- Évaporomètre**, II, 748.
- Excitateur**, III, 185, 241; universel, 222.
- Exfoliation**, source d'électricité, III, 318.
- Expansion** de la glace, II, 321.
- Expérience**, en quoi elle consiste, I, 18; calcul numérique des résultats, 39; représentations graphiques, 40.
- d'Ermann, III, 293; de Fresnel, d'Young, IV, 447; de Galvani, III, 321; de Marly-La-Ville, III, 240; d'OErsted, III, 635; du Puy-de-Dôme, I, 312; de Tartini, 603; de Trevelyan, 519; de Monge, IV, 530; etc.
- Explosion** des chaudières à vapeur, causes, II, 372, 461.
- Extra-courant**, III, 740; explication, 743; divers effets, effets physiologiques, 744.

F

- Faisceaux magnétiques**, III, 43; — distribution du magnétisme, 44.
- Fata-morgana**, IV, 107.
- Fantascope** (φάντασμα *illusion*; σκοπέω, *regarder*), IV, 449.
- Fantôme magnétique**, III, 9, 13.
- Faradisation**, III, 759.
- Faux-soleils**, IV, 339, 347.
- Fer**, est magnétique, III, 6; magnétisme spécifique, 905; influence sur les boussoles, III, 54; influence sur la marche des chronomètres, 57; — changement de forme et de dimension dans les hélices, III, 656; déplacements moléculaires, 660; son qui en résulte, 663; — *passivité*, 544; galvanisé, 544.
- Feu central**, II, 508.
- F. *Saint-Elme*, III, 256.
- Feux de phares**, IV, 156, 157 (*voy. PHARES*).
- Fièvre**, influence sur la température du corps, II, 513.
- Figure** de la terre, effet sur la pesanteur, I, 126.
- Figures acoustiques**, I, 681; — *laminaires*, 156; — de Leichtenberg, III, 167; *roriques*, 231.
- Fil-à-plomb**, I, 91; déviation par les montagnes, I, 143.
- Fils télégraphiques**, III, 843; effets de l'électricité atmosphérique, 845; sons qu'ils rendent, 666.
- F. *télégraphiques souterrains, sous-marins*, III, 847.
- Filière** (*passage à la*), I, 487.
- Fièle** aux quatre éléments, I, 188; *philosophique*, 493.
- Flacon**, de Klapproth, I, 194; de Mariotte, 393.
- Flamme**, II, 541; effet des toiles métalliques, 542; constitution, 545; sont *diamagnétiques*, III, 892; — *pouvoir éclair-*

- rant, IV, 35; analyse de la couleur, 209; transparence, 33; — *unipolarité*, III, 494.
- *monochromatique*, IV, 209
- Flammes manométriques**, I, 581, 624, 745.
- F. sensible**, I, 638.
- Fleurs-baromètre**, II, 702.
- Flexibilité des corps**, I, 488.
- Flexion** (*élasticité de*), I, 465; — produit la double réfraction, IV, 636.
- Flottants**, équilibre des corps, I, 484; condition de stabilité, *métacentre*, 485.
- Flotteur de de Prony**, I, 213; à niveau, des chaudières à vapeur, II, 460.
- Fluide**, *état*, I, 44.
- Fluides impondérables**, II, 5; *magnétiques*, III, 44, 46; *électriques*, 105.
- Fluorescence**, IV, 303.
- Flûte**, I, 646.
- Fondations**, sous l'eau par l'air comprimé, I, 379.
- Fontaine**, de compression, I, 375; de Héron, 375.
- *intermittente* par siphon, 391; naturelle, 391; de Sturmius, 392; lumineuse, IV, 58.
- Force**, en général, I, 59; mesure par les dynamomètres, 60; par les effets, 65. Composition et décomposition, 47 — Travail des forces, 73 — *Vives* (principe), 77 — de l'essence des F., 78.
- F. centrales**, *centrifuge*, *centripète*, I, 79; entre les corps célestes, 89.
- F. moléculaires**, I, 451; relation dans les trois états, 458; leur nature, 460; théorie dynamique, 462.
- F. coercitive** des aimants, III, 46, 42.
- F. électromotrice de contact** (Volta), 324; chimique, 358.
- *électromotrice* des couples, méthodes de mesure, III, 613; absolue, 620; résultats, 617; unité, 621; élémentaire, 623; des métaux polarisés, 623; variations, 625; — au contact de deux liquides, 628; liquides et métaux, 629; relation avec la chaleur chimique, 630; — métaux amalgamés, 634.
- F. expansive** de la glace, etc., II, 321.
- Force magnétique**, lois, III, 24; des aimants, 28, 41.
- *magnétique* de la terre, 74.
- F. électrique**, lois, III, 437.
- F. de poussée** des corps plongés, I, 482.
- Foudre**, III, 245; bifurquée, *id.*; objets les plus exposés, trajets dans les édifices, 246; effets, 247; victimes de la foudre, précautions à prendre, 252; — moyens de s'en préserver, 258 (*voy. PARATONNERRE*).
- *globulaire*, III, 253, 285, 476; — progressive, ascendante, 257.
- Formules empiriques**, II, 209.
- Fourneau oxyhydrique**, II, 550.
- Foyer par réflexion**, IV, 71; des miroirs sphériques à petite ouverture, cas de a chaleur, II, 49; cas de la lumière, IV, 76; déplacements relatifs des foyers conjugués, 79.
- F. par réfraction**, IV, 409; cas d'une surface sphérique, 424; surfaces donnant un F. exact, 427.
- F. des lentilles**: foyer principal, IV, 431, 440; déplacements relatifs des F. conjugués, 433; — foyers sur les axes secondaires, 436; construction, 437.
- Fragilité**, I, 490.
- Franges d'interférence**, IV, 447; trajectoire, 449; causes qui en limitent le nombre, 451; déplacement, 458.
- F. de diffraction**, IV, 481.
- entre deux plaques épaisses, IV, 527.
- F. hyperboliques**, dans les cristaux avec la lumière polarisée, IV, 650, 653.
- Frein dynamométrique**, I, 75; — *magnétique*, III, 655.
- Froid**, ce que c'est; rayonnement apparent, II, 44; réflexion apparente, 420.
- des hautes régions de l'air, II, 635; des montagnes, 636; des espaces planétaires, 643; pôles du froid, 628.
- produit par *évaporation* de l'eau, II, 354; de divers liquides, 354; mélanges réfrigérants, 332; par détente des gaz, 528, 530.
- F. par un courant électrique**, III, 449.
- Fronde**, I, 84; — musicale, 548.

Frottement produit l'électricité, III, 97, 307; des métaux, 308; des gaz, 344; circonstances du frottement, 310; courroies de transmission, 312.
 — par un jet de vapeur, III, 126.
 F. diminué par adhésion capillaire, I, 281.
 F. produit de la chaleur, II, 519; applications, 523.
Fulgurateur (tube), IV, 251.
Fulgurites, III, 248.
Fumage des montagnes, II, 636.
Fusée Statham, III, 782.
Fusil à vent, I, 376.
Fusion des solides, II, 308; vitrée, 310; effet de la pression, 317.
 — par la décharge électrique, III, 222; par les courants, 444; dans l'arc voltaïque, 470.

G

Galactomètre (γάλα, lait; μέτρον). I, 201.
Galvanisation, des métaux, III, 538; dépôt de peroxyde de plomb, 545.
Galvanisme, expérience de Galvani, III, 321; de Volta, 323.
Galvanographie, III, 537.
Galvanomètre, III, 340, 567 (voy. RUÉOMÈTRE).
Galvanoplastie (πλάτω, façonner), III, 534; applications, 535 (voy. DORTRE).
Gamme (génération), I, 584; majeure, 586; mineure, 591; chromatique, 591; de Ptolémée et de Pythagore, 596.
Gaz, I, 44, 160; théorie mécanique, 162 et II, 595; gaz parfaits, réels, 601.
 G. équilibre, I, 306; poids, 307; manière de recueillir, 331; loi de leur compressibilité, 333; à 100°, II, 249.
 G. écoulement, I, 394; vitesse, 397; dans les tuyaux de conduite, 400.
 — mélange entre eux, diffusion, 403; à travers les cloisons, 405.
 — mélange avec les liquides, 412; sous forte pression, 413; échange à travers

une cloison humide, 418; rôle dans l'ébullition, II, 368.
 — Condensation par les solides, I, 456 et 406; occlusion par les métaux, 422, 424.
 G. *conductibilité calorifique*, II, 472; chambre de Saussure, II, 475; machine solaire, 476.
 G. *chaleur spécifique*, II, 291; expérience de Delaroché et Bérard, 292; de de la Rive et Marcet, 297; de Dulong, de Regnault, 298; chaleur spécifique des vapeurs, 303; des gaz à volume constant, 291, 306, 598.
 G. *Liquéfaction et solidification*, II, 385; de l'acide carbonique, 386; du protoxyde d'azote, 389; des gaz dits permanents, 392.
 G. (chaleur dégagée par compression des), II, 527, 531; — froid produit par l'expansion, 528; froid dans un jet de gaz, 529 — détente des gaz (*thermodynamique*), 602.
 G. *dilatation*, II, 223; formule 225; effet sur la pression, 226; à hautes températures, 227; exp. de Regnault, 230; — d. sous pression variable, 234; sous pression constante, 236; comparaison des dil. des divers gaz, 240; applications, 251. — Pouvoir refroidissant, II, 431 G. et III, 455.
 G. *densité*, II, 244; cas où le gaz attaque les métaux, 245; expériences nouvelles, 246, 247; applications à la chimie, 249; par la vitesse d'écoulement, I, 397.
 G. *indice de réfraction*, IV, 473; par le réfracteur interférentiel, 461; dispersion, 465.
 Gaz, *vibrations*, I, 614; dans les tuyaux sonores, 617 — masses d'air de forme quelconque, 630; loi des volumes semblables, 632; — vibrations par communication, 635; tuyaux à anche, 643.
Gazomètre, I, 401; de laboratoire, 332.
Gelée blanche ou givre, II, 722.
Générateurs magnéto-électriques, III, 789; à vapeur, II, 452.
Girouette, II, 672 (voy. ANÉMOMÈTRE).
Givre, II, 722, 723.

Glace, conductibilité calorifique, II, 159; densité, 323; chaleur spécifique, 338; chaleur latente, 335; dilatation, 191; force expansive, 321, 323; résistance, 339; commerce, 162.

— Formation au-dessous de 0°, II, 314; dans le vide, 351; par le rayonnement nocturne, 617; — moulée par pression, 319.

— des mers polaires, champs, montagnes de glace, II, 657.

G. isolante pour les courants électriques, III, 486.

G. étamées, argentées, pouvoir réflecteur, IV, 45; images multiples, 114.

Glacières, II, 161.

Glaciers, cause de leur plasticité, II, 319.

Glaçons charriés sur les rivières, II, 658.

Glissières des m. à vapeur, II, 476.

Globes fulminants, III, 253, 285, 476.

Gloire, ou *cercle d'Ulloa*, IV, 508.

Gomme laque, III, 101.

Goniomètre (*γωνόμετρον*, angle; *μέτρον*) de réflexion, IV, 58; de Wollaston, 58; de Charles et Malus, de Babinet, 60.

— appliqué au microscope, 416.

Goutte d'eau, formation, I, 244.

Graphiques (représentations) des phénomènes, 10, 40.

Gravité, I, 86 (*voy.* PESANTEUR).

Gravitation, I, 86; lois, 87; origine, 89; historique, 148.

Gravure sur verre par l'électricité, III, 475; galvanique, 537; héliogravure, IV, 291.

Grêle, III, 274; théories diverses, 277; théorie giratoire, 278; paragrêles, 280.

— électrique, III, 414.

Grêlons, structure, forme, III, 274.

Grenouille galvanique, III, 321; courant de la gr., 422; piles de gr., 424.

— rhéoscopique, III, 423.

Grésil, II, 732.

Grisou décelé par la diffusion, I, 410.

Grossissement, de la loupe, IV, 403; du microscope composé, 408, 417; de la lunette astronomique, 424, 425; du télescope, 434; mesure par le prisme de Rochon, 545.

G. des objets vus dans l'eau, IV, 112.

Gulf-stream, (courant du golfe), II, 654.

Gyroscope (*γυροσκόπος*, mouvement circulaire; *σκοπέω*, observer), I, 124.

H

Halos (*ἅλωσ*, aire, disque), et phénomènes concomitants, IV, 338; théorie, 340, 341; arcs tangents, 343; expériences, 345; circonscrits, 344; — leur lumière est polarisée par réfraction, 587.

Harmattan, vent, II, 693.

Harmonica, I, 693; chimique, 519; thermique, 518; de Saint-Domingue, 677.

Harmoniques, sons, I, 592; des tuyaux d'orgue, 621.

Hauts-fonds, influence sur la température de la mer, II, 656.

Hauteur de l'atmosphère, I, 424; déduite du crépuscule, IV, 325.

H. du son, ou ton, I, 569; influence du mouvement des corps sonores, 527.

Hauteur par le baromètre, I, 427; II, 367 (*voy.* ALTITUDE).

H. d'un corps par son ombre, IV, 44; au moyen d'un miroir, 48.

Hélice, *dextrorsum*, *sinistrorsum*, III, 641; magnétisante des électros, 616; mouvements du fer dans les hélices, 656.

H., propulseur des navires à vapeur, II, 468.

Héliographie (*ἥλιος*, soleil; *γράφω*, dessiner), IV, 276 (*voy.* PHOTOGRAPHIE).

Héliogravure, IV, 291.

Héliostats (*ἥλιος*, soleil; *στάω*, s'arrêter), IV, 62 à 70.

Héliothermomètre, II, 492.

Héliotypie, IV, 292.

Hémiédrie, I, 446; superposable ou non, IV, 723; relation avec le pouvoir rotatoire, 724, 726.

Hémiopsie (*ἡμί*, demi; *ὄψις*, vue), IV, 383.

Hémisphères de Magdebourg, I, 328.

Horloges, réglées par le pendule, I, 116; mystérieuses, 96.

H. électrique, III, 861; compteurs électro-

chronométriques, 863; régulateur électrique des horloges, 865.

II. *magnétique*, III, 8.

II. *polaire*, IV, 572.

Hétérostatic, de Thomson, III, 289.

Horoptre (ὄρος, borne; ὀπτομαί), IV, 382.

Houppes des cristaux dichroïques, IV, 567; d'Haidinger, 568.

Humidité de l'air, effets, II, 699.

Hydraulique (ὕδωρ, eau; ἀνάβς, tuyau), I, 208.

Hydrocérame (ὑδωρ, κέραμος, argile), II, 353.

Hydroclymax (ὑδωρ, κλίμαξ, degré), I, 333.

Hydrodynamique (ὑδωρ, δυναμίς, force), I, 63, 208 — des gaz, 394.

Hydrogène, occlusion par le palladium, I, 424; II, 538; conductibilité pour la chaleur, 173; action sur le chlorure d'or, III, 386; force de polarisation voltaïque, 627; son spectre, IV, 254.

Hydrogénium, II, 538.

Hydrométéores, II, 699 (voy. ROSÉE, PLUIE, NEIGE, BROUILLARD).

Hydrostatique, I, 63; des liquides, 164; principes généraux, 165; corps plongés, 180.

II. des gaz, I, 306.

Hygromètres (ὑγρός, humide; μέτρον), chimique, II, 702; à cheveu, 704; tables hygrométriques, 705; — de condensation, 708, 710; d'évaporation, *psychromètre*, 712.

Hygrométrie, effets de l'humidité de l'air, II, 699; *état hygrométrique*, 701; méthodes hygrométriques, 702; — résultats, variations diurnes, 717; mensuelles, 718.

Hygroscopes, II, 704.

Hypsomètre, II, 367.

I

Illumination (formule d'), IV, 26.

Images formées par les petites ouvertures, IV, 15; vues dans les miroirs plans, 47; entre deux miroirs parallèles, 51;

inclinés, 52; dans les miroirs de verre étamé, 114; — projetées par les miroirs sphériques, 82; vues dans les miroirs sphériques, 83; dans les m. cylindriques, coniques, 89.

— focales des lentilles convexes, IV, 438.

— formées dans l'œil, IV, 352, 354.

I. de Moser, IV, 296.

Impénétrabilité de la matière, I, 43.

Incandescence, IV, 6; succession des radiations, 85.

Inclinaison de l'aiguille aimantée, III, 18, 69; dans les divers azimuts, 22; en différents lieux, 71; détermination par les oscillations, 70; au moyen de l'aiguille horizontale, 70; relation avec la latitude, 73, 93; variations, 88.

Incombustibilité momentanée des tissus vivants, II, 380.

Indicateur de Watt, II, 448; — à niveau des chaudières, 460.

Indice de réfraction, IV, 94; dans le système des ondes, 457, 459; dans celui de l'émission, 473.

— relatif, 94, 413, 459.

I. *mesure*, des solides, méthode de Newton, IV, 159; cas d'une plaque, 162; solides de forme quelconque, 167; — des liquides, 163; par la réflexion dans la veine liquide, 335; par la réflexion totale, 164; corps opaques, 168; résultats, 169.

— des gaz, IV, 172, 461 (voy. GAZ); de la vapeur d'eau, 177, 463; des vapeurs à température élevée, 177.

I. *mesure* par le microscope, IV, 418.

— *mesure* par les interférences, IV, 459; de l'eau comprimée, 464; par les couleurs des lames minces, 514, 518; influence de la température, 521; par l'angle de polarisation, 566; par le déplacement du plan de polarisation dans la réflexion, 580.

Inducteur différentiel, III, 737.

Inductif, *pouvoir*, III, 470, 474.

Induction par les courants, III, 709; par les aimants, 710; influence du fer, 712; — par la terre, 712; par un circuit très long, 714; loi de Lenz, 715.

- I. par les courants instantanés, 730; par la décharge, 732; formule de la force d'induction, 727; théorie, 717 (v. COURANTS INDUITS).
- I. réfléchit, III, 740 (voy. EXTRA-COURANT).
- I. (machines d'), III, 759, 783 (voy. MACHINES).
- I. Dans les corps en mouvement, III, 747; produit de la chaleur, 757 (voy. MAGNÉTISME PAR MOUVEMENT).
- I. *electro-statique*, III, 108; effets dans la décharge, 228; théorie de Faraday, 176.
- I. des nuages orageux sur la terre, III, 255.
- Inductionnètre différentiel**, III, 174.
- Induration**, produit des couleurs dans la lumière polarisée, IV, 635.
- Inertie de la matière**, I, 51.
- Inflexion du son**, I, 637.
- Injecteur Giffart**, II, 455.
- Insectes**, dégagent de la chaleur, II, 34, 514.
- Insolation**, II, 492; produit la phosphorescence, IV, 297, 299.
- Instruments de musique**, 614; à cordes, 668; à vent, 645; à verges élastiques, 677; à membranes, 697.
- I. d'optique grossissants, IV, 401.
- Interférences de la lumière**, IV, 445; expériences, 446, 447; manières de la produire, 451; avec grandes différences de marche, 453; déplacement des franges, 458; — de la chaleur, des radiations chimiques, 454; — du son, I, 556.
- Interrupteur des courants**, III, 759; à mercure, 765.
- Intervalles musicaux**, I, 584; de la gamme, 587.
- Irisation des corps vus à travers le prisme**, IV, 192; par les enduits minces, IV, 509, 522.
- Irradiation dans l'œil**, IV, 372.
- Isochronisme du pendule**, I, 110.
- Isolants**, corps, III, 101.
- Isoméris** (ἴσος; pareil; μέρος, partie), I, 162.
- Isomorphisme**, étude par la lumière polarisée, IV, 661.
- J**
- Jarre électrique**, III, 190.
- Jets d'eau**, I, 224; dans le vide, 375; dans un siphon, 390.
- Jeux de l'orgue**, I, 651.
- J. d'étincelles électriques**, III, 210.
- K**
- Kaléidopolariscope**, IV, 655.
- Kaléidoscope** (καλλός, beau; εἶδος, image; σκοπέω, regarder), IV, 55.
- Kaléidophone**, I, 677 (voy. CALÉIDOPHONE).
- Kilogrammètre**, I, 74.
- L**
- La du diapason normal**, I, 593.
- Lacs**, température, II, 658; du fond des lacs d'eau douce, 218.
- Laminoir**, I, 486.
- Lames minces** (couleurs dans les), IV, 509; (voy. ANNEAUX COLORÉS).
- Lampadorama**, IV, 148.
- Lampe d'émailleur**, II, 518; de Locatelli, 53; sans flamme, II, 514; de sûreté, 543; Drummond, 549; oxyhydrique, 549; IV, 152; — *photo-électrique*, IV, 152; régulateur de la lumière électrique, III, 874; à incandescence, 884; à main, IV, 154; — *monochromatique*, IV, 209.
- Lanterne magique**, IV, 147.
- L. de projection**, IV, 153, 154.
- Larmes bataviques**, I, 494.
- Larynx**, description, I, 738.
- Lentille**, IV, 129; formule, 130, 137; foyers, 130; foyer principal, 131; — cas de deux lentilles, 134; cas du point lumineux hors de l'axe, 135, 136; images focales, 138.
- L. achromatique**, 225.
- L. aplanétique**, IV, 143; périscopique, 365, 404.
- L. à échelons**, ou *polyzonale*, II, 63; application aux phares, IV, 155.

- Lentiprisme**, ou *prisme ménisque*, IV, 446.
- Lever**, I, 433; droit, 434.
- L. pneumatique** des orgues, I, 651.
- Lignes isobariques**, II, 667; *isothermes*, 627; *isochimènes*, *isothères*, 630.
- L. isogoniques**, sans déclinaison, III, 66; *isoclines*, 73; sans inclinaison, 71, 72; *isodynamiques*, 77.
- L. nodales**, I, 544, 681 (*voy. NODALES*).
- Liquéfaction** des solides, II, 308 (*voy. Fusion*); par dissolution, 327.
- des gaz et des vapeurs, II, 385.
- Liquides**, I, 44; *cohésion*, 152; exp. de M. Plateau, 154, et IV, 510; théorie thermo-dynamique, II, 593; — hydrostatique des liquides, I, 164; — écoulement, 208; principe de Toricelli, 210; par les ajutages, 220 (*voy. VEINE*).
- compressibilité, I, 296; par les vibrations, 657.
- vibrations, I, 653.
- conductibilité calorifique, II, 168; dilatation, 187, 208.
- Locomobiles**, II, 451.
- Locomotives**, historique, II, 472; description, 473; puissance, 478; à grande vitesse, 479; — à air comprimé, I, 378, et II, 482; régulateur, 433.
- Logarithmes acoustiques**, I, 595.
- Lois physiques**, I, 9; manière d'établir, 40.
- L. de Kepler**, I, 86; de Bernouilli, 617; de Brewster, IV, 501; de Dulong, II, 277; de Faraday, III, 503; de Joule, 453; de Jurin, I, 253; de Lenz, III, 715; de Mariotte, I, 333; II, 249; de Newton, II, 87; d'Ohm et Pouillet, III, 579.
- Longueur réduite d'un circuit**, III, 579.
- Longue-vue**, IV, 427.
- Loupe**, IV, 402 (*voy. MICROSCOPE SIMPLE*).
- L. dichroscopique**, IV, 656.
- Lucimètre** de Bouguer, IV, 318.
- Ludion**, I, 187.
- Lumière**, IV, 1; hypothèses sur sa nature, système des ondulations, 4, 441; de l'émission, 4, 472; sources, 5; — mode de propagation, 11; vitesse, 16; intensité, 24 (*voy. PHOTOMÉTRIE*).
- L. diffuse**, IV, 41, 42, 45.
- L. polarisée**, IV, 551 (*voy. POLARISATION*).
- L. électrique**, III, 205; dans l'air raréfié, 213; dans divers milieux, 214; dans le vide, 215, 772; raies spectrales, IV, 236.
- L. electro-silicique**, III, 465; de l'arc voltaïque, 472, 474; régulateurs, 875 (*voy. ARC VOLTAÏQUE, ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE*).
- L. des courants induits**, III, 772; stratification, 214 et 774.
- L. Drummond**, II, 549; oxyhydrique, 549, etc.
- L. zodiacale**, II, 608; est polarisée, IV, 569.
- Lune**, action de la terre, I, 88; sa lumière est polarisée, IV, 569.
- Lune rousse**, II, 648.
- Lunette astronomique**, IV, 420; — grossissement, 424, 425; mesuré par le prisme de Rochon, 545. Clarté, 425. Historique 431. Apparence au foyer, 493. — L. Parallactique, 422.
- L. terrestre**, IV, 427; de Galilée, 430; polyalde, 428; dialytique, vitro-cristalline, 423.
- L. horizontale**, IV, 70.
- L. magique**, IV, 49.
- L. de Rochon**, IV, 543.
- L. magnétique**, III, 80.
- Lunettes** ou *lenticules*, IV, 364.
- Lycopode**, se poste sur les ventres de vibration, I, 682, 691; produit des anneaux par diffraction, IV, 504.

M

- Machine** simple ou composée, I, 73; rendement, 76, et II, 589.
- M. à diviser**, I, 29, 31, 33.
- M. d'Atwood**, 401; *id.* par l'électromagnétisme, III, 874; de Morin, I, 401; à colonne d'eau, 476; de Schemnitz, 375; soufflante, 403; à air comprimé, I, 378; II, 482; à air dilaté, II, 252, 484; à gaz inflammable, 485.
- M. à comprimer les gaz**, I, 372.
- M. pneumatique**, I, 355 (*voy. PNEUMATIQUE*).
- M. solaire**, II, 476.

- Machine à vapeur**, historique, II, 426; atmosphérique, 430; à double effet, 433; de Watt, 437; à haute pression, 439; Maudslay, 440; à cylindre oscillant, rotative, 441; à détente, 442; calcul du travail, 446; — à vapeurs combinées, 444; surchauffées, 445 (voy. CHAUDIÈRES, MOTEURS).
- Machine électrique**, III, 420; de Ramsden, 421; de Nairne, 424; hydro-électrique, 427; d'induction électrostatique, de Holtz, 434; de Bertsch, carré, 436.
- M. d'induction électrovoltaïque**, III, 759; volta-faradique, 764; de Ruhmkorff, 762; (voy. BOBINE).
- M. magnétoélectrique**, de Pixii, III, 783; de Saxton et Klarke, 784; à commotions, 788; par la terre, 789; de Nollet, 789; de Siemens, 792; de Wild, de Ladd, 493; de Gramme, 795; etc. (voy. APPAREILS).
- M. électromagnétique**, III, 801 (voy. MOTEURS).
- Magnétisme**, III, 6 (voy. AIMANT); influence de la chaleur, 8, 915; hypothèse de Coulomb, 11; éléments magnétiques, 43; — distribution dans les aimants, 28; transversalement, 32.
- *dissimulé* par les armatures, III, 47.
- *développé* par les courants, III, 641; théorie électrodynamique, 696. — Action sur l'arc voltaïque, 468; sur le plan de polarisation, IV, 728.
- M. par mouvement**, ou de rotation, III, 747; lois, 749; explication par l'induction, 750; distribution des courants dans un disque, 752; — induction par mouvement dans une masse, 755; dans les cristaux, 756; produit de la chaleur, 757; II, 578.
- M. polaire des roches**, III, 95.
- M. rémanent des électro-aimants**, III, 647.
- M. spécifique**, III, 904; actions mécaniques, 916; des corps diamagnétiques ou peu magnétiques, 910; lois, 912; de l'oxygène, de l'air, 914; influence de la chaleur, 915; — dans les cristaux, 916; explication, 917.
- M. terrestre**, III, 54; mesure, de l'intensité, 74; méthode de Gauss, 75; étude, 76; hypothèses sur la distribution, 92; — explication par les courants, III, 690.
- M. (universalité du)**, III, 887 (voy. DIAMAGNÉTISME).
- Magnétomètre bifilaire**, III, 83.
- M. balance**, III, 84; électrique, 574.
- Mal des montagnes**, I, 329.
- Malléabilité**, I, 486.
- Manivelle dynamométrique**, I, 62.
- Manomètre** ($\mu\alpha\nu\acute{o}\varsigma$, rare; $\mu\acute{\epsilon}\tau\epsilon\rho\omicron\nu$), à air, I, 350; barométrique, 360; métallique, 353; par compressibilité du verre, 464; à air libre, II, 458; à colonnes multiples, 459; de Berthollet, II, 362.
- Marées**, dues aux attractions de la lune et du soleil, I, 89.
- Marmite norvégienne**, II, 460; de Papin, 364; autoclave, 364.
- Marteau d'eau**, I, 100.
- M. pilon**, à vapeur, II, 450.
- Masse**, I, 65, 67; mesure, 432.
- M. de la terre**, I, 143.
- Matière**, I, 43; des trois états, 44, 46, 451, 458; hypothèse d'Ampère, 161; théorie mécanique, 462; théorie thermodynamique, II, 593, 595. — Distribution dans l'espace, IV, 264.
- Maximum de densité de l'eau**, II, 216; des dissolutions salines, 223; — de viscosité, I, 244.
- Médecine**, appl. des courants électriques, III, 444; appl. de l'incandescence des fils, 445; déplacement de substances chimiques dans les tissus vivants, 490.
- Mégascope**, ($\mu\acute{\epsilon}\gamma\alpha\varsigma$, grand; $\sigma\kappa\omicron\pi\acute{\epsilon}\omega$, regarder), IV, 146.
- Mélange des gaz** entre eux, I, 403; avec les liquides, 412.
- M. explosif**, II, 542; frigorisque, 332.
- M. des couleurs**, IV, 188, 210.
- Mélodi-aphone**, I, 612.
- Membrane**, vibrations, I, 694; influence sur une colonne d'air, 728; — analyse les mélanges gazeux, 418.
- Ménisque capillaire**, I, 251, 262, 257, 267.

- M. convergent, divergent (lentilles), IV, 429.
- Mer** (phosphorescence de la), IV, 7; — température, II, 652; causes qui la modifient, 653; courants, 654.
- Mercure**, dilatation absolue, II, 201; — mouvements pendant l'électrolyse, III, 502; rotation par les aimants, par les courants, 705.
- Méridien terrestre**, mesure, I, 127.
- M. magnétique**, III, 17; magnétique vrai, 68.
- Mesures de précision**, I, 19.
- Métacentre**, I, 185.
- Métaux**, sont bons conducteurs de la chaleur, II, 145; de l'électricité, III, 101; altération par les courants, III, 474; relation de leur chaleur de fusion avec leur élasticité, II, 344; — polarisent la lumière elliptiquement par réflexion, IV, 678; couleur, 678.
- Météores** (μετέωρος, élevé) qui dépendent de la chaleur, II, 611; aqueux, 699, 724; — électriques, III, 239; — dépendant de la réfraction de l'air, IV, 103, 316; de la dispersion, 319, 327, 338; de la diffraction, 503.
- Météorographe**, II, 620.
- Météorologie** (μετέωρος, λόγος, discours), II, 611; III, 239; IV, 316, 503.
- Méthode expérimentale**, I, 18; de précision, de multiplication, 35; de répétition, 36; des corrections successives, 38.
- Mica**, forme cristalline, angle des axes, IV, 550, 663; quart d'onde, 669.
- Micromètre** (μικρός, petit; μέτρον, focal, I, 23, et IV, 423; de Fresnel, 449; à double image de Rochon, IV, 543.
- Microphone**, III, 857.
- Microscope** (μικρός, petit; σκοπέω, regarder), simple, IV, 402; — de Raspail, à main, stanhope, divers, 404, 405.
- M. composé**, IV, 406, 409; — à plusieurs corps, binoculaire, 414; accessoires, 415.
- M. catadioptrique**, IV, 440.
- M. polarisant**, IV, 659.
- M. solaire**, IV, 150; à gaz, photo-électrique, 152.
- Mines**, température, II, 506; aérage, 251.
- M. inflammation** par l'électricité, III, 221, 781.
- Mirage**, IV, 103; inverse, latéral, 107; déplacement, suspension, 108.
- Miroirs plans**, IV, 47; de glace étamée, 47, 114; parallèles, 51; inclinés, 52.
- M. courbes**, IV, 74; *sphériques*, construction de la caustique, 72; — cas de l'ouverture très-petite, 75; formule, 76; — images focales, grandeur, 82; images vues dans les miroirs sphériques, 83; — mesure du rayon, 81.
- *magique*, IV, 48.
- M. paraboliques**, applic. aux phares, IV, 86; *elliptiques*, *hyperboliques*, 87; *cylindriques*, *coniques*, 88.
- M., chaleur**, II, 47, 48; conjugués, 47, 49; ardents, 50.
- Mobilité**, I, 51.
- Mode**, majeur, I, 586; mineur, 591.
- Moderateur** à force centrifuge, II, 438.
- Moliné, 439.
- Moiré métallique**, I, 453.
- Molécules**, I, 46; forces qui les retiennent, 151; état dans les corps, dynamides, 164; théorie mécanique, 162.
- Moment** d'une force, du levier, I, 134.
- M. magnétique d'un aimant**, III, 28.
- Monocorde**, I, 402, 565, 588.
- Montagnes**, dévient le fil à plomb, I, 144; formation, II, 508; neiges perpétuelles, 641.
- M. de glace** des mers polaires, II, 657.
- Montgolfière**, I, 434 (voy. AÉROSTATS).
- Montre-thermomètre**, II, 621.
- Mortier électrique**, III, 119.
- Moteurs** à vapeur, II, 426, à air comprimé, I, 378, 433; à air dilaté, 484, 485; divers à gaz inflammable, 485; — électro-capillaire, III, 501.
- M. électromagnétique**, III, 801; à rotation directe, 803; à mouvement alternatif, 804; comparaison aux moteurs à vapeur, 807; machines magnétoélectriques comme moteurs, 810.
- Moulinet** dans le vide, I, 52.
- M. électrique**, III, 157.

Moussons (*mawsim*, en arabe, saison), vents, II, 685, 689.

Mouvement, *absolu, relatif*, I, 51; uniforme, varié, 54; uniformément varié, 55; composé, 58; *curviligne*, 79; — explique les forces, 78.

M. Influence sur la hauteur du son, I, 52; sur la réfrangibilité de la lumière, IV, 466.

M. de translation des astres mesuré par le spectroscopie, 266.

Multiplicateur, III, 339; à deux aiguilles, 340 (*voy. RMÉOMÈTRE*).

Multiplication (méthode de), I, 36.

Mur (distr. de la chaleur dans un), II, 146.

Muscles, chaleur et travail comparés, II, 605; contraction par l'électricité, III, 430, 436.

Musique, I, 589.

Myopie ($\mu\acute{\omega}\omega$, *cligner*, $\omega\psi\iota\varsigma$, *vue*), IV, 363.

N

Nacre, couleurs irisées, IV, 501.

Navires, équilibre, I, 185; *naviragés* (sauvetage) 186; doublage préservé par actions voltaïques, III, 549.

Nébuleuses, formation, IV, 746; analyse spectrale, 205.

Neige, II, 730; quantité annuelle, 732; perpétuelle des montagnes, limite, 641.

Néphéloscope ($\nu\epsilon\pi\epsilon\lambda\eta$, *nuage*; $\sigma\tau\omicron\pi\acute{\epsilon}\omega$), II, 694.

Nerf acoustique, I, 732.

N. optique, IV, 352, 383.

Nerfs (action des courants sur les), III, 437.

Nicol, *prisme*, IV, 553, coupé de Jellet, 721.

Nimbus, II, 725; formation, 727.

Niveau à bulle d'air, I, 189; d'eau, 180.

N. constant d'un liquide, 213, 393.

Nœuds de vibrations, des cordes, I, 664; des verges droites, 673; des verges courbes, 678; des tuyaux sonores, 647, 624.

Nodales (*lignes*), I, 613; plaques carrées,

684; polygonales, circulaires, 689; — elliptiques, 691; déplacement, 691.

N. des membranes, I, 695.

N. des vibrations longitudinales, caractères, I, 703; origine, 706.

Noir, matériel, absolu, IV, 401.

N. de fumée, est mélanothermique, II, 79; absorbe également tous les rayons, 467.

Nomenclature des couleurs, IV, 213; des nuages, II, 725; des vents, 671; etc.

Nonius, I, 22.

Notes de la gamme, rapports des nombres de vibrations, I, 586.

Nuages, nomenclature, II, 725; formation, 726; suspension, 728.

N. *orageux*, actions par influence, III, 255; formation, 267, 270; invisibles, 295; — des volcans, 274; — à grêle, 277, 278.

Nuance des couleurs, diffère du ton, IV, 213.

O

Objectif, des microscopes, IV, 409, 413; des lunettes, 420; du daguerrétype, 279.

Observation, en quoi elle diffère de l'expérience, I, 18.

Observatoires météorologiques, II, 613; *magnétiques*, III, 78; *électriques*, 290.

Occlusion des gaz par les métaux, I, 422, II, 538.

Octave musicale, I, 576, 585.

Oculaire, de Campani, IV, 407; *positif* ou de Ramsdem, *néglitif* ou d'Huyghens, 423.

O. fluorescent, IV, 307.

Œuf électrique, III, 206.

Œil, description, IV, 349; ajustement d'après les distances, 358, 361; sensibilité, 368; durée de l'impression, 373 (*voy. VISION*).

OE. artificiel, 365; au sélénium, 309.

Œnomètre ($\omega\iota\nu\omicron\varsigma$, *vin*; $\mu\acute{\epsilon}\tau\tau\omicron\nu$), I, 201.

Ombre, et pénombre, IV, 13; sert à mesurer les hauteurs, 14; — colorée, 399, 401.

O. *frangée*, ou *gloire*, IV, 508.

- O. sonore, I, 560.
- Ombromètre** (*ὄμβρος*, pluie; *μέτρον*), II, 735.
- Onde lumineuse**; surface dans les uniaxes, IV, 540; dans les biaxes, 547; équation, 611; discussion, 614.
- O. sonore, mesure de sa longueur, I, 526; surface, 531.
- Ondulations de la lumière** (système), IV, 4, 441; principe d'Huyghens, 443; des interférences, 445; — expl. de la réflexion, 455; de la réfraction, 457; de la dispersion, 468; comparaison au système de l'émission, 472, 475.
- O. Longueur (d'), mesure par les interférences, IV, 450; par les réseaux, 500.
- O. de la chaleur, II, 40.
- Opacité**, IV, 12.
- Ophthalmoscope** (*ὄφθαλμος*, œil; *σκοπέω*, regarder), IV, 368.
- Optique** (*ὀπτικός*, qui a rapport à la vue), IV, 1; division en deux parties, 2.
- Optomètre** ou *opiomètre* (*ὄψις*, vue; *μέτρον*), IV, 366.
- Orages**, translation, III, 265; formation, 267; locaux, 269; répartition suivant les saisons, 271; suivant les lieux, 272; en Europe, 273.
- O. magnétiques, III, 91.
- Oreille**, description, I, 731 (voy. *Οὐίε*).
- Orgue**, description, I, 648; jeux, 654; — communication du clavier par fils électriques, III, 873.
- O. philosophique ou chimique, I, 519.
- Oscillations** du pendule, lois, I, 110; — (méthode des), pour les forces magnétiques, III, 25; électriques, 140.
- Osmium**, densité, I, 198.
- Osmose** et endosmose, I, 288; théorie, 294.
- Osselets** de l'oreille, I, 731; rôle dans l'audition, 735.
- Ouïe**, I, 731; mécanisme de l'audition, 514, 733; théorie, 734; rapport du jugement avec la sensation, 737.
- Ouragans**, II, 693, et III, 267.
- Ouverture** d'un miroir sphérique, IV, 75; d'une lentille, 130, 132; — images formées par les petites ouvertures, 15; imago d'une O., 139.
- Oxydes**, décomposés par la pile, III, 481; dépôts galvaniques, 544; — formation par les actions lentes, 547 (v. *ΕΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΑ*).
- Ozone** (*ὄζω*, sentir); odeur de la décharge, III, 237; de la foudre, 250; préparation, 525; nature, 526; propriétés, 522; présence dans l'air, 530.

P

- Palladium**, occulte l'hydrogène, I, 424; II, 538; III, 488.
- Palmique** (*παλμικός*, relatif aux vibrations), I, 613.
- Palmiscope**, I, 530, 622.
- Panorama** (*πᾶν*, tout; *ὄραμα*, spectacle), IV, 389.
- Papier photographique**, IV, 280; ciré, gélatiné, 283; parchemin, I, 295.
- Parabole** des projectiles, I, 406; miroirs paraboliques, II, 47; IV, 86.
- Parachute**, I, 438.
- Paradoxe hydrostatique**, I, 176.
- P. magnétique, III, 13.
- Parafoudre** des télégraphes, III, 846.
- Paragrêle**, III, 280.
- Parallèles magnétiques**, III, 68.
- Parallépipède** des forces, I, 69; — de Fresnel, IV, 674; usage comme polariscope circulaire, 672.
- Parallélogramme** des vitesses, I, 58; des forces, 67; — de Watt, II, 433.
- Paranthésie**, IV, 339, 346.
- Parasélène**, IV, 340.
- Paratonnerre**, III, 258; construction, 260; des navires, 263; utilité, 263.
- Parhélie** (*παρῆ*, auprès; *ἥλιος*, soleil), IV, 338, 342.
- Parole**, I, 743.
- Passe-*vin***, I, 468.
- Passivité** du fer, etc., III, 497.
- Pavillon** du cor, etc., I, 647; de l'oreille, 734; rôle, 734.
- Pendule** (*pendulus*, pendant), simple, I, 409; composé, 112; réversible, 144.

- P.** Applications aux horloges, I, 116; à la masse de la terre, 143; à la preuve de la rotation de la terre, 122; entretien des oscill. pour cette expér., III, 871.
- P.** cycloïdal, I, 147; à seconde, 120.
- P.** acoustique, I, 744; influence mutuelle de deux pendules, 723.
- P.** compensateur ou compensé, II, 196.
- P.** électrique, III, 98; magnétique, 7.
- Pénombre** (*pene*, presque), IV, 13.
- Perce-carte**, III, 230.
- Perce-verre**, III, 230.
- Perspective**, linéaire, aérienne, IV, 388.
- Perturbations** de l'aiguille aimantée, III, 90; par les aurores boréales, 91, 300.
- Pesanteur**, I, 86; lois, 98; intensité, 118; variations, 121; dans l'intérieur de la terre, 130; au-dessus de sa surface, 134.
- P.** de l'air, des gaz, 307.
- Pèse-liqueur**, etc., I, 178.
- Peson à ressort**, I, 60.
- Phares**, catoptrique, IV, 87; dioptrique, 155; à éclipses, 156; fixes, 157; éclairés par l'électricité, III, 880.
- Phénakisticope** (φανακιστικός, qui trompe; σκοπέω), IV, 377; stéréoscopique, 393.
- Phénomène** (φαινόμενος, qui apparaît), définition, I, 1.
- Phonautographe**, I, 575.
- Phonéidoscope**, IV, 522.
- Phonographe**, III, 859.
- Phosphènes**, IV, 369.
- Phosphore** (φῶς, lumière; φέρω porter), luit dans l'obscurité, IV, 7; — de Canton, de Boulogne, de Baudouin, 40.
- P.** mercuriel, III, 216.
- Phosphorescence**, spontanée, IV, 7; de la mer, de certains animaux, 8; — artificielle, par la chaleur, par décharge électrique, 9; par actions mécaniques, 10; par insolation, 10, 297; considérations théoriques, IV, 471.
- Phosphorogéniques**, rayons lumineux, IV, 297; raies, 299; substances, 300.
- Phosphoroscope**, IV, 301.
- Photochimie**, IV, 268.
- Photoglyptie** (φωτῶ, graver), IV, 293.
- Photographie** (φῶς, lumière; γράζω), IV, 276; au mercure, 277; sur papier, 280, 283; sur verre, 283; au collodion, 283; positifs directs, 286; au charbon, 287; — applications, 288.
- P.** microscopique, IV, 288; de l'invisible, 289; dans l'œil, I, 369.
- P.** chromatique, IV, 293.
- P.** sidérale, stellaire, IV, 36.
- Photolithographie**, IV, 292.
- Photomètre** (φῶς, lumière; μέτρον), de Bouguer, IV, 27; de Foucault; de Ritchie; de Rumford, 28; de Bunsen, de Leslie, 29; de Wheatstone, 30; pour le gaz, 36.
- P.** chromatiques de Fraunhofer, IV, 30; de Masson, 31.
- P.** électrochimique, IV, 273; photographique, 291.
- P.** d'Arago, IV, 597; de M. E. Becquerel, 602; divers, 603; à pile de glaces, 633; de Babinet, 696; par les lames minces, 512.
- Photométrie**, lois, IV, 24; — formule d'illumination, 26; mesure des intensités des lumières, 27 (voy. PHOTOMÈTRE). — expériences d'Arago, IV, 599. — solaire, IV, 36, 601. — électrique, IV, 32.
- Physique** (φύσις, nature), générale, I, 1; classification, 2; origine, 5; — proprement dite, 4, 13; objet, 9; mathématique, 17; spéculative, 14.
- Piézomètre** (πίεσις, pression; μέτρον), I, 297; d'Ersted, etc., 298.
- Pile galvanique** ou voltaïque, théorie de Volta, III, 325; en activité, isolée, 327.
- P.** diverses à un liquide, III, 328; constantes, 331; à bouteilles, 333. — sèche, III, 334; applications, 335. — théorie chimique, III, 354; inversions, 355; origine chimique de l'électricité, 356; cas de plusieurs couples, 358; — quantité, tension, 359; piles inactives quand le circuit est ouvert, 360; — polarité des éléments, 361; — zinc distillé, 362; amalgamé, 363, 631. — travail chimique intérieur, III, 509; formule d'Ohm, 584.

- P. Causes de l'affaiblissement, III, 364; action de l'hydrogène, 365.
- Pile** constante à deux liquides, cloisonnée, III, 367; de Daniell, III, 368; de Wheatstone, 370; de Grove, 371; à charbon, 372; modifications diverses, 375; etc.
- *voltaïque à gaz*, III, 384, 509.
- *secondaire* de Ritter, III, 378; — de M. Planté, 379; effets, 382.
- *comparaison des forces électromotrices*, III, 613 (voy. COUPLES).
- *de grenouille, musculaire*, III, 421.
- *thermo-électrique*, III, 403; de M. Clamond, 405.
- *de tourmalines*, III, 304.
- Pile de glaces**, IV, 552; théorie, 585; application aux polarimètres, 603.
- Pince thermo-électrique**, III, 415; — à tourmalines, IV, 642.
- Pistolet de Volta**, III, 221.
- Plan de polarisation**, IV, 552; d'un rayon, 558; est perpendiculaire au premier, 558.
- P. d'épreuve, III, 147.
- Plans de Magdebourg**, I, 152.
- Planètes**, lois de leur mouvement, I, 86; analyse spectrale, IV, 265.
- Planisphère électrique**, III, 115.
- Plaque fusible**, II, 457; — de correction des boussoles, III, 56; tension électrique, 591.
- Plaques vibrantes**, I, 684; lois, 684; — figures acoustiques, plaques carrées, 685; polygonales, circulaires, 689; — déplacement des nodales, 691.
- Platine**, action sur les mélanges explosifs, II, 544; sur l'oxygène, III, 389; en éponge, 157; II, 537.
- Pluie**, théorie de Hutton, II, 728; de Babinet, 729; pluies singulières, 730; — répartition, 738, 742; quantités annuelles, influences, 740; — suivant les saisons, 743; jours de pluie, 743; — négatives, III, 296.
- P. de petits animaux, II, 285.
- P. de mercure (*expér. de la*), I, 50.
- Plume électrique**, III, 873.
- Pluviomètre**, II, 735; totalisateur, 736; enregistreur, 736.
- Pneumatique** (*πνευμαξ, air*), I, 305; — machine, I, 355; à double épuisement, 361; à double effet, 364; à piston libre, 365; à mercure, 367; applications, 370.
- Poêle**, II, 113; dans les pays du Nord, 161.
- Poids atomiques**, II, 249; relation avec la chaleur spécifique, II, 277.
- Poids d'un corps**, I, 92, 132; mesure, 136.
- P. d'un litre d'air, II, 246; perte d'un corps dans l'air, I, 207.
- Poids spécifique**, I, 432; mesure, 190; des liquides, 198; — des gaz, II, 244 (voy. GAZ).
- des vapeurs, II, 416 (voy. VAPEURS).
- Point oculaire du microscope**, IV, 407; du télescope, 421.
- Pointes** (*pouvoir des*), III, 156.
- *des paratonnerres*, III, 260.
- Points conséquents des aimants**, III, 10; manière d'en obtenir, 40, 642.
- Poisson**, équilibre, I, 187; de Franklin, III, 157.
- Poissons électriques**, III, 417.
- Polarimètre**, IV, 603; graduation, 604; de Hofmann, 722.
- Polarisation, des corps diélectriques**, III, 170; dans l'induction électro-statique, 173; par les vibrations, 319.
- P. *des électrodes*, 349; courant qui en résulte, 493; — force électromotrice développée, 623.
- P. *dans la pile*, III, 361; secondaire des éléments, 364.
- Polarisation de la lumière**, IV, 551; plan de polarisation, 552; — explic., 555; partielle, 568.
- P. *de l'atmosphère*, 570.
- P. *par réflexion*, 562; angle de polarisation, mesure, 563, 682; — à la seconde surface, 566; par réflexion diffuse, 567; — partielle, 568, 583.
- *théorie de la polarisation par réflexion*, 580, 582.
- *par réfraction simple*, IV, 583; pile de

- glaces, 585; — par émission oblique, 587; — théorie, 589.
- P. de la chaleur, IV, 570, 590; des rayons chimiques, 592.
- P. par double réfraction, IV, 592; expériences des deux rhomboïdres, 594. — Rayons calorifiques, chimiques, 596.
- P. chromatique, IV, 619, 622; — théorie, 625; dans la double réfraction accidentelle, 633.
- P. lamellaire, IV, 638.
- rayons convergents autour de l'axe, 644; théorie, 644; — cas du quartz, 689; — cristaux à deux axes, 647; franges hyperboliques, 650; surface *isochromatique*, 654; lames croisées, 653.
- P. mobile, IV, 625.
- P. elliptique et circulaire, IV, 664; état du rayon, 665; propriétés, 667; appl. à la lumière émergeant d'une lame bi-réfringente, 668.
- par réflexion totale, 674; par réflexion métallique, 673; différence de phase, 676.
- par réflexion sur les corps non métalliques, 684; lois et résultats généraux, 683; formules de Cauchy, 683.
- par réflexion cristalline, 684.
- P. rotatoire du quartz, IV, 689; lois de Biot, 690; teinte sensible, 692; mesure de la déviation, 693; influence de la température, 694; quartz, 698; manière de trouver le sens d'un cristal, spirales d'Airy, 699; cas de la chaleur, 701.
- théorie de Fresnel, 701; — de la cause première de la rotation, 705.
- pouvoir des liquides, 706; cas de la chaleur, 709; lois, 740; pouvoir spécifique, 711; vapeurs, 713.
- application à l'étude des dissolutions, 715; à la chimie, 747; à la saccharimétrie, 748.
- relation avec l'hémédroie, 723; cas des acides tartriques, 724.
- P. rotatoire magnétique, IV, 728; sens de la rotation, 729; — relation avec l'indice de réfraction, 732; influence de la température, 733; de l'état physique, 735.
- P. Relation avec la force magnétique, IV, 737; action oblique, 739; cas de la chaleur, 741.
- Polariscopes simples, IV, 554 à 554; de Nicol, 553; tourmaline, 553, 592.
- P. à deux images, de Wollaston, IV, 595.
- P. composés, à lunules ou d'Arago, IV, 554, 596; de Babinet, 625; de Savart, 654; — biquartz de Soleil, 696; de de Sénarmont, 697.
- P. circulaires et elliptiques, 669, 696, 697, Polaristrobomètre, IV, 722.
- Polarité diamagnétique, III, 890; moléculaire des éléments de pile, 360.
- Pôles des aimants, 3, 8, 10, 14, 15; magnétiques du globe, 49, 68.
- P. de la pile, III, 326; — homologues et antilogues des cristaux pyro-électriques, 393, 396.
- P. terrestres, température, II, 629; du froid, 628.
- Polémoscope, IV, 49.
- Poli, influence sur les pouvoirs diathermane, II, 54; émissif, absorbant, 92; 105.
- Polychroïsme, des corps colorés, IV, 197; des cristaux, 655.
- Polyprisme, IV, 183.
- Pompe aspirante, I, 381; foulante, 383; à double effet, 385; à piston plongeur, etc., 386.
- centrifuge, I, 85; de compression, 374.
- des selliers, I, 330.
- pneumatique, à main, I, 367.
- électrique, III, 425.
- Pont de Wheatstone, III, 602.
- Pont-tunnel, I, 485; américain, 484.
- Porosité, de la matière, I, 49; accidentelle, 50; phénom. d'occlusion, 423.
- Porte-lumière, IV, 62.
- Porte-voix, I, 551, 640.
- Poste pneumatique, I, 378.
- Potentiel électrique, III, 451; mesure, 453.
- Pouce d'eau, I, 219.
- Poussée des liquides, I, 482; des gaz, 308, 431.
- Pouvoir absorbant ou admissif pour la chaleur, II, 404; égale le pouvoir émissif,

- 109, 114, 129; — *émisif* ou *rayonnant*, 87; des métaux, 91; des gaz, 96.
- P. *réflecteur*, 97; variation avec l'incidence, II, 101; — *diffusif*, 102.
- P. *diathermane*, II, 52.
- P. *refroidissant* des gaz, II, 131; de l'hydrogène, 173, et III, 455.
- P. *conducteur*, II, 142 (*voy.* CONDUCTIBILITÉ).
- P. *calorique des combustibles*, I, 552, 574.
- P. *réflecteur* pour la lumière, IV, 43; — par diffusion, 45; des métaux, 601.
- P. *dispersif*, IV, 215; *réfringent*, 168.
- P. *rotatoire* des liquides, IV, 706; moléculaire, 711; applications, 715.
- P. *isolant* du vide, III, 216.
- P. *inductif*, III, 170, 174; *thermo-électrique*, 399, 401.
- P. *des pointes*, III, 156.
- Praxinoscope** (πράξις, agir), IV, 377.
- Prédiction** du temps, II, 747.
- Presbytie** (πρεσβυτις, vicillard), IV, 363.
- Presse électrique**, III, 224.
- *hydraulique*, I, 166; *sterhydraulique*, 168.
- Presse-étoupe**, I, 168.
- Pression**, des fluides, I, 164; des liquides sur le fond des vases, 170; sur les parois latérales, 173; de bas en haut, 175; pendant le mouvement, 228.
- P. *atmosphérique*, 308; effets, 827, 371.
- P. *des gaz*, I, 305; pendant le mouvement, 396, 397. — *théorie dynamique*, 162, II, 595.
- P. est une source d'électricité, II, 316.
- Prévision** du temps, II, 745.
- Principe d'Archimède**, I, 180; de Torricelli, 210; — d'Huyghens, IV, 443; des interférences, 445; d'Young, 516; de Fresnel, 573; etc.
- Prisme**, II, 62; en optique, IV, 115; conditions d'émergence, 116; rayons obliques aux arêtes, 117; déviation, 118; *dév. minimum*, 120; décompose la lumière, 181.
- P. à angle variable, IV, 119; *flacon*, 163; *ménisque*, 146; — *achromatique*, 220.
- P. *redresseur* des microscopes, IV, 415.
- P. de Nicol, IV, 553; de Rochon, 543; de Wollaston, 595.
- Problème d'Archimède**, I, 183.
- Projectiles**, trajectoire, I, 406; mesure de la vitesse, III, 866 à 868.
- Projections**, des images des objets, IV, 144; mégascopes, 146.
- Pronostics**, II, 745; tirés de la scintillation des étoiles, IV, 323; du crépuscule, 327; des mouvements de l'aiguille aimantée, II, 547; III, 92.
- Propagation** de la chaleur à distance, II, 43; par conductibilité, 142.
- de l'électricité dans les mauvais conducteurs, III, 165; dans les fils conducteurs, 550, 576; état variable, 551.
- de la lumière, IV, 14.
- du vent, II, 684; du son, I, 513, 528 (*voy.* Son).
- Propulseur** des bateaux à vapeur, à hélice, II, 468.
- Protubérances solaires**, IV, 261; sont polarisées, 569.
- Pseudoscope** (ψευδω, tromper; σκοπέω), stéréoscopique, IV, 394.
- Psychromètre** (ψυχρός, frais; μέτρον), II, 712.
- Puissance réfractive**, IV, 168; — dans le système des ondes, 459; de l'émission, 473.
- Puits artésiens**, I, 225; température, II, 507.
- P. de glace, II, 218.
- Punctum cœcum** de l'œil, IV, 370.
- Pupille**, IV, 350, 354.
- Pyrhéliomètre** simple, II, 493; à lentille, 494.
- Pyro-béliet**, II, 577.
- Pyro-électricité** des cristaux, III, 391; lois, 394.
- Pyromètre** (πῦρ, feu; μέτρον), de Sgravesande, I, 48; à cadran, II, 12; de dilatation, 37; de Wedgwood, 38; thermo-électrique, 39; chimique, 42.
- P. à air, II, 49, 239, 241; n'exigeant qu'une simple lecture, 242.
- P. calorimétrique, II, 272.
- P. par polarisation rotatoire, IV, 695.
- Pyrophone**, I, 521.

Q

- Qualités** du son, I, 522; intensité, 563; hauteur, 569; timbre, 778.
- Quantité** de chaleur, II, 257 (voy. CHALEUR SPÉCIFIQUE).
- Q. d'électricité**, de la pile; comparaison aux effets chimiques et magnétiques, à une charge électrostatique, III, 632.
- Q. de mouvement**, d'une force, I, 66.
- Quart d'onde**, lame, IV, 669.
- Quartz croisés**, IV, 653; de rotation inverse, 699 (voy. CRISTAL DE ROCHE).
- Quinine sulfatée**, manière d'en reconnaître la pureté, IV, 717; fluorescence, 304; absorbe les rayons ultraviolets, 294.
- Quinte musicale**, I, 585.

R

- Radiante** (matière), IV, 314.
- Radiations** (étude des), IV, 228; *colorifiques*, II, 81, et IV, 240; lumineuses, IV, 229; chimiques, 268, 470; phosphorogéniques, 297; fluorescence, principe de l'identité, II, 81.
- R. effets moléculaires**, IV, 307.
- Radiomètre**, IV, 309; théorie, 313.
- Raies du spectre solaire**, IV, 230, 258; gaz interposés, 233; font distinguer les sources de lumière, 232.
- R. telluriques**, 235.
- R. des sources artificielles**, de la lumière électrique, IV, 236; appl. aux analyses chimiques, 239 (voy. ANALYSE SPECTRALE).
- R. du spectre chimique**, IV, 270; vues par fluorescence, 307; du spectre phosphorogénique, 299.
- R. vues dans une fente étroite**, IV, 373.
- Rapport de dispersion**, IV, 215, 216; de réfraction, 94.
- Rayon de chaleur**, II, 45.
- lumineux, IV, 41; marchant en ligne courbe par réflexion continue, 56; — réfléchi, construction, 41; réfracté, cons-

- truction, 97; différences de réfrangibilité, vitesse, 24.
- R. coloré simple**, IV, 187. — Effets divers, 228 (voy. RADIATIONS).
- R. sonore**, I, 532.
- R. visuel**, IV, 42.
- R. de l'aurore boréale**, III, 300; — *crépulesculaires*, IV, 325.
- R. efficaces**, de l'arc-en-ciel, IV, 329; — des halos, 341.
- R. de courbure des miroirs sphériques**, IV, 81; de la surface des lentilles, I, 29.
- R. ordinaire et extraordinaire** dans la double réfraction, IV, 529.
- Rayonnement**, dans l'œil, IV, 373.
- Rayonnement** de la chaleur, dans le vide, II, 43; — apparent du froid, 44.
- R. particulière**, 94, 128, 143; chaleur diffuse, II, 77.
- R. nocturne**, effets, II, 644; causes qui le modifient, 647.
- Réaction**, égale à l'action, I, 64.
- R. des liquides qui s'écoulent**, I, 208; des gaz, 394; de la vapeur, II, 426.
- R. électrodynamique des plis d'une hélice**, III, 740 (voy. EXTRA-COURANT).
- Réchauffement**, II, 129, 138 (v. REFROIDISSEMENT).
- Recul des armes à feu**, I, 394.
- Rélecteur**, pouvoir, pour la chaleur, II, 97; — pour la lumière, IV, 44; du verre, 599; des métaux, 601, 675.
- Reflet**, IV, 42.
- Réflexibilité** des divers rayons simples, IV, 187.
- Réflexion de la chaleur**, lois, II, 46; diffuse, 51; — apparente du froid, 120.
- R. de la lumière**, lois, IV, 39 (voy. MINOIS).
- Expl. dans le syst. des ondes, 455; de l'émission, 472; polarise la lumière, 562.
- diffuse, fait voir les corps, IV, 41.
- R. totale**, IV, 95, 97, 604; expl. dans le système des ondes, 458; de l'émission, 474; — produit la polarisation elliptique, 671.
- R. de la lumière polarisée**, IV, 572; principes de Fresnel, 578; formules, 576;

- changement du plan de pol., 573, 578.
- R. du son, I, 547; lois, 550.
- Réfracteur, IV, 420 (voy. LUNETTE).
- Réfracteur interférentiel, IV, 460.
- Réfraction (*refringere*, briser), de la chaleur, II, 64; diff. réfrangibilité des rayons, 73.
- R. de la lumière, IV, 90; lois, 92; construction du rayon réfracté, 97; — réfraction diffuse, 99; — expl. dans le système des ondes, 456; de l'émission, 472; polarise la lumière, 583.
- R. atmosphérique, astronomique ou terrestre, IV, 400; tables de réfraction, 401.
- R. par une surface plane, IV, 409, 412 (voy. PRISME); — par une surface sphérique, 424; — image des objets intérieurs, 427; — surface donnant un foyer exact, 427 (voy. LENTILLES).
- R. de la lumière polarisée, IV, 588; théorie, 589; changement du plan de polarisation, 589, 578.
- R. double, IV, 528 (v. DOUBLE RÉFRACTION).
- R. conique intérieure, IV, 615; à l'émergence, 616.
- R. du son, I, 661.
- Réfractomètre, IV, 463.
- Réfrangibilité inégale des rayons colorés, IV, 485; des rayons de chaleur, II, 73.
- Refroidissement, loi de Newton, II, 87, 124; — expér. de Dulong et Petit, calcul de la vitesse de refr., 422; exp. et lois dans le vide, 426; dans les gaz, 429; — expér. nouvelles, 433, 439.
- Regel, II, 320.
- Règle d'Ampère, III, 339.
- R. de correction, alcométrique, I, 205; barométrique, 319; pour les gaz, II, 226;
- R. psychrométrique, II, 716.
- Régulateur du feu, II, 201, 255.
- R. à force centrifuge, 438; Molinié, 439; de l'air comprimé, II, 483; du vent, des souffleries, I, 572; — de la lumière électrique, III, 875; — des horloges, 865.
- Relai des télégraphes électriques, III, 825.
- Rendement d'une machine, I, 76; II, 589; des mach. à vapeur, 449.
- Renversement de la vapeur, II, 437, 476; — des courants, III, 667.
- R. du spectre, IV, 256.
- Répétition (*méthode de*), I, 37.
- Repos, absolu ou relatif, I, 51.
- Répulsion moléculaire, 152, 158.
- R. magnétique, III, 10; électrique, 103, 111 (v. ATTRACTION).
- Réseaux, parallèles, IV, 496; lois, 497; — irréguliers, 500; à mailles non linéaires; par réflexion, 501.
- Réservoir, mesure de la capacité par rapport à celles d'une division du tube, I, 299.
- R. commun de l'électricité, III, 404.
- Résistance des fluides, I, 52; — de l'air à la chute des corps, 99.
- R. absolue des solides, I, 476; des chaudières, calcul, 479; — relative, I, 484; des tubes, 484; transverse, 485.
- R. des fils métalliques à la décharge, III, 225; aux courants, 447, 576; des colonnes liquides, 578; des soudures, 448; au passage, 609; — unités de résistance électrique, 596; caisses de résistance, 595.
- Résonance, I, 554; multiple, 614, 666; des colonnes d'air, 639.
- Résonateurs, I, 580.
- Ressorts des montres, pendules, I, 469.
- Résultante d'un système de forces, I, 67.
- Réticule, I, 23, et IV, 416, 421.
- Rétine, IV, 351; structure, 368; sensibilité, 369, 371.
- Retrait de l'argile, II, 477; application au pyromètre, 38.
- Rhéélectromètre, III, 575.
- Rhéomètre (*ῥέος, courant; μέτρον*), III, 340, 567; à fléau, 341; sensibilité, 568; tables, 569; — différentiel, 341, 569; boussole des sinus, 570; des tangentes, 571; — magnétomètre électrique, balance électromagnétique; 574; — appl. des formules d'Ohm au rhéomètre, 583.
- Rhéophores (*ῥέος, ἔξω, porter*), de la pile, III, 326.
- Rhéostat, III, 593; unité de résistance, 596, 579.

Rhéotrope (ῥέος, τρέπω, tourner), IV, 719.

Rhéotome (ῥέος, τομή, action de couper), III, 759; à mercure, 765.

Rivières (température des), II, 658.

Robinet à cuvette, I, 513; — à quatre voies, 177; des mach. à vapeur, II, 436; de la machine pneumatique, I, 360; à double épaissement, 361.

Rose des vents, II, 674; barométrique, 668; thermométrique, 692.

Rosée, II, 719; théorie de Wells, 721; expér. de Melloni, 724.

Rotation d'un courant par un courant, III, 678, 680, 681; par la terre, 691; — par un aimant, 701; d'un aimant par un courant, 703; des liquides par les aimants, 705, 706; dans les aimants creux, 708.

R. du plan de polarisation, par le quartz, IV, 689; lois, 690; mesure de la déviation, 693; — divers solides, 700; rayons calorifiques, 704.

— théorie de Fresnel, IV, 701; décomposition d'un polarisé en deux circulaires inverses, 702; double réfr. circulaire du quartz, 704; cause première de la rotation, 705; pouvoir rotatoire des liquides, 706; des vapeurs, 713; pour la chaleur, 709 (voy. POLARISATION).

R. de la terre prouvée par le pendule, I, 122; par le gyroscope, 124; — influence sur la pesanteur, 129.

R. du vent (loi de), II, 690.

Roue de Barlow, III, 703; à réaction, I, 209; dentée de Savart, I, 518, 570.

Roulement du tonnerre, III, 244.

Rupture par tension, I, 476; par flexion, 482; tubes, 484; par torsion, 486.

S

Saccharimètre (σάκχαρον, sucre; μέτρον), de Soleil, IV, 719; à pénombre, 720; divers, 722.

Saccharimétrie rotatoire, IV, 718.

Saisons météorologiques, II, 626.

Salles de réunion. conditions acoustiques, I, 555.

Sang artériel et veineux, température comparée, II, 512.

Saturation des aimants, III, 35; des électro-aimants, 651.

S. des dissolutions, II, 327; — des vapeurs, 356, 358.

Sautriot, I, 96.

Scintillation des étoiles, IV, 321, 454; pronostics qu'on en tire, II, 747; IV, 323.

Scintillomètre, IV, 322.

Section principale des cristaux, IV, 532; des biauxes, 546.

Sélénium, action de la lumière, III, 601; IV, 308.

Sel gemme, est très-diathermane, II, 58; est anthermo-chroïque, 69.

Sels, dissolution, II, 327; chaleur spécifique, état de l'eau combinée, 276; chaleur dégagée dans leur formation, II, 568; — décomposition par la décharge, III, 236; par les courants, 338, 483.

Serein, II, 730.

Sextant, IV, 51.

Sidéroscopie (σίδηρος, fer; σκοπέω, regarder), III, 888.

Sidérostat, III, 69.

Sifflet, I, 615; à vapeur, 646; d'alarme des chaudières, II, 460; électro-automoteur, III, 852.

Simoun (samum, en arabe, vénénéux), vent des déserts, II, 692; III, 268.

Siphon (σίφων, tube), I, 387; applications, 390.

Sirène acoustique, I, 570; universelle, 572; double, 573. — Électromagnétique, III, 648.

Sirocco, Solano, vents, II, 693.

Soleil, constitution, II, 489, 609; atmosphère, 491; température à la surface, 502; en différents points, 505 (voy. CHALEUR SOLAIRE).

— lumière, IV, 601; — analyse spectrale, IV, 261; protubérances, 264; taches, II, 490; IV, 260 — entretien de l'énergie, II, 608; apparences à l'horizon, IV, 103; — faux soleils, 339, 347.

- Solénoïdes**, propriétés, III, 698; résultats du calcul, 699.
- Solides**, structure, I, 444 (voy. STRUCTURE), théorie thermodynamique, II, 593.
- Solidification** des liquides, II, 312; surfusion, 312, 314; influence de la pression, 317; chang. de volume, 321, 323.
- des sels dissous, II, 328; — des gaz, 386.
- Sommier** de l'orgue, I, 649.
- Son**, sa cause, I, 511; propagation dans une colonne cylindrique, 523; dans un milieu indéfini, 530; — vitesse des molécules, 526; de propagation, 527, 532 (voy. VITESSE); appareils de démonstration, 529.
- limite des sons perceptibles, I, 577; de durée, 600.
- intensité, I, 563; loi des distances, 564; — influence du vent, 566; intensité pendant la nuit, 567.
- hauteur ou ton, I, 569; timbre, 578.
- rapport des sons, gamme, I, 584.
- S. harmoniques**, 592; rôle dans les accords, 605; résultant, 603.
- S. produits** par les courants, III, 663; dans les fils télégraphiques, 666.
- Sonde** électrique, III, 445.
- Sonomètre**, I, 588, 660 (voy. MONOCORDE).
- Soubresauts** (ébullition), II, 374.
- Soudures**, s'échauffent par les courants, III, 448; froid produit, lois de l'échauffement, 449.
- Soufflerie acoustique**, I, 623; régulateur du vent, 572.
- Soufflet**, I, 402, 403.
- Soufre**, particularités de la fusion, II, 316.
- Soupape de sûreté**, II, 365, 457.
- S. électrique**, III, 778.
- Sources** (température des), II, 652.
- Sources, de chaleur**, II, 8, 488; permanentes; Soleil, II, 489 (voy. SOLEIL); chaleur propre du globe, 506 (voy. TERRE).
- physiologiques; animaux, 514, 515; végétaux, 317.
- Artificielles, actions mécaniques, 519, applications de la chaleur du frottement, 523; — compression, 525; id. des gaz, 527, 531; — condensation dans les solides poreux, 536. — chaleur de capillarité, 526.
- actions chimiques, combustion, II, 539; flamme, 541 (voy. FLAMME); — mesure de la chaleur chimique, 552; cas des décompositions, etc., 564; par voie humide, 566; lois, 555, 572; applications, 573.
- Chaleur par induction magnéto-électrique, III, 757.
- S. de froid**, expansion des gaz, II, 528; évaporation, 351; mélanges réfrig., 332.
- S. d'électricité**, frottement, III, 97, 307 (voy. FROTEMENT); pression, 316; clivage, exfoliation, ébranlement direct des molécules, 318; vibrations, 319.
- actions chimiques, III, 321, 343; combustion, 344; réactions des dissolutions, 347; décompositions, 350; liquides sur métaux, 351; — le métal le plus attaqué s'électrise négativement, 353.
- par chaleur, III, 391, 396 (voy. PYRO-ÉLECTRICITÉ, THERMO-ÉLECTRICITÉ), — par induction, III, 757.
- physiologiques, III, 417 (voy. ÉLECTRICITÉ PHYSIOLOGIQUE).
- S. de lumière**, IV, 5; — ordre de succession des rayons colorés, II, 85; IV, 471.
- Spath d'Islande**, IV, 529.
- Spectre** impalpable, IV, 49.
- Spectre** magnétique, III, 31.
- Spectre** solaire, IV, 181; moyen de l'avoir pur, 193; théorie de Newton, 184; système de Brewster, 200.
- propriétés, 228; propriétés éclairantes, 229; raies, 230; renversement, 256; des vapeurs, 239; des combinaisons, 252; des métalloïdes, 253.
- S. anormal**, IV, 229.
- S. chimique**, IV, 270; rayons excitateurs, continuatateurs, 271; absorption des radiations chimiques par les milieux, 273.
- S. phosphorogénique**, IV, 297; raies, 299.
- S. calorifique**, II, 73 (voy. THERMOCHOSE), raies, IV, 240.
- Spectronatromètre**, IV, 250.
- Spectroscopes**, IV, 242.
- Spectroscopie** sidérable, IV, 256; solaire, 261; stellaire, 263; nébuleuses, planètes, comètes, 265.

- Sphéromètre** (σφαίρα, sphère; μέτρον, mesure), I, 28.
- Spirales d'Airy**, IV, 699.
- Statique** (στάσις, se tenir), I, 62.
- Stéphanomètre** (στέφανος, couronne; μέτρον), IV, 507.
- Stéromètre** (στερόμος, solide; μέτρον), pour les volumes, I, 353.
- Stéréoscope** (στερέος, σκοπέω, regarder), IV, 390; microscope-stéréoscope, 414.
- Stratification de la lumière électrique**, III, 473, 774; cause, 777; usage, 780.
- Stroboscope** (στρόβος, tournoiement), IV, 377.
- Structure des solides**, I, 444; régulière, 444; irrégulière, 452; organique, 453; — changements avec le temps, 398; par la chaleur, par les vibrations, 499; chaleur dégagée, influence sur la capacité calorifique, II, 566.
- Stuffing-box**, I, 468.
- Sublimation**, II, 350.
- Succion dans les ajutages**, I, 228.
- Sucre**, pouvoir rotatoire, IV, 748; inversé, 749.
- Surface courbe réfringente**, IV, 124; aplanétique, 127.
- S.** d'élasticité des cristaux, IV, 606.
- S.** de l'onde, I, 531; dans les biréfringents, IV, 540, 611; isochromatique, 651; isotherme, II, 465.
- Surfusion**, II, 314; des liquides en suspension, 314.
- Suspension de Cardan**, I, 317.
- S.** (mirage), IV, 408.
- Sylvine**, est athermochrone, IV, 229.
- Sympiezomètre** (συμπιέζω, comprimer; μέτρον), II, 252.
- Synthèse des sons**, I, 683; voyelles, 744.
- Système**, ce que c'est, I, 17; des ondulations, pour la chaleur, II, 10, 81; pour la lumière, IV, 4, 441; de l'émission, II, 10, et IV, 472.
- T**
- Table d'Ampère**, simplifiée, III, 671.
- Tables de graduation du thermo-multi-**
- plieur**, II, 35; — *hygrométriques*, construction, 705; — de réfraction atmosphériques, IV, 404, etc.
- Tabouret isolant**, III, 123.
- Taches du soleil**, II, 489; étude spectroscopique, IV, 260.
- Tambour musical**, I, 697.
- Tam-Tam**, I, 693.
- Tate-vin**, I, 330.
- Taumatrope** (τύμος, coupé; τρέπω, tourner), IV, 376.
- Tautochrone** (ταυτό, le même; χρόνος, temps), I, 409.
- Teinte sensible de la lumière polarisée**, IV, 625; du verre comprimé, 640; dans la polarisation rotatoire, 692; applic. aux polariscopes, 695, 698.
- Télégraphe électrique**, historique, III, 810; à aiguilles, 813; à cadran, 816.
- T. enregistreurs**, de Morse, 823; rapide de Wheatstone, 827.
- T. électrochimique**, III, 831; transmettant deux dépêches en sens inverse, 830.
- T. autographique**, III, 832; de Meyer, 839.
- T. imprimant**, d'Hughes, III, 835; divers, 841.
- T. circuits de transmission**, III, 842; fils aériens, 843; sous-marins, 847.
- T. applications**, III, 851; à la sécurité des chemins de fer, 854.
- Téléiconographe**, IV, 429.
- Téléomètre** (τῆλε, loin; μέτρον), IV, 329.
- Téléphone**, III, 854, 855; avec pile, 857;
- Télescope**, (τῆλε, loin; σκοπέω regarder), de réfraction, IV, 420 (voy. LUNETTE).
- T. de réflexion ou catoptrique**, IV, 433; de Newton, 433; de Grégory, 434; de Cassegrain, 435; grands télescopes, 435; à miroir de verre argenté, 437.
- Télespectroscope**, IV, 259,
- Télestéréoscope**, IV, 393.
- Tempérament musical**, I, 594.
- Température**, définition, II, 11, 590; mesure, 13 (voy. THERMOMÈTRE).
- de l'air en un même lieu, II, 622; moyenne, diurne, mensuelle, 623, 625; à différentes latitudes, lignes isothermes, 627; sur un même méridien, 629; moyennes hivernales, estivales, 630.

- T. de l'hémisphère austral, II, 631; extrêmes, 631.
- à différentes hauteurs, II, 635; décroissement, relation avec la pression, 636; — influences diverses, 639.
- T. des mers, II, 652; causes qui la modifient, 651.
- des lacs, rivières, II, 658.
- du sol à différentes profondeurs, II, 649; couche invariable, 651; donne la moyenne du lieu, 652.
- des caves, II, 651; des mines, 506; des puits artésiens, 507; des sources, 652; des vents, 609.
- T. des espaces planétaires, II, 643.
- T. des animaux, II, 511, 513; des végétaux, 517.
- Tempêtes, action sur le baromètre, I, 324; II, 697; d'Europe (origine), 698; — action sur l'aiguille aimantée, III, 92; II, 747.
- T. magnétiques, III, 91.
- Temps, I, 2; mesure, 34.
- Ténacité, lois, I, 476; résistance des vases, 479.
- Tension superficielle des liquides, I, 270; — de l'électricité statique, III, 146.
- T. de l'élect. dynamique dans un circuit, 588; dans une plaque, 590.
- des vapeurs, II, 393. (voy. VAPEUR).
- Terre, forme, I, 126; densité, 143; formation, II, 508, — chaleur propre, 506; état actuel, 509.
- rotation prouvée par la chute des corps, I, 91; par le pendule, 122; par le gyroscope, 124.
- action sur les aimants, III, 17; sur le fer, 20; l'action n'est que directrice, 21; mesure de l'intensité, 74.
- action sur les courants, III, 689; courants terrestres, 690, 693, 758; complète les circuits télégraphiques, 844.
- T. produit la polarisation rotatoire magnétique, IV, 741.
- Théâtre électrique, III, 115.
- Théodolite (θεόδομη, regarder; δολιχός, distant), I, 24. Th. magnétique, III, 61, 62.
- Théorie physique, I, 16 (voy. SYSTÈME).
- Thermobaromètre, II, 336.
- Thermochimie, II, 538 (voy. SOURCES DE CHALEUR); théorie, 593.
- Thermochrose (θερμοχρω, chaleur; χρωάζω, colorer), II, 65, 68; différente réfrangibilité des rayons calorifiques, 73.
- T. de l'air, II, 498; — des corps par réflexion diffuse, 77.
- Thermodynamique, II, 576; chaleur par dépense de travail, 578; travail par dépense de chaleur, 580; équivalent mécanique de la chaleur, 581; mesures, 582.
- Théorie mécanique de la chaleur, 588.
- Théorie des solides et liquides, 593; des gaz, 593; gaz réels et parfaits, travail intérieur, 602; travail musculaire, 605; entretien de l'énergie solaire, 608.
- Thermo-électricité, III, 396; — loi relative à la température, 397; — pouvoirs thermo-électr., 399; — piles, 403; comparaison aux cristaux pyro-électr., 406; — générateurs thermo-électriques, 404.
- courant dans un circuit d'un seul métal, influence de la structure, III, 407; — cause des courants thermo-électr., III, 411; — applic. à la thermométrie, II, 32; III, 314 (voy. THERMO-MULTIPLICATEUR).
- Thermogène (appareil), II, 523.
- Thermographie, IV, 297.
- Thermo-manomètre, II, 459.
- Thermomètre (θερμη, chaleur; μέτρον, mesure), II, 43; construction du T. à mercure, 44; — graduation, 45, 48.
- T. de précision, II, 49; influence du verre, 23; limites, 25; sensibilité, 27.
- à poids, I, 22; — à réservoir intermédiaire, 25; métastatique, 28.
- T. à alcool, II, 25; comparaison des th., 26; — th. pour les bases temp., 27; compar. au th. à air, 239, 242.
- T. à air, II, 29; différentiel, 29, 227; histoire du thermomètre, 31.
- métallique, 199; de Borda, 200.
- barométrique, ou hypsomètre, II, 367.
- de météorologie, installation, II, 622; à maximum et minimum, de Rutherford, de Six-Bellani, 614; — à déversement, 617; — enregistreur, à pointage, 619; photographique, 620.

- T. de Fourier, ou de contact, II, 144.
- T. *électrique*, de Riess, III, 226; inscripteur, 229; de Kinnersley, 119; thermo-électrique, 414.
- Thermométrographe**, II, 615, 619.
- Thermomultiplicateur**, II, 32; tables de graduation, 35; d'impulsion, 36.
- comparaison au th. à mercure, III, 445.
- Thermoscope de Rbumford**, II, 30.
- Timbales**, I, 697.
- Timbre du son**, I, 522, 578; de la voix, 742; des voyelles, 744.
- Timbres, cloches**, I, 693.
- T. de Savart, 635.
- Tirage des cheminées**, II, 253.
- Tiroir des mach. à vapeur**, II, 435.
- Toiles métalliques**, action sur la flamme, II, 542; applications, 543, 544.
- Ton**, ou hauteur d'un son, I, 569, 590; — des couleurs, IV, 213.
- Tonneau de Pascal**, I, 176.
- Tonomètre**, I, 603.
- Tonnerre**, III, 239; roulement, 244; dans les nuages des volcans, 271; en boule, 253, 285, 476.
- Tornado**, II, 693; III, 267.
- Torpille**, III, 418; organe électrique, 420.
- Tourmaline**, comme polariscope, IV, 553, 592, 655; pince à tourmalines, 642; — est *pyro-électrique*, III, 391.
- Tourniquet électrique**, III, 457; — hydraulique, I, 208; à vapeur, II, 426; de Clarke, III, 649.
- Trajectoire des projectiles**, I, 106.
- Translateur des télégr. électr.**, III, 825.
- Translucidité**, IV, 13, 99.
- Transparence**, IV, 13.
- Transport des liquides par les courants**, III, 476; lois, 477.
- des éléments aux électrodes, III, 488; théorie de Grothuss, 337, 490; des particules dans l'arc voltaïque, 464. — par la décharge, 236; de corps par choc latéral, 234, 249.
- Travail d'une force**, I, 73; relation avec la chaleur, II, 584; — des machines à vapeur, 446; — des muscles, et chaleur animale, II, 605.
- T. de l'électricité convertie en chaleur, III, 459; — chimique dans la pile, 462, 509.
- Tremblements de terre**, II, 509; rencontre des deux ondes qui les propagent, I, 722.
- Trembleur collaïque**, III, 760.
- Trempe de l'acier**, I, 491; influence sur les aimants, III, 42; — du bronze, du verre, I, 493; verre résistant, 496; — couleurs dans la lumière polarisée, IV, 633.
- Triangle musical**, I, 681.
- Trièuse électromagnétique**, III, 873.
- Triprisme de Fresnel**, IV, 704.
- Trombe**, III, 280, 282; théorie, 284.
- Trompes hydrauliques**, I, 229.
- Trop-plein**, I, 213.
- Tube acoustique**, I, 565; — de Holtz, III, 779; de Kundt, I, 704; de Mariotte, 334; de Newton, 99; de sûreté, 331; de Torricelli, 311; etc.
- T. étincelant, III, 210; — de Geissler, 214, 775.
- T. *fulminaires*, III, 248.
- Tubes capillaires**, I, 251 (*voy. CAPILLARITÉ*).
- écoulement (par les), I, 234, vitesse d'ascension, 287.
- Tumeurs**, enlevées par des fils incandescents par les courants, III, 446.
- Turbine électrique**, III, 158.
- Tuyaux de conduite**, I, 222; pour les gaz, vitesse, 400.
- T. *sonores*, lois de Bernouilli, I, 617; — bouchés, I, 617; ouverts, 624; vérifications par l'expér., 624; à anche, 643; lois empiriques, 633.
- Typhon** (τῶνος, *vapeur*), II, 694.

U

- Udomètre** (ὄδιον, *eau*; μέτρον), II, 735.
- Uniaxes (cristaux)**, IV, 529.
- Unipolarité des flammes**, III, 494.
- Unités**, diverses relatives à l'électricité, III, 596, 632.
- Universalité du magnétisme**, III, 887, 889 (*voy. DIAMAGNÉTISME*).
- Uredo nivealis** (neige rouge), II, 732.

V

- Vapeur**, formation dans le vide, II, 355; froid produit, 351; dans les gaz, 357; loi, 358; précipitation dans l'air, 360; problème des vapeurs, 361; propriétés physiques, 393.
- mesure des tensions, II, 393; cas des hautes pressions, 394, 400; liquides autres que l'eau, 402; liq. mélangés, 404.
 - *chaleur latente*, II, 405; sous diff. pressions, 406; formules, 410; — liquides divers, 412; gaz liquéfiés, 413.
 - *densité*, II, 416; sous diff. pressions, 420; dans l'air saturé, 422; à de très-hautes températures, 418; — rapport du volume à celui d'un même poids de liquide, 425.
 - *indice de réfraction*, IV, 477, 463.
- V. moteurs**, II, 426 (voy. MACHINES).
- V. jet**, produit de l'électricité, III, 426; machines hydro-électriques, 427.
- V. organiques** qui font tourner le plan de polarisation, IV, 713; pouvoir magnéto-rotatoire, 736.
- Vapeur vésiculaire**, II, 724.
- Vaporisation**, II, 318 (voy. ÉBULLITION).
- Variations**, du baromètre, II, 660 (voy. BAROMÈTRE).
- V. de l'aiguille aimantée**, III, 78, 85, 88; irrégulières, 90; explication, 95.
- V. de la température**, diurnes, II, 622 (voy. TEMPÉRATURE).
- Vases, communicants**, I, 178; de lentale ou diabète (*δix-βυνο*, *traverser*), 391.
- mesure de la capacité, I, 206; variation par compression, 461; par dilatation, II, 186; — résistance, I, 479.
 - influence sur l'ébullition, II, 373.
 - *de révolution*; vibrations, I, 692.
- Végétaux**, produisent de la *chaleur*, II, 517; de l'électricité, III, 427; — action de l'électricité, 297; des courants, 443.
- Veine liquide**, contraction, I, 214; constitution, 230; cause de la division, 232; des oscillations, 235, 237.
- choc contre un disque, I, 239; — de deux veines opposées, 246.
- V. éclairée intérieurement**, IV, 57.
- Veine gazeuse**, I, 395; contraction, 399; adhésion, 396.
- Vents**, II, 670; direction, 674; moyenne direction, 673; vitesse, 674; cause, 683; propagation, 684 (voy. ANÉMOMÈTRE).
- périodiques, *brises, moussons*, II, 685; étésiens, 686; réguliers, alizés, 687.
 - irréguliers, 689; loi de rotation, 690.
 - caractères physiques, II, 691; — dans les déserts, 692; origine, III, 268; ouragans, cyclones, II, 693; III, 267.
- V. électrique**, III, 159.
- Ventilateur à force centrifuge**, I, 85.
- Ventouse**, I, 329.
- Ventre de vibrations**, I, 647; positions, dans les tuyaux sonores, 624.
- Verges élastiques**, vibrations transversales, lois, 672; lignes nodales, 673.
- *courbes*, diapason, 678; anneau, 681.
 - vibrations longitudinales, I, 698.
- Verglas** (*viridis glacies*, glace vive), II, 732.
- Vernier**, I, 20; appl. aux arcs, 22.
- Verre**, dilatation, II, 190; influence sur le thermomètre, 40; trempe, I, 493; — résistant par trempe chaude, 496.
- V. double réfraction accidentelle**, IV, 633.
- Verre-ardent**, II, 63.
- Verticale**, I, 91.
- Vessie dans le vide**, I, 44; natatoire des poissons, I, 187.
- Vibrations sonores**, I, 510; manières de faire vibrer l'air, 517; coexistence des vibrations, 530; — mesure du nombre, I, 569; méthodes graphiques, 573; au moyen des rapports de la gamme, 592; par les battements, 603; — comparaison optique, 607.
- V. communicées**, I, 722 (v. COMMUNICATION).
- V. des gaz**, I, 614 (voy. GAZ).
- *des liquides*, I, 653; dans la veine, 230, 236 (voy. VEINE LIQUIDE).
 - *des solides*, transversales, I, 658; des cordes, 659 (voy. CORDES).
 - des verges élastiques, I, 672 (v. VERGES).
 - *des plaques*, 681 (voy. PLAQUES).
 - des vases de révolution, 692; des membranes, 694.

- V. *longitudinales*; lois, I, 698; relation avec les vibrations transversales, 700, 708; des cordes, 700; — *lignes nodales*, 703, 705; disposition, 707.
- V. des corps à trois dimensions comparables, I, 712; loi générale, 742.
- V. *tournantes*, I, 709.
- V., applications à l'étude de l'élasticité, I, 713 (voy. Élasticité).
- V. dégagent de la chaleur, II, 524; de l'électricité, III, 319.
- Vibrations lumineuses**, sont perpendiculaires au rayon, IV, 556; au plan de polarisation, 558; — origine et propagation, 560.
- Vibroscope**, I, 573.
- Vide de Torricelli, I, 367; de Boyle, 370, — est isolant pour l'électricité, III, 217.
- Violon, I, 668; trapézoïde, 674.
- Vis micrométrique, I, 27.
- Viscosité des liquides, I, 460; maximum et minimum, 244.
- Vision (*principe de la*), IV, 44; appareil, 349 (voy. Œil); mécanisme, 352; conditions de netteté, 356; ajustement de l'œil, 358, 364; sensibilité de la rétine, 368; durée de l'impression, 373.
- rapport du jugement à la sensation, 379.
- V. *binoculaire*, 380.
- jugement de la distance, 384; de la grandeur, 385; de la forme, 387; influence des deux yeux, 389; — des couleurs, 395; couleurs accidentelles, 395.
- V. aidée des instruments gross., IV, 401.
- Vitesse dans le mouvement uniforme, I, 54; dans le mouvement varié, 55.
- V. *virtuelles* (principe des), I, 76.
- V. d'écoulement des liquides, I, 210; — des gaz, 397; dans le vide, 398; dans les tuyaux, 400.
- V. de la chaleur, II, 45.
- V. de l'électricité, III, 560; dans les fils télégraphiques, 563, 565; influence de l'état variable, 566.
- V. de la lumière, méthode de Rømer, IV, 47; au moyen de l'aberration, 49; méthode de M. Fizeau, 20, 22; de Foucault, 476; — est moindre dans le milieu le plus réfr., 458; preuve directe, 477.
- V. du refroidissement, II, 121 (voy. Refroidissement).
- V. du son, I, 527, 532; formule de Newton, 533; comparaison avec l'expérience, 535; expériences de Regnault, 537; mesure par les tuyaux sonores, 628; — dans les liquides, 544; dans l'eau, 545, 636; — dans les solides, 546, 701; relation entre la vitesse dans une colonne et dans un espace indéfini, 463, 703.
- Vitres, se couvrent en dedans d'humidité, II, 721; de givre, 723; en glace, 339.
- Voix, organe, I, 738; mécanisme, 739; étendue, timbre, 742; voyelles, 744.
- Voltamètre, III, 337, 480; à poids, 508; anomalies, 519; détonations, 521; théorie nouvelle, 517.
- Volumes, mesure, I, 206; d'un vase, 206.
- Voluménomètre, I, 354.
- Volumètre, I, 203.
- Voyelles, I, 743; timbre, 744.
- Vue portée, IV, 358; défauts, 363.

X, Y, Z

- Xylophotographie (ξύλον, bois), IV, 288.
- Zéro du thermomètre, II, 15; déplacement, 24.
- Zéro absolu, II, 428, 342, 597.
- Zinc, distillé, propriétés électro-chimiques, III, 362; amalgamé, 363, 631.
- Zones isothermes, II, 630.
- Z. des pluies, II, 739.

VERIFICAT
1987

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE ET ANALYTIQUE

Toulouse. — Imprimerie de Louis P. G. 11, rue Tréfilerie, 9.

