570. **Achromatopsie** ou **Daltonisme.** — On nomme *achromatopsie* une affection singulière qui nous rend incapables de juger des couleurs, ou du moins de certaines couleurs. Chez quelques personnes, en effet, l'insensibilité est complète, tandis que d'autres apprécient quelques couleurs. Les personnes atteintes de cette affection distinguent très bien les contours des corps, les parties claires ou dans l'ombre, mais elles n'en distinguent pas les teintes.

On désigne aussi l'achromatopsie sous le nom de *daltonisme*, parce que Dalton, qui a décrit avec soin cette infirmité, en était atteint.

571. **Ophthalmoscope.** — L'*Ophthalmoscope*[1] est un instrument destiné à examiner l'œil.

1° *Description.* — Il se compose : 1° d'un réflecteur sphérique concave M, de verre ou de métal (fig. 624 et 625), d'une distance focale de 20 à 25 centimè-

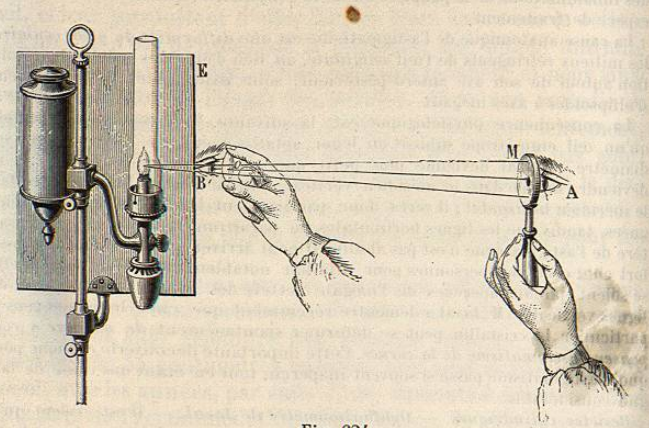

Fig. 624.

tres, et percé à son centre d'un trou de 2 millimètres de diamètre; 2° d'une lentille convergente achromatique *o*, qu'on maintient devant l'œil qu'on veut explorer; 3° de plusieurs lentilles, les unes divergentes, les autres convergentes,

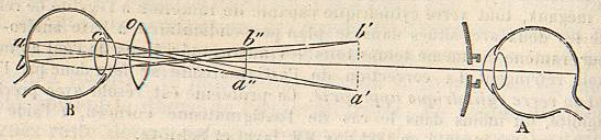

Fig. 625.

qu'on fixe par une pince derrière le miroir, afin de corriger au besoin la vue de l'observateur, s'il est myope ou presbyte. Le réflecteur M est percé d'un trou à son centre quand il est métallique; mais s'il est de verre, on enlève seulement à la partie centrale la couche de tain qui recouvre la face postérieure.

1. L'ophthalmoscope, inventé par M. Helmholtz, est décrit en détail dans son *Optique physiologique* : nous renvoyons à ce beau livre pour tout ce qui concerne la vision.

2° *Usage.* — Pour se servir de l'ophthalmoscope, on place le sujet dans une chambre obscure, et l'on met à côté de lui une lampe dont le pied porte un écran E, destiné à arrêter la lumière du côté de la tête du sujet et à la maintenir dans l'obscurité.

L'observateur, tenant alors d'une main le réflecteur M, le dirige de manière à concentrer vers l'œil B du sujet la lumière envoyée par la lampe, tandis que de l'autre main il maintient devant l'œil la lentille *o*. Par ce dispositif, le fond de l'œil se trouvant fortement éclairé, on en distingue très bien les lésions.

La figure 625 indique une expérience faite dans le cas d'un œil myope. Soit d'abord le cas où la lentille *o* n'est pas maintenue devant l'œil B : les rayons qui éclairent le fond de l'œil étant renvoyés vers le cristallin *c*, le traversent en se réfractant comme dans une lentille et vont former en *a'b'* une image aérienne, réelle et renversée de la partie *ab* du fond de l'œil. C'est cette image que l'observateur voit par le trou du miroir. Si l'on interpose la lentille *o*, les rayons se réfractant de nouveau en la traversant, l'image va se former en *a''b''*, plus près de l'œil malade et par suite, plus étendue et plus facile à observer.

CHAPITRE XII

NOTIONS D'OPTIQUE PHYSIQUE

—

DOUBLE RÉFRACTION. — INTERFÉRENCES. — POLARISATION.

DOUBLE RÉFRACTION.

572. **Définitions. — Préliminaires.** — On a déjà vu (438) que la *double réfraction* est la propriété que possèdent un grand nombre de cristaux, dits *biréfringents*, de donner deux rayons réfractés pour un seul rayon incident; d'où il résulte que lorsqu'on regarde un objet à travers un cristal biréfringent, on en voit une double image (fig. 626).

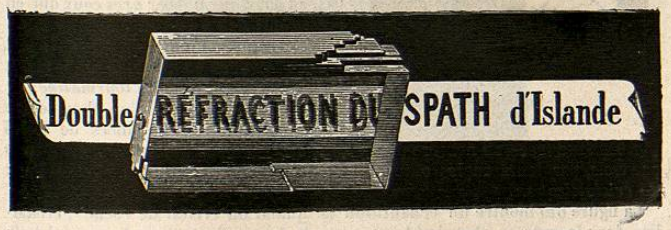

Fig. 626.

La double réfraction fut observée pour la première fois par Bartholin, en 1647; mais c'est Huygens qui le premier, en 1673, en donna une théorie complète.

Cette propriété s'observe, à des degrés inégaux, dans tous les cristaux qui n'appartiennent point au système cubique. Au contraire, tous les corps cristal-

lisés dans ce dernier système, et toutes les substances amorphes, comme le verre, ne possèdent pas la double réfraction. Cependant ils peuvent l'acquérir accidentellement, soit par la *trempe*, soit par une compression dissymétrique.

Les liquides et les gaz ne sont jamais biréfringents.

De toutes les substances, celle qui présente le phénomène de la double réfraction de la manière la plus apparente est le spath d'Islande. Les figures 626 et 627 en montrent des échantillons.

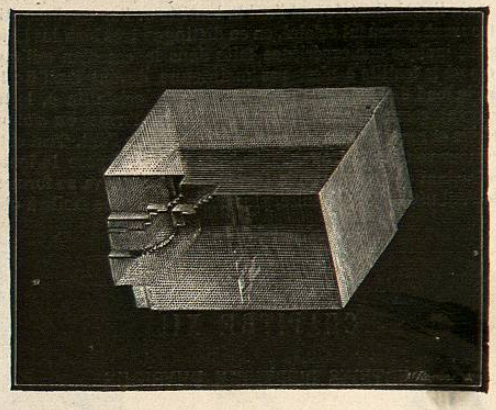

Fig. 627.

573. **Cristaux à un axe.** — Dans un cristal biréfringent, il y a toujours *une* ou *deux* directions suivant lesquelles on n'observe que la réfraction simple, c'est-à-dire suivant lesquelles on ne voit qu'une seule image des objets. Ces directions s'appellent *axes optiques* du cristal.

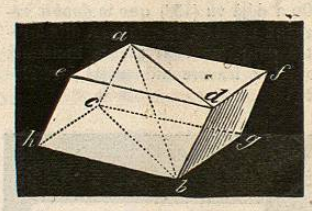

Fig. 628.

On nomme *cristaux à un axe* ceux qui ne présentent qu'une seule direction suivant laquelle la lumière ne se bifurque pas, et *cristaux à deux axes* ceux qui en présentent deux.

Les cristaux à un axe, dont l'emploi est le plus fréquent en optique, sont le *spath d'Islande*, le *quartz* et la *tourmaline*.

Le spath a la forme d'un rhomboèdre dont les faces sont inclinées de $105^{0},5$ (fig. 628). Les faces, au nombre de six, sont des rhombes qui se réunissent, trois par trois, par leurs angles obtus, aux extrémités d'une droite *ab* qui est l'*axe de cristallisation*.

La figure 629 montre un échantillon de quartz ou cristal de roche[1], cristallisé dans le système rhomboédrique, sous la forme d'un prisme hexagonal à six pans, surmonté de deux pyramides hexagonales. La ligne qui joint les deux sommets des pyramides extrêmes est l'*axe de cristallisation*.

1. Le *quartz* ou *cristal de roche* est de l'acide silicique (ou *silice*) parfaitement pur et cristallisé.

La figure 630 représente un échantillon de *tourmaline* telle qu'on la trouve en Sibérie. L'*axe de cristallisation* du cristal est parallèle à ses faces naturelles.

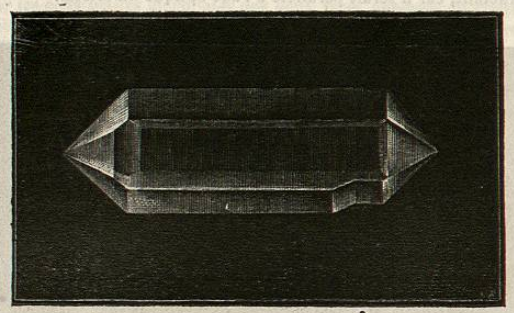

Fig. 629.

Cette substance est naturellement colorée en jaune brun, ce qui ne l'empêche pas d'être transparente.

Brewster a constaté cette loi générale que : *dans les cristaux à un axe, l'axe optique coïncide toujours avec l'axe de cristallisation*.

On nomme *section principale* d'un cristal à un axe tout plan perpendiculaire

Fig. 630.

à une face naturelle ou artificielle du cristal qui passe par l'axe optique du cristal ou lui est simplement parallèle. La figure 631 montre l'axe optique AA' d'un spath, et plusieurs sections principales telles que ABA'B'.

Tout rayon lumineux tombant sur le cristal, dans l'une quelconque de ses sections, se bifurque en deux rayons refractés. Au contraire, tout rayon lumi-

neux qui tomberait normalement sur une face artificielle telle que ABC (fig. 632) taillée perpendiculairement à l'axe optique NI, ne se bifurquerait pas en se réfractant, car il serait parallèle à l'axe optique du cristal.

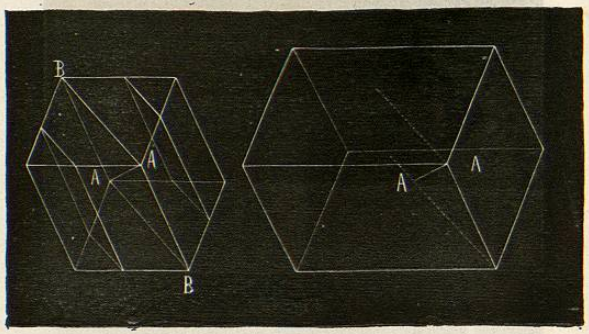

Fig. 631.

574. **Rayon ordinaire et rayon extraordinaire.** — Des deux rayons réfractés auxquels donnent naissance les cristaux à un axe, l'un suit toujours les lois de la réfraction imple (543), mais l'autre n'est généralement pas soumis à ces lois ; c'est-à-dire que, pour ce dernier rayon, le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction n'est pas constant, et que le plan de réfraction ne coïncide pas avec le plan d'incidence. Le premier de ces rayons est dit *rayon ordinaire*, et l'autre *rayon extraordinaire*. Les images qui leur correspondent se désignent elles-mêmes sous les noms d'*image ordinaire* et d'*image extraordinaire*.

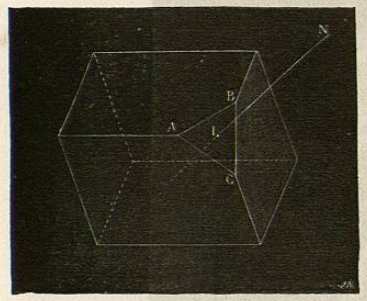

Fig. 632.

On peut mettre ce fait en évidence de deux manières :

1° On fait tomber un rayon lumineux sur un rhomboèdre de spath, et il en sort deux, qui vont marquer leurs traces en E et en D sur un écran (fig. 633). Quand on fait tourner le spath autour du rayon incident, l'un des rayons émergents reste immobile : c'est le *rayon ordinaire;* l'autre tourne en même temps que le cristal autour du premier rayon : c'est le *rayon extraordinaire*.

Supposons qu'à un instant donné les deux images se projettent sur une même ligne horizontale : si l'on projette alors la face du rhomboèdre, on voit que la petite diagonale de ce rhombe (ou losange) est aussi horizontale.

Tournons le spath de manière à amener les deux images sur une même ligne verticale et projetons encore une fois la face du rhomboèdre : nous retrouvons encore la petite diagonale en coïncidence avec la ligne des images (fig. 635).

Il en est de même dans tous les cas : *la ligne des images est toujours parallèle à la petite diagonale des faces traversées par la lumière.* Ce plan qui passe par les deux petites diagonales des deux faces opposées du cristal est précisément la *section principale* du rhomboèdre. Il mérite donc d'être signalé, puisqu'il contient toujours les deux rayons.

2° *Autre expérience de double réfraction.* — On prend un spath, dont la section principale est représentée par le parallélogramme *abcd* (fig. 634). On le pose sur un carton blanc et l'on regarde au travers un point noir *o* tracé sur le carton. Le rayon incident au point *o* se divise en deux rayons *oi* et *oe*, qui, se réfractant inégalement à l'émergence, donnent à l'œil deux images *o'* et *o''*.

Si l'on tourne le rhomboèdre sur lui-même en le tenant toujours appliqué sur le carton, une des images reste fixe, c'est l'*image ordinaire*, tandis que l'*image extraordinaire* tourne autour de la pre-

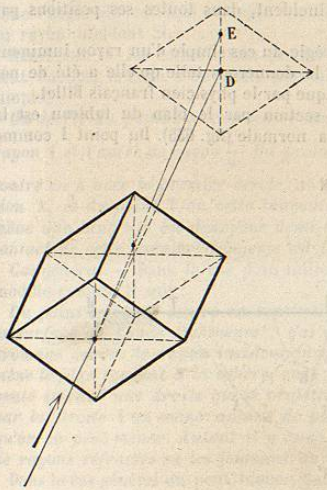

Fig. 633.

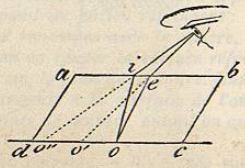

Fig. 634

mière. Cela prouve que le plan de ce dernier rayon réfrcté se déplace par rapport au plan d'incidence et, par suite, que le rayon extraordinaire ne suit pas les lois de la réfraction simple.

575. **Cristaux positifs et cristaux négatifs.** — Le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire ont des indices différents : dans certains cristaux, c'est l'indice du rayon ordinaire qui est le plus grand ; dans d'autres, c'est l'indice du rayon extraordinaire. Fresnel a nommé les premiers *cristaux négatifs*, et les derniers *cristaux positifs*.

Le spath d'Islande, la tourmaline, le saphir, le rubis, l'émeraude, le mica, le prussiate de potasse, le phosphate de chaux, sont *négatifs ;* le quartz, le zircon, la glace, l'apophyllite à un seul axe, sont *positifs*. La classe des cristaux négatifs est beaucoup plus nombreuse que celle des cristaux positifs.

576. **Lois de la double réfraction dans les cristaux à un axe.** — Le phénomène de la double réfraction dans les cristaux à un axe est soumis aux lois suivantes :

1° *Le rayon ordinaire, quel que soit son plan d'incidence, suit toujours les deux lois générales de la réfraction simple* (439).

2° *Dans toute section perpendiculaire à l'axe, le rayon extraordinaire suit aussi ces deux lois comme le rayon ordinaire, mais avec un indice de réfraction différent de l'indice ordinaire :* d'où la distinction d'un *indice ordinaire* et d'un *indice extraordinaire* pour les cristaux biréfrigérents.

3° *Dans toute section principale, le rayon extraordinaire ne suit que la*

seconde loi de Descartes, les plans d'incidence et de réfraction coïncident, mais le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction n'est pas constant.

577. **Construction des rayons réfractés : Règle d'Huygens.** — Huygens (qui le premier a donné une théorie complète de la double réfraction fondée sur le système des ondulations) a fait connaître une construction géométrique, dite *règle d'Huygens*, qui permet d'obtenir graphiquement les deux rayons réfractés, au moyen du rayon incident, dans toutes ses positions par rapport à l'axe.

Nous allons d'abord appliquer cette règle au cas simple d'un rayon lumineux qui subit la *réfraction simple*. Nous la donnerons telle qu'elle a été de nos jours simplifiée au point de vue graphique par le physicien français Billet.

Soient MM la surface réfringente (la section par le plan du tableau est la droite MM), SI le rayon incident, IN la normale (fig. 635). Du point I comme

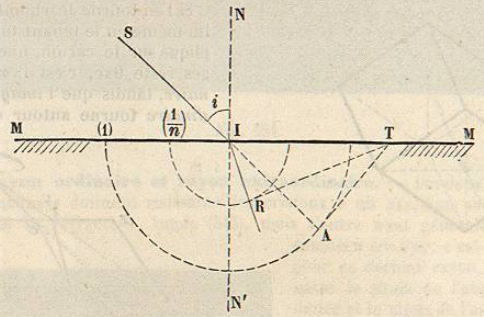

Fig. 635.

centre décrivons deux sphères concentriques, l'une de rayon égal à l'unité, l'autre à $\frac{1}{n}$, n étant l'indice de réfraction du milieu. (Ces deux sphères sont coupées par le plan de la figure suivant deux cercles concentriques A et B.) Prolongeons le rayon incident jusqu'à sa rencontre en A avec la sphère de rayon I, et menons en A le plan tangent à la sphère (ce plan tangent est coupé par le plan de la figure, suivant la ligne AT, tangente en A au cercle correspondant). Du point T, menons un plan tangent à la sphère de rayon $\frac{1}{n}$ (il est coupé par le plan de la figure suivant la ligne TB, tangente au cercle B). Enfin, joignons le point I au point de contact B : *la ligne* IB *est le rayon réfracté qui correspond au rayon incident* SI.

Pour le démontrer, il suffit de prouver que l'angle N'IB est bien identique à l'angle de réfraction r (qui est défini par la loi de Descartes $\frac{\sin i}{\sin r} = n$). Or dans le triangle rectangle ITB, qui est rectangle en B, l'angle aigu en T est égal à l'angle de réfraction BIN' et l'on a la relation

$$\text{IB}\left(\text{ou } \frac{1}{n}\right) = \text{IT} \sin \text{RIN}'.$$

Dans le triangle IAT, qui est rectangle en A, l'angle aigu en T est égal à l'angle

AIN' ou à l'angle i, et on a la relation

$$\text{IA (ou 1)} = \text{IT} \sin i.$$

En divisant ces deux équations membre à membre, il vient

$$\frac{\sin i}{\sin i \,.\, \text{RIN}'} = n;$$

donc l'angle BIN' est égal à l'angle r, et IB est le rayon réfracté qui correspond au rayon incident SI.

Remarques. — La construction précédente étant rigoureusement plane, on peut énoncer la règle d'Huygens, plus simplement, dans le cas de la réfraction simple.

On décrit du point I *comme centre deux demi-cercles concentriques, l'un de rayon* 1 *et l'autre de rayon* $\frac{1}{n}$. *On prolonge le rayon incident jusqu'à sa rencontre en* A *avec le premier cercle, on mène la tangente au point d'intersection* A, *et du point* T *où cette tangente coupe cette surface réfringente, on mène une tangente au deuxième demi-cercle. Le rayon* IB *mené au point de contact de cette dernière tangente est le rayon cherché.*

Cas général. — Dans le cas d'un milieu biréfringent, la règle d'Huygens se modifie comme il suit :

Du point I *comme centre on construit d'abord une sphère de rayon* 1, *puis la surface de l'onde lumineuse*[1], *qui correspond au milieu réfringent : on prolonge encore le rayon incident jusqu'à sa rencontre avec la sphère, on mène le plan tangent à la sphère, en* A ; *ce plan va couper la surface réfringente suivant une droite qui se projette en* I *sur le plan de la figure. Enfin, par la droite* I *on mène autant de plans tangents à la surface de l'onde qu'on en peut mener. Autant il y aura de points de contact, autant on aura de rayons réfractés en les joignant au point* I.

Dans le cas général on peut mener deux plans tangents, et il y a, par suite, deux points de contact avec l'onde et deux rayons réfractés, qui correspondent au rayon incident SI.

578. **Lois de la double réfraction dans les cristaux à deux axes.** — Les cristaux à deux axes sont très nombreux : de ce genre sont les sulfates de nickel, de magnésie, de baryte, de potasse, de fer, le sucre, le mica, la topaze du Brésil. Dans ces différents cristaux, l'angle des deux axes prend des valeurs très différentes, car il varie depuis 3 jusqu'à 90 degrés.

Fresnel a découvert par le calcul et démontré par l'expérience que, dans les cristaux à deux axes, ni l'un ni l'autre des rayons réfractés ne suit les lois de la réfraction simple. Toutefois, si l'on appelle *ligne moyenne* et *ligne supplémentaire* les bissectrices de l'angle des deux axes et de son supplément, il a trouvé que, *dans toute section perpendiculaire à la ligne moyenne, un des rayons réfractés suit les lois de Descartes*, et que, *dans toute section perpendiculaire à la ligne supplémentaire, c'est l'autre rayon qui suit ces lois.*

INTERFÉRENCES.

579. **Expérience des miroirs de Fresnel.** — Nous avons dit précédemment (396) qu'en Optique physique on pose tout d'abord une hypothèse sur la nature de la lumière, et que cette hypothèse sert de principe et de fondement à toute la science : c'est l'*hypothèse des ondulations*. Elle consiste à admettre

1. On appelle *surface de l'onde* le lieu des points où les vibrations lumineuses du point I sont parvenues dans le cristal au bout de l'unité de temps.

que la lumière est le résultat d'*un mouvement vibratoire*, analogue au mouvement qui produit le son, et défini mathématiquement par les formules du

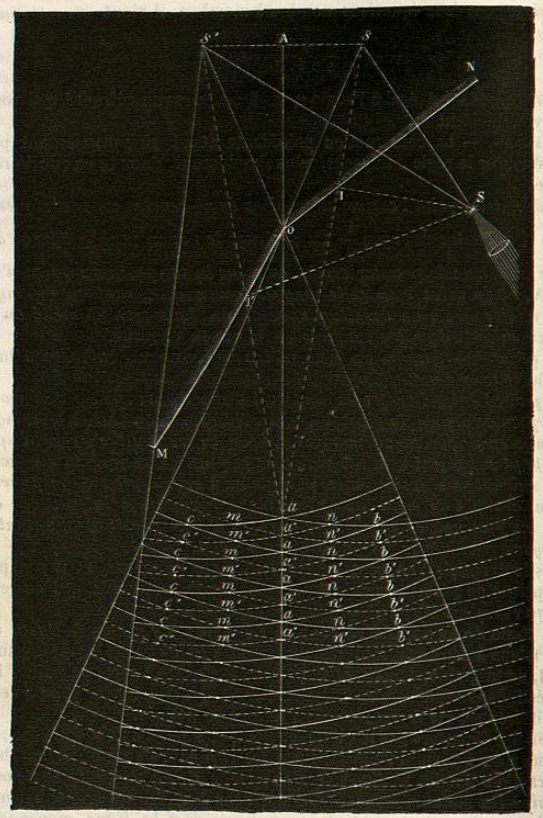

Fig. 636.

mouvement pendulaire ou vibratoire[1]. Or nous avons vu d'autre part, en

1. Nous avons vu, dans la Pesanteur (97), que ce mouvement vibratoire est défini par les deux équations suivantes :

Équation des espaces (ou de l'*élongation*) $x = a \cos 2\pi \frac{t}{T}$,

Équation des vitesses $V = b \sin 2\pi \frac{t}{T}$,

T étant la durée d'une oscillation complète, *a* l'élongation maximum et *b* la vitesse maximum.

acoustique (384), que le caractère essentiel des mouvements vibratoires, c'est l'*interférence*, c'est-à-dire la production, par suite de la combinaison des ondes, de *franges de mouvement*, sur lesquelles le mouvement de vibration est maximum, et de *franges de repos*, sur lesquelles le mouvement vibratoire est *nul* ou *minimum*. C'est ainsi que nous avons produit en acoustique des *franges sonores* et des *franges silencieuses*. Nous produirons de même, en Optique — si l'hypothèse des ondulations est fondée — des *franges lumineuses* et des *franges obscures*, séparées les unes des autres — dans chaque série — par l'intervalle d'une longueur d'onde complète, et nous vérifierons cette proposition curieuse — conséquence directe de l'hypothèse des ondulations — que *de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité*.

La démonstration expérimentale du *principe des interférences* (laquelle laisse beaucoup à désirer en acoustique) est remarquablement nette en optique. Fresnel la réalisa par l'expérience classique *des deux miroirs*.

Afin d'avoir deux sources lumineuses bien identiques, Fresnel prenait deux points lumineux *virtuels* S et S' obtenus par la réflexion d'un même point lumineux réel S, sur deux miroirs plans M et N, faiblement inclinés l'un sur l'autre (fig. 636). Cette source de lumière S était *monochromatique* : c'était, par exemple, de la lumière rouge. Si l'un quelconque des faisceaux réfléchis vient tomber seul sur un écran placé dans la chambre noire, l'éclairement est uniforme; mais si les deux faisceaux réfléchis tombent simultanément sur le tableau, comme ils se superposent en grande partie, grâce à la faible inclinai-

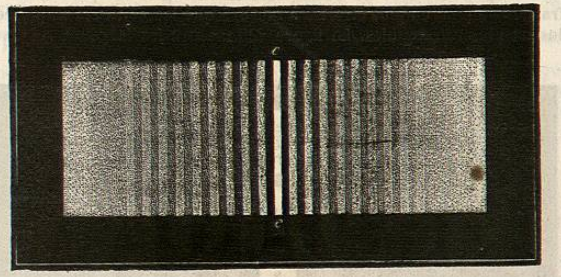

Fig. 637.

son des miroirs (fig. 636), toute la région commune est sillonnée par des bandes verticales, alternativement brillantes et obscures, qui se détachent nettement sur le fond du tableau, uniformément éclairé en rouge (fig. 637). Ce beau phénomène constitue les *franges de Fresnel*. Elles sont distribuées symétriquement dans le champ éclairé, par rapport à l'une d'elles *cc*, plus brillante que les autres, et qu'on appelle la *frange centrale*.

Lorsqu'on opère avec de la lumière blanche, les franches obtenues sont encore plus belles. Elles consistent alors en des bandes *irisées*, c'est-à-dire formées des couleurs du spectre, plus ou moins superposées : le violet est placé le plus près de la frange centrale, laquelle reste brillante et absolument blanche.

580. **Explication des franges de Fresnel. — Confirmation de l'hypothèse des ondulations.** — L'explication de l'expérience de Fresnel est une vérification optique du principe général des interférences, que nous avons exposé en acoustique (384).

1° *Cas de la lumière monochromatique.* — A chacune des sources lumi-

neuses S et S' (fig. 636) correspond un système d'ondes analogues à ceux de la figure 426. En tous les points où ces deux systèmes d'ondes se couperont avec une différence de marche constante, il se produira des interférences. Les points *aa'a''* (fig. 636) qui sont à égale distance des deux centres, reçoivent des mouvements de même sens et qui s'ajoutent : c'est le lieu de la *frange centrale*. Ce lieu est constitué dans l'espace par un plan vertical dont la trace est AO sur le plan de la figure 636. Si l'on coupe ce plan par un écran vertical et perpendiculaire à la droite AO, on aura à toute distance du point O une ligne verticale brillante, qui constituera la frange centrale de la figure 637.

A droite et à gauche de ce plan central, les ondes se croisent avec des différences de marche croissantes. Pour tous les points (tels que *bb'*..., *cc'*) où la différence de marche sera d'un *nombre pair* de demi-longueurs d'onde, il y aura addition de mouvement et par suite maximum de lumière, comme dans le plan de central : ces points constitueront les *franges latérales brillantes;* pour tous les points (tels que *mm'*..., *nn'*) où la différence de marche sera d'un *nombre impair* de demi-longueurs d'onde, il y aura destruction de mouvement et par suite minimum de lumière : ces points constitueront les *franges latérales sombres*.

Toutes ces franges latérales sont, dans l'espace, des hyperboloïdes de révolution, dont les intersections par le plan de l'écran sont des portions d'hyperboles, qui sur une faible étendue paraissent rectilignes (fig. 637).

2° *Cas de la lumière blanche.* — Nous avons choisi la lumière rouge, parce que c'est la lumière simple qui donne les franges les plus larges. En effet, en répétant l'expérience avec les autres lumières simples du spectre, on obtient des franges de plus en plus étroites à mesure que les couleurs employées sont de plus en plus réfrangibles. La figure 638 montre les largeurs relatives des

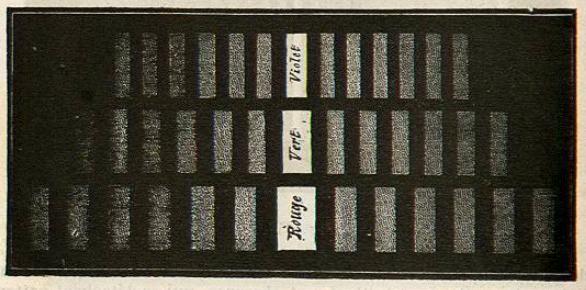

Fig. 638.

franges obtenues successivement avec le rouge, le vert et le violet du spectre (pour une même différence de marche, elle est égale à un même nombre de demi-longueurs d'onde).

En même temps que ces franges sont plus ou moins larges, elles sont plus ou moins éloignées de la frange centrale : la première frange rouge, par exemple, est la plus éloignée du centre, tandis que la première frange violette est la moins éloignée. En appelant x la distance d'une frange latérale d'ordre n à la frange centrale, y la distance de l'écran au point O, c la distance des deux sources virtuelles S et S', et λ la longueur d'onde de la couleur considérée, on a $x = \frac{ny}{4c}\lambda$. Par conséquent, lorsqu'on emploie la lumière blanche,

les franges du *même ordre* (c'est-à-dire correspondant à la même différence de marche) pour les diverses couleurs se superposent en se recouvrant imparfaitement : leur ensemble doit donc former une espèce de spectre confus, qui se réduit à une bande plus ou moins irisée sur les bords et dans lequel les couleurs sont placées dans un ordre inverse de celui du spectre solaire par rapport à la frange centrale blanche.

581. **Nécessité de l'existence de l'éther.** — La conclusion nécessaire de l'expérience de Fresnel, c'est que la lumière *vibre*, ou qu'elle est le résultat d'un *mouvement vibratoire*, puisqu'elle interfère. Mais quelle est la substance qui vibre dans un rayon lumineux? *Cela ne peut pas être l'air*, comme dans un *rayon sonore*, car la lumière n'a pas besoin d'air, ni pour se produire, ni pour se propager. *Il faut donc admettre l'existence* d'un nouveau milieu élastique, autre que l'air, qui se trouve partout où la lumière se propage, non seulement dans les espaces célestes, mais dans le vide apparent de nos machines pneumatiques, ainsi que dans l'air lumineux et dans les corps transparents qui transmettent la lumière, et même dans les corps opaques qui ne réfléchissent la lumière qu'en la modifiant plus ou moins. Ce fluide universel, qui pénètre et imbibe tout ce qui existe dans l'univers, c'est l'*éther*. Et de même que le son est le résultat d'un certain mouvement vibratoire de l'air, la *lumière* est le résultat d'un certain mouvement vibratoire de l'éther.

582. **Origine des couleurs du spectre.** — La lumière est donc à l'éther ce que le son est à l'air; la lumière est en quelque sorte le son de l'éther [1]. On peut pousser plus loin l'assimilation, en ajoutant que les diverses couleurs du spectre sont les *notes* de la lumière. Cela veut dire qu'elles sont dues à des vibrations plus ou moins rapides de l'éther, et par suite à des longueurs d'onde plus ou moins grandes. La formule $x = \frac{ny}{4c}\lambda$ a permis de mesurer λ pour les différentes couleurs du spectre. On a trouvé ainsi que les longueurs d'onde du *violet* et du *rouge* sont entre elles comme 2 est à 3. Par suite, en appelant N_v et N_r les nombres de vibrations correspondants à ces deux couleurs, comme on a, par définition,

$$\lambda_v = \frac{V}{N_v} \quad \text{et} \quad \lambda_r = \frac{V}{N_v}, \quad \text{d'où} \quad \frac{N_v}{N_r} = \frac{\lambda_r}{\lambda_v}$$

il en résulte que le rapport des nombres de vibrations $\frac{N_v}{N_r}$ est égal à $\frac{3}{2}$. Il y a donc entre ces deux couleurs le même intervalle qu'entre les notes *sol* et *ut* de la gamme naturelle, c'est-à-dire une *quinte*.

En comparant les intervalles *optiques* des couleurs du spectre avec les intervalles *musicaux* des notes de la gamme, on a

INTERVALLES MUSICAUX.	NOTES.	LONGUEURS D'ONDE.	COULEURS.	LONGUEURS D'ONDE.	RAPPORTS.
Son fondamental...	*Ut*	1	Rouge.	6,2	1
Seconde....	*Ré*	8/9	Jaune.	5,5	8/9
Tierce mineure.. .	*Mi*	5/6	Vert.	5,1	5/6
Quarte.....	*Fa*	3/4	Bleu.	4,6	3/4
Quinte.....	*Sol*	2/3	Violet.	4,1	2/3

1. A. Bertin, Conférence sur la *Polarisation de la lumière* (*Revue scientifique*, janvier 1867).

On voit donc que la couleur *monte* du rouge au violet, comme le son monte de l'*ut* au *sol*, mais qu'elle ne monte que d'une *quinte*. La gamme complète des couleurs ne comprend donc pas une octave entière, comme la gamme naturelle, mais seulement une quinte. Si l'on avait à refaire la nomenclature des couleurs du spectre, on n'en devrait plus compter que *cinq* au lieu de *sept*. Les deux couleurs qu'on supprimerait, l'orangé et l'indigo, ne forment précisément qu'un *demi-ton*. Leurs longueurs d'onde sont en effet représentées par les nombres $\lambda_0 = 5{,}63$ et $\lambda_1 = 4{,}49$.

583. **Valeurs numériques des longueurs d'onde et des vibrations lumineuses.** — L'unité avec laquelle sont évaluées les longueurs d'ondes lumineuses est habituellement le *millionième de millimètre*, ou le millième de *micron*. Le nombre de vibrations de chaque couleur se déduit de sa longueur d'onde par la relation $N = \frac{V}{\lambda}$, V étant la vitesse de la lumière (77 000 lieues par seconde ou 308 millions de mètres). Voici les nombres qu'on obtient ainsi pour les principales couleurs du spectre.

COULEURS.	LONGUEURS D'ONDE (en millièmes de micron).	NOMBRE DE VIBRATIONS (en trillions).
Violet	423	709
Indigo	449	668
Indigo-bleu	459	654
Bleu	475	631
Vert	512	586
Jaune	551	544
Rouge	620	484

Remarque. — On voit que la valeur moyenne de la longueur d'une onde lumineuse ne dépasse pas *la moitié d'un millionième de millimètre*, et que le nombre moyen des vibrations dépasse 600 *mille milliards par seconde*.

584. **Autres phénomènes d'interférence : Anneaux de Newton.** — Les interférences donnent lieu, en optique, à un grand nombre d'autres phénomènes très curieux. Plusieurs sont connus depuis longtemps, entre autres celui des *anneaux colorés*, que présentent les lames minces, telles que les bulles de savon. Ce phénomène est intéressant à un double point de vue : d'abord parce qu'il a été l'objet de recherches remarquables de la part de Newton, et puis parce qu'il a été l'occasion de la découverte du principe des interférences, imaginé par Thomas Young, précisément pour expliquer les couleurs des lames minces.

1° *Production du phénomène.* — Tous les corps diaphanes, solides, liquides ou gazeux, lorsqu'ils sont réduits en lames suffisamment minces, paraissent colorés de nuances extrêmement vives, surtout par réflexion. Les cristaux qui se clivent en feuilles très minces, comme le mica, le gypse, présentent ce phénomène; il en est de même de la nacre et du verre soufflé en boule très mince. Une goutte d'huile étalée rapidement sur une grande masse d'eau présente toutes les nuances du spectre dans un ordre constant. Une bulle de savon paraît blanche d'abord; mais à mesure qu'on l'enfle, on voit apparaître de brillantes teintes irisées, surtout à la partie supérieure, où l'enveloppe liquide qui forme la bulle est plus mince. Ces couleurs se disposent en zones concentriques horizontales autour du sommet, qui devient noir au moment où

il n'a plus l'épaisseur suffisante pour réfléchir la lumière, et la bulle crève alors subitement.

2° *Expériences de Newton.* — Newton le premier étudia le phénomène des anneaux colorés dans les bulles de savon. Voulant constater la relation qui existe entre l'épaisseur de la lame mince, la couleur des anneaux et leur étendue, il produisait ceux-ci au moyen d'une couche d'air interposée entre deux verres, l'un plan, l'autre convexe et à très long foyer (fig. 639). Les deux surfaces étant exposées devant une fenêtre, à la lumière du jour, de manière à les voir par réflexion, on apercoit au point de contact une tache noire

Fig. 639.

Fig. 640.

entourée d'anneaux colorés, au nombre de six ou sept, dont les teintes s'affaiblissent graduellement (fig. 640). Si les verres sont vus par transmission, le centre des anneaux est blanc, et leurs couleurs sont complémentaires de celles des anneaux par réflexion.

Avec une lumière homogène, la couleur rouge par exemple, les anneaux sont successivement noirs et rouges, et d'un diamètre d'autant moindre que la couleur est plus réfrangible; mais avec de la lumière blanche les anneaux sont colorés des différentes couleurs du spectre, ce qui provient de ce que les anneaux des différentes couleurs simples, ayant des diamètres différents, ne se superposent pas, mais se séparent plus ou moins.

Si la distance focale de la lentille est de 3 à 4 mètres, les anneaux peuvent s'observer à l'œil nu; mais si le foyer est plus rapproché, il faut regarder les anneaux avec une loupe.

3° *Théorie.* — La coloration des lames minces et des anneaux de Newton est un phénomène d'interférence lumineuse, qui correspond au phénomène des tuyaux sonores en acoustique. Il résulte, en effet, de ce que les rayons qui se sont réfléchis sur la seconde surface de la lame interfèrent avec ceux que la première surface a réfléchis. Quant aux anneaux vus par réfraction, ils proviennent de l'interférence des rayons transmis directement avec les rayons qui ne sont transmis qu'après deux réflexions intérieures sur les faces de la lame.

585. **Autres phénomènes d'interférence : Diffraction et réseaux.** — De même qu'en ajoutant de la lumière à de la lumière on peut produire l'obscurité, de même, en retranchant de la lumière en certains points de l'espace, on peut augmenter l'éclat de ces points; il suffira, pour cela, que les rayons retranchés soient précisément ceux qui pourraient interférer avec les rayons que l'on conserve. C'est ce qui arrive dans les phénomènes de *diffraction* et des *réseaux*, que nous allons décrire sommairement.

Diffraction. — La *diffraction* est une modification que subit la lumière quand elle rase le contour d'un corps, ou quand elle traverse une petite ouverture, modification en vertu de laquelle les rayons lumineux paraissent s'infléchir et pénétrer dans l'ombre.

1° *Bord d'un écran.* — Pour observer la diffraction, on fait pénétrer un faisceau de lumière solaire par une ouverture très petite pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et on le reçoit sur une lentille convergente L à court foyer (fig. 641). Un verre coloré en rouge est fixé à l'ouverture de la

chambre noire, et ne laisse passer que de la lumière rouge. Un écran opaque *e*, à bord mince, placé derrière la lentille, au delà de son foyer, intercepte une moitié du cône lumineux, tandis que l'autre moitié va se projeter sur un écran *b*, représenté de face en B. On observe alors, *en dedans de l'ombre géométrique* limitée par la droite *ab*, *une lumière rougeâtre assez vive*, qui décroît d'intensité à mesure que les points de l'écran sont plus éloignés de la limite de

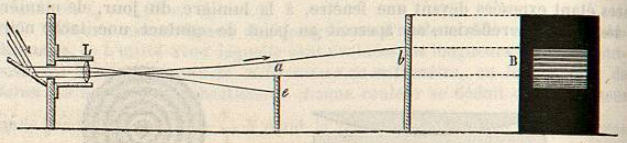

Fig. 641.

l'ombre; et sur la partie de l'écran qui devrait être uniformément éclairée, on remarque des alternatives de franges obscures et de franges lumineuses qui vont en s'affaiblissant graduellement et finissent par disparaître.

Les diverses couleurs du spectre donnent naissance au même phénomène, mais avec cette différence que les franges sont *d'autant plus étroites*, que la lumière est *moins réfrangible*. Il résulte de cette dernière propriété que, lorsqu'on expérimente avec de la lumière blanche, les franges de chaque couleur simple se trouvant séparées par leur inégale diffraction, celles qui se forment sur l'écran B sont irisées.

2° *Écran linéaire*. — Si, au lieu d'interposer entre la lentille L et l'écran *b* les bords d'un corps opaque, on y place un corps opaque très étroit, comme un cheveu, ou un fil métallique très fin, non seulement il y a encore des franges alternativement obscures et lumineuses des deux côtés de la portion de l'écran qui correspond à l'ombre géométrique du corps, mais dans cette ombre même on aperçoit les mêmes alternatives de bandes obscures et de bandes lumineuses, c'est-à-dire qu'il se produit alors des franges extérieures et des franges intérieures.

Phénomène des réseaux. — On nomme *réseau*, en optique, une suite de raies alternativement opaques et transparentes, très rapprochées les unes des autres. Tels sont les traits parallèles qu'on grave au diamant, sur verre, pour former les micromètres. Les traits sont, dans ce cas, la partie opaque du réseau.

Si l'on fait passer la lumière à travers un réseau de ce genre, contenant par exemple 100 traits par millimètre, voici le curieux effet qu'on observe. En l'absence du réseau, la lumière ne sortirait pas du champ de l'ouverture par où elle entre dans la chambre obscure; mais avec le réseau on voit des maxima de diverses couleurs formant une série de spectres sur une ligne perpendiculaire aux traits du réseau.

C'est un phénomène analogue à celui qu'on voit, sans aucun appareil, lorsqu'on regarde un bec de gaz à travers les interstices que laissent entre eux les doigts de la main, ou bien à travers les cils des paupières.

Avec des *réseaux croisés*, les spectres se répandent non seulement sur une ligne, mais dans toutes les directions. Ce genre d'interférences fournit ainsi l'un des plus beaux phénomènes de l'optique physique.

Enfin, si les mailles du réseau forment des *cercles concentriques*, les spectres s'étalent sur des anneaux. C'est un phénomène analogue aux couronnes qu'on voit autour de la lune par un temps brumeux, ou autour des becs de gaz par le brouillard.

POLARISATION.

586. **Définition expérimentale de la polarisation.** — I. *Expérience de Bartholin*. — Nous avons décrit ci-dessus, à propos de la double réfraction, l'expérience fondamentale de Bartholin. Quand on fait tomber un faisceau lumineux sur un rhomboèdre de spath, il en sort deux faisceaux : l'un, que nous avons appelé faisceau ordinaire, et l'autre, le faisceau extraordinaire, qui a la propriété de tourner autour du premier quand on fait tourner le rhomboèdre autour du faisceau incident. Si l'on reçoit ces faisceaux sur un même écran, chacun d'eux y trace une image de l'ouverture : au faisceau ordinaire correspond une *image ordinaire*, et à l'autre une *image extraordinaire*. Ces images ont le caractère constant d'être toujours, et dans toutes leurs positions, *égales* en intensité lumineuse. Et si l'on dispose l'expérience de manière que ces deux images se superposent partiellement, on constate que l'éclat de la région commune est double de celui des parties distinctes (fig. 642).

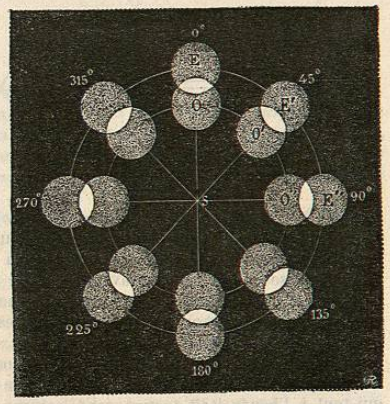

Fig. 642.

II. *Expérience des rhomboèdres croisés (d'Huygens)*. — En 1678, Huygens compliqua d'une manière fort heureuse l'expérience de Bartholin [1]. Ayant dédoublé un faisceau lumineux incident en lui faisant traverser un premier rhomboèdre de spath, il reçut les deux faisceaux émergents sur un deuxième spath identique au premier et orienté par rapport à celui-ci d'une manière quelconque ; il obtint un nouveau dédoublement de chaque faisceau : ce qui faisait en tout *quatre* faisceaux et *quatre* images. Jusque-là il n'y avait rien de nouveau : il était naturel que le deuxième spath agit sur la lumière tout comme le premier et la réfractât doublement. Mais, ayant laissé l'un des spaths immobile et faisant tourner l'autre autour du faisceau incident, il produisit des phénomènes tout nouveaux. Il y a deux manières d'opérer :

1° On peut amener les petites diagonales des deux spaths à être parallèles, et par suite les deux sections principales à coïncider. Dans ce cas, on obtient le même résultat qu'en doublant l'épaisseur du premier spath. Les quatre images se réduisent à deux, qui sont plus écartées que précédemment : l'une, *ordinaire*, qui reste immobile, et l'autre, *extraordinaire*, tournant avec les deux spaths autour de la première.

2° On peut, au contraire, croiser les petites diagonales, et par suite les sections principales des deux rhomboèdres : dans ce cas, les quatre images se réduisent *encore* à deux, mais qui sont toutes deux *extraordinaires*, car elles tournent toutes les deux quand on fait tourner le système des deux rhomboèdres autour du faisceau incident.

1. A. Bertin, *loc cit.*