

Ainsi le problème cristallographique revient à la recherche des angles que la normale à une face donnée fait avec les trois directions choisies pour axes, c'est-à-dire, en général, avec les trois arêtes du parallélépipède fondamental. Or le goniomètre ayant fait connaître les angles de la face avec celles dont le symbole est déjà déterminé, ce n'est plus qu'une question de trigonométrie sphérique d'en déduire la position de la normale et ses angles avec les axes.

DEUXIÈME SECTION

CRISTALLOGRAPHIE PHYSIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES CRISTAUX

§ 1

LOIS GÉNÉRALES DE LA RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX.

Conditions des vibrations lumineuses. — On regarde les phénomènes lumineux comme le résultat de vibrations imprimées aux particules d'un milieu infiniment élastique, répandu dans tous les corps comme dans le vide le plus parfait et auquel on donne le nom d'*éther*. Si l'on appelle *rayon de lumière* la ligne qui joint l'origine du mouvement lumineux à un point quelconque atteint par l'ébranlement, la vibration lumineuse en ce point est toujours perpendiculaire au rayon. La manière dont s'exécutent les vibrations au sein d'un corps homogène dépend de deux éléments. Le premier est la *densité* de l'éther, densité toujours influencée par celle du corps pondérable dans lequel l'éther est interposé. Le second est l'*élasticité* de l'éther, c'est-à-dire la nature spéciale des résistances que fait naître la liaison mutuelle des particules vibrantes.

La densité de l'éther est constante au sein d'un milieu homogène. Mais au point de vue optique, les corps se partagent en deux grandes catégories.

Corps isotropes. Réfraction. — La première, celle des corps appelés *isotropes*, comprend toutes les substances amorphes, ainsi que les cristaux du système cubique. L'élasticité optique y est la

même dans toutes les directions, de telle sorte qu'une particule d'éther est indifférente au sens dans lequel elle est provoquée à vibrer. Lors donc qu'un mouvement lumineux, né dans un milieu isotrope, tel que l'air, passe dans un autre milieu isotrope comme le verre, il n'y a de changé que les *valeurs absolues* de la densité et de l'élasticité optiques, et il en résulte simplement un changement dans la *vitesse de propagation* du mouvement lumineux. On démontre, en physique, comment ce changement se traduit par une déviation ou brisement des rayons lumineux incidents, c'est-à-dire par le phénomène connu sous le nom de *réfraction*. La loi de la réfraction est la suivante : l'angle i que fait le rayon incident avec la normale à la face d'incidence est lié à l'angle r que fait cette même normale avec le rayon réfracté par la relation

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}$$

v étant la vitesse de propagation dans l'air et v' la vitesse dans le second milieu isotrope.

Ce rapport $\frac{v}{v'}$ porte le nom d'*indice de réfraction* du corps relativement à l'air; mais il n'a de sens précis que s'il s'agit d'une radiation simple bien définie.

La valeur de l'indice se mesure, comme il est expliqué dans les traités de physique, à l'aide d'un prisme taillé dans la substance et qu'on place dans une position telle, qu'il imprime à un rayon incident le *minimum de déviation*. D'ordinaire on détermine cette valeur en choisissant comme point de repère la raie D, située dans la partie jaune du spectre solaire. L'indice de réfraction, ainsi mesuré, suffit pour caractériser entièrement un corps isotrope au point de vue optique. On le désigne ordinairement par n , en spécifiant la radiation pour laquelle il a été déterminé.

Corps anisotropes. Biréfringence. — Dans la seconde catégorie, celle des corps *anisotropes*, qui comprend tous les cristaux appartenant à un autre système que celui du cube¹, l'élasticité de l'éther est variable suivant le sens dans lequel ses particules sont sollicitées à vibrer. En général, en arrivant sur un tel milieu,

1. Et aussi certaines substances isotropes qui ont subi des efforts mécaniques, comme le verre trempé ou comprimé.

une vibration incidente ne peut pas se propager telle quelle. Il y a donc à la fois changement de la vitesse de propagation du rayon, c'est-à-dire *réfraction*, et *altération* de la direction du mouvement *vibratoire*. La théorie indique que, en chaque point de la surface d'un corps anisotrope, par suite des liaisons mutuelles des particules d'éther, il n'y a, perpendiculairement à un rayon, que *deux directions privilégiées* de vibration pour lesquelles le mouvement incident puisse se transmettre sans altération. Mais, en vertu des lois de la mécanique, la vibration incidente peut toujours être remplacée par l'ensemble de deux vibrations, d'intensité convenable, dont chacune aurait déjà l'une des deux directions privilégiées. Si l'on a d'avance procédé à cette décomposition, on sera sûr que chacun des deux mouvements élémentaires, parfaitement équivalents par leur ensemble au mouvement donné, se propagera, pour son compte, sans autre changement que celui de la vitesse. Seulement les deux directions rencontrant des élasticités différentes, les deux vitesses de propagation ne seront pas les mêmes. Et comme c'est la vitesse qui détermine la direction de la réfraction, tout rayon incident se partagera en *deux rayons réfractés* distincts, cheminant désormais dans le nouveau milieu avec des vitesses inégales. C'est ce qu'on appelle la *double réfraction*, et on voit ainsi que *tous les corps anisotropes sont biréfringents*.

Ellipsoïde optique. — Voici comment on peut déterminer les deux directions privilégiées dont il vient d'être question. Si l'on cherche à mesurer expérimentalement, comme on l'a fait pour les corps isotropes, l'indice de réfraction d'un corps anisotrope, on trouve que, *suivant le sens des vibrations* excitées par une radiation simple donnée, l'indice est susceptible d'une infinité de valeurs, comprises entre un maximum et un minimum, lesquels ont lieu pour deux directions rectangulaires. Pour une troisième direction, perpendiculaire aux deux précédentes, l'indice prend une valeur moyenne.

Il y a donc un *indice maximum* n_g (plus grand), un *indice minimum* n_p (plus petit) et un *indice moyen* n_m .

Or si l'on porte sur ces trois directions des longueurs respectivement proportionnelles aux trois *indices principaux*, savoir : $OA = n_g$, $OC = n_p$ et $OB = n_m$ (fig. 141), et que l'on construise

un *ellipsoïde* qui ait ces trois longueurs pour demi-axes, chacun des rayons de cet ellipsoïde fournira la représentation de l'indice de réfraction qui correspond aux vibrations de même sens. Par exemple, le rayon OI représentera l'indice n_i des vibrations parallèles à OI . Cet ellipsoïde optique ou *ellipsoïde des indices*¹ représente complètement, au point de vue optique, la substance anisotrope considérée, relativement à la radiation simple employée.

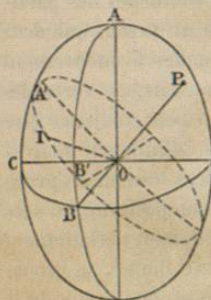


Fig. 141.

Soit maintenant un rayon incident quelconque PO qui, ayant d'abord cheminé dans l'air ou tout autre milieu isotrope, atteint en O la surface de séparation du premier milieu et d'un corps biréfringent. Autour de ce point O , choisi comme centre, concevons l'ellipsoïde optique propre au second milieu pour la radiation employée. On sait que, pour un rayon PO , la vibration incidente est toujours contenue dans un plan perpendiculaire à OP et dit *plan de l'onde*. Ce plan coupera l'ellipsoïde suivant une ellipse, qui aura deux demi-axes OA' et OB' , dont la valeur, moindre que OA , sera supérieure à OC . Or ces deux lignes OA' et OB' sont précisément les deux *directions privilégiées*, suivant lesquelles il faut opérer la décomposition préalable de la vibration incidente OI , pour être sûr que les deux composantes se propageront sans altération, ce qu'elles feront avec des vitesses respectivement inverses de OA' , c'est-à-dire avec des indices de réfraction proportionnels à OA' et à OB' . Si OA' est le grand axe et OB' le petit, ces deux indices pourront être désignés le premier par n'_g et le second par n'_p .

Ce qui vient d'être dit s'applique à tous les corps anisotropes. Lors donc qu'on veut étudier les modifications qu'ils impriment à la lumière, il faut concevoir, pour chacun d'eux, l'ellipsoïde optique qui le caractérise, tel qu'il est donné par la valeur des indices principaux, et y exécuter la construction précédente.

1. L'idée de souder la notion de l'ellipsoïde optique à celle, plus immédiatement sensible, des indices de réfraction, nous a été suggérée par M. Michel Lévy.

Mais il importe de se rappeler que cette construction n'a de valeur précise qu'autant qu'il s'agit d'une lumière simple ou *monochromatique*, comme celle de l'alcool salé, par exemple; car il peut y avoir, pour un même corps, autant d'ellipsoïdes optiques distincts qu'il y a de radiations dans la lumière blanche.

Polarisation des rayons réfractés. — Tout ne se borne pas au dédoublement du rayon incident. Quand il s'agit de lumière naturelle, la vibration incidente OI , pourvu qu'elle soit perpendiculaire au rayon, n'a pas, dans le premier milieu isotrope, de direction fixe et, en réalité, on admet qu'elle change à tout instant de place, tournant avec une extrême rapidité autour du pied du rayon PO , dans le plan $OA'B'$. Mais dès qu'elle atteint le milieu biréfringent, quelle que soit sa direction à un moment donné, c'est toujours suivant les deux axes OA' et OB' , dont la place est invariable, qu'elle doit se partager. Donc *les deux vibrations résultantes sont désormais orientées*. C'est ce qu'on exprime en disant que la lumière est *polarisée*. Ainsi, un rayon incident de lumière naturelle, tombant sur un corps anisotrope, se décompose en deux rayons réfractés, *polarisés à angle droit*, puisque OA' est perpendiculaire à OB' .

§ 2

CRISTAUX A UN AXE. CRISTAUX A DEUX AXES.

Définition des cristaux à un axe. — D'après la forme générale de leurs ellipsoïdes, les corps anisotropes se divisent en deux grandes sections. La première comprend les cristaux pourvus d'un axe principal de symétrie, c'est-à-dire ceux des systèmes hexagonal, quadratique et rhomboédrique. L'ellipsoïde optique y est de *révolution autour de l'axe principal* OA (fig. 142). OB devient égal à OC et l'ellipse OBC se transforme en un cercle, dit *équateur* de l'ellipsoïde. Dans ce cas, un rayon qui chemine suivant l'axe OA (et dont, par conséquent, la vibration est contenue dans le plan de la section circulaire) *ne subit pas la double réfraction*, car le cercle n'offre pas de directions privilégiées. L'axe principal est donc une ligne d'*uniréfringence* et, pour ce motif, en lui donne le nom d'*axe optique*. Les cristaux des

trois systèmes en question sont dits *cristaux à un axe* ou *uni-axes*. Une plaque de l'un deux, taillée normalement à l'axe et éclairée par des rayons perpendiculaires, se comporte comme une lame isotrope.

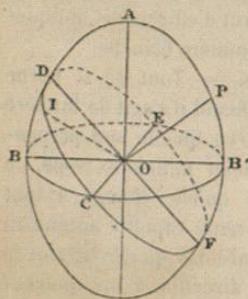


Fig. 142.

Rayon ordinaire, rayon extraordinaire. — Pour toute autre position, un rayon PO, dont la vibration est OI, tombant en O sur la surface d'un corps uniaxe, la vibration OI se décompose en deux, dont l'une, OC, contenue dans la section circulaire, excite toujours, quelle que soit la direction de OI, la même élasticité, à savoir celle qui convient au rayon équatorial OB. L'autre, OD, excite une élasticité variable, comprise entre celle de OB et celle qui est propre à OA. On dit donc que, dans un cristal uniaxe, la biréfringence donne lieu à la formation de deux rayons, l'un *ordinaire*, celui qui correspond à la vibration OB, l'autre *extraordinaire*, celui qui répond à la vibration OD. Le premier se propage toujours avec la même vitesse; le second, avec une vitesse qui varie, suivant la position du rayon incident, entre celle qui convient à OB et celle qui est propre à OA.

Bien entendu, les deux rayons, ordinaire et extraordinaire, sont polarisés à angle droit. Pour définir le sens de cette polarisation, imaginons que, un rayon de lumière venant à tomber sur un corps uniaxe, on mène, par le point d'incidence, deux lignes, l'une normale à la face d'incidence, l'autre parallèle à l'axe optique. Le plan ainsi déterminé s'appellera *section principale optique*. Or on démontre que la vibration ordinaire est perpendiculaire à cette section, qui joue vis-à-vis d'elle le rôle de plan d'équilibre, ce qu'on exprime en disant que *le rayon ordinaire est polarisé dans la section principale*. Au contraire, la vibration extraordinaire est contenue dans la section principale et *le rayon extraordinaire est polarisé perpendiculairement à la section principale*.

Indices de réfraction. Signe optique. — Nous avons dit que l'*indice de réfraction*, pour une substance isotrope, était le rapport de la vitesse de propagation dans l'air à la vitesse de

propagation dans la substance donnée (pour une radiation simple). Il résulte de là que, pour un corps uniaxe, il y a un *indice de réfraction ordinaire* ou *indice ordinaire* n_o , celui qui correspond aux vibrations normales à l'axe optique, et en sus, toute une série d'indices, correspondant aux autres vibrations. On réserve le nom d'*indice extraordinaire* à la valeur extrême n_e , celle qui correspond aux vibrations parallèles à l'axe optique.

Maintenant deux cas peuvent se présenter, suivant que OB ou n_o est plus grand ou plus petit que OA ou n_e . Supposons $OA > OB$. Alors OA est le grand axe, c'est-à-dire que l'ellipsoïde est renflé suivant l'axe de révolution. Dans un cristal de ce genre, le rayon extraordinaire, se propageant moins vite, est *plus dévié* que le rayon ordinaire; il a donc l'air d'avoir été *attiré* par la normale à la face d'incidence; d'où le nom de cristaux *attractifs*, donné au corps de cette catégorie; mais on emploie plus souvent la dénomination de cristaux *positifs*. Au contraire, on appelle cristaux *répulsifs* ou *negatifs* ceux pour lesquels l'indice ordinaire est plus grand que l'indice extraordinaire. Alors c'est le rayon ordinaire qui est le plus dévié et l'ellipsoïde est aplati suivant l'axe de révolution.

Ainsi le *signe optique* d'un cristal est défini par le rapport des vitesses extrêmes, ou, ce qui revient au même, par le rapport n_e de l'indice extraordinaire à l'indice ordinaire n_o , rapport plus grand que l'unité pour un cristal positif, tandis qu'il est plus petit pour un cristal négatif.

Définition des cristaux à deux axes. — Pour tous les cristaux des systèmes rhombique, monoclinique et triclinique, l'ellipsoïde optique est à trois axes inégaux. Or, la géométrie nous apprend que, dans un tel ellipsoïde, il y a toujours, de part et d'autre du grand axe OA (fig. 145) et symétriquement, dans la section AOC qui contient aussi le petit axe OC, deux directions OV, OV', telles que la section COD ou COV', faite dans l'ellipsoïde, perpendiculairement à chacune d'elles, soit un cercle. Dès lors, pour un rayon parallèle à l'une de ces deux directions, la vibration, contenue dans

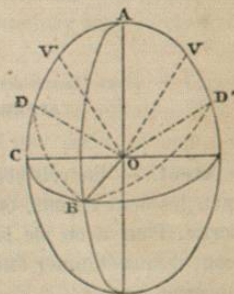


Fig. 145.

la section circulaire, n'a plus besoin de se décomposer. Les deux directions OV et OV' sont donc des lignes d'uniréfringence et par conséquent le cristal possède deux axes optiques. De là le nom de *cristaux à deux axes* ou *biaxes*. On remarquera que la position de ces deux axes n'a de sens précis que pour une radiation simple déterminée. D'ailleurs, les deux axes optiques sont toujours situés dans le plan qui contient les directions OA et OC des deux indices extrêmes, c'est-à-dire des axes de plus grande et de plus petite élasticité optique. Chacun de ces axes d'élasticité est donc toujours bissecteur de l'un des deux angles que forment entre eux les axes optiques. Mais l'axe du maximum d'élasticité, par exemple (qui est l'axe du plus petit indice), sera bissecteur, tantôt de l'angle aigu, tantôt de l'angle obtus des axes.

Si les deux axes OV et OV' sont très rapprochés de l'axe OA , qui est le grand axe de l'ellipsoïde, celui du plus grand indice et, par conséquent, l'axe du minimum d'élasticité, le cas examiné est très voisin de celui d'un cristal uniaxe positif. A cause de cela, on dit qu'un cristal biaxe est positif quand l'axe du minimum d'élasticité est la bissectrice aiguë de l'angle des axes optiques. Il serait négatif si ce même axe formait la bissectrice obtuse.

Un rayon quelconque, tombant sur un cristal biaxe, s'y décompose toujours en deux rayons réfractés, polarisés à angle droit. Seulement, en général, ces rayons sont tous deux extraordinaires. Il n'y a plus lieu de distinguer un indice de réfraction ordinaire et un indice extraordinaire, mais bien trois indices principaux, maximum, minimum et moyen.

§ 5

APPAREILS DE POLARISATION.

Nicol. — Un cristal uniaxe donne de la lumière polarisée; mais les deux rayons, ordinaire et extraordinaire, se mêlent à la sortie. Pour avoir de la lumière orientée dans une seule direction, il faut éliminer l'un des rayons. C'est ce qu'on réalise avec un *nicol*.

Imaginons un prisme de clivage de spath d'Islande, RABS (fig. 144), taillé de telle sorte que les faces terminales RA et RS

soient des losanges. Le plan diagonal RABS est un plan de symétrie. Il contient donc à la fois la normale à la face d'incidence RA et l'axe optique du spath. Donc c'est une section principale du cristal et tout rayon tombant suivant la longueur de ce prisme se décomposera en un rayon ordinaire, dont la vibration sera perpendiculaire au plan diagonal et un rayon extraordinaire, dont la vibration sera contenue dans ce plan.

Cela posé, on coupe le prisme en deux, suivant

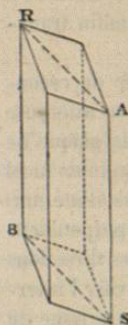


Fig. 144.

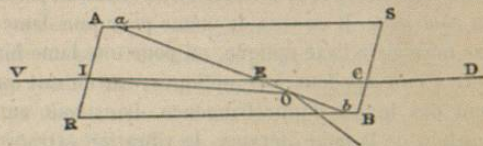


Fig. 145.

une ligne ab (fig. 145), convenablement choisie, et on recolle les deux moitiés avec du baume de Canada. Par suite des propriétés optiques de ce baume, il se trouve que, des deux rayons IE et IO , qui est le plus dévié, tombe sur ab sous un angle qui ne lui permet pas de franchir le baume. Il subit la réflexion totale et vient s'éteindre dans la monture noire du prisme. Au contraire, le rayon extraordinaire IE traverse le baume, puis la seconde moitié du spath, et sort en CD . Les deux moitiés de prisme, ainsi recollées, formant un *nicol*, donnent donc exclusivement une seule sorte de lumière, celle dont les vibrations sont contenues dans la section principale de l'appareil.

Combinaison d'un polariseur et d'un analyseur. — Lorsqu'un rayon déjà polarisé tombe sur un *nicol*, la vibration incidente doit se décomposer en deux, dont une seule, la composante extraordinaire, peut traverser l'appareil. Le résultat final dépend donc de l'angle de la vibration incidente avec la section principale du *nicol*. Si cet angle est nul, la vibration se transmet tout entière; s'il est égal à 90° , il ne peut pas y avoir de composante suivant la section et la lumière est totalement arrêtée; pour toute autre position, la vibration donne deux composantes, dont l'une, l'extraordinaire, est seule transmise. Il y a donc

affaiblissement plus ou moins marqué de la lumière incidente.

D'après cela, quand deux nicols sont placés l'un au bout de l'autre, il y a transmission totale de la lumière qui a traversé le premier, si les sections principales sont parallèles; extinction totale, si les sections sont croisées à angle droit; enfin transmission partielle dans tout autre cas.

Un système de nicols fournit donc un moyen sûr de reconnaître la biréfringence. Si, entre les nicols croisés, on interpose une plaque isotrope, l'obscurité persiste, puisque la plaque ne peut rien changer à la vibration transmise par le premier nicol ou *polariseur*. Il en sera de même pour une lame cristalline uniaxe normale à l'axe optique, ou pour une lame biaxe perpendiculaire à l'un des deux axes optiques; car on sait que ces directions sont des lignes d'uniréfringence. Dans tout autre cas, l'interposition de la lame déranger la vibration extraordinaire issue du polariseur et en opère le partage entre les deux axes d'élasticité de la plaque, c'est-à-dire entre les deux axes de l'ellipse suivant laquelle le plan de la lame coupe l'ellipsoïde optique de la substance. Chacune de ces vibrations composantes donne, à son tour et pour son compte, une composante extraordinaire dans le second nicol, dit *analyseur*. Il y a donc rétablissement partiel de la lumière.

Mais si l'on fait tourner la lame cristalline dans son plan, il arrive un moment où ses axes d'élasticité deviennent parallèles aux sections principales des nicols croisés. En cet instant, la décomposition de la vibration incidente ne peut plus s'opérer et l'obscurité se rétablit. Donc, en général, toute lame biréfringente, tournant dans son plan, entre nicols croisés, *s'éteint quatre fois* pour une rotation de 360 degrés, en passant quatre fois, dans les intervalles, par un maximum d'éclairement.

Pince à tourmalines. — Le résultat que fournissent les nicols peut être obtenu d'une manière moins parfaite, mais plus simple, avec la *pince à tourmalines*. C'est une pince terminée par deux montures circulaires, percées d'œillets occupés par deux plaques de tourmaline brune ou verte, entre lesquelles on interpose la lame biréfringente à étudier. La tourmaline absorbe si fortement les vibrations ordinaires, qu'une plaque très peu épaisse de cette substance (surtout si elle est taillée parallèlement à l'axe) ne laisse plus passer que des vibrations extraordinaires. C'est

donc, à volonté, un polariseur ou un analyseur. Seulement la coloration très tranchée de la tourmaline affaiblit beaucoup les images.

§ 4

FIGURES D'INTERFÉRENCE DES CRISTAUX.

Principe de l'interférence. — Lorsqu'une lame cristalline est éclairée par de la lumière convergente et préalablement polarisée, on constate qu'il peut y avoir, au sortir de la lame, émergence, suivant une même direction, de deux rayons polarisés à angle droit et qui, ayant suivi dans la lame des chemins inégaux, les ont d'ailleurs parcourus avec des vitesses inégales. Il y a donc entre ces rayons, par le fait de la traversée de la lame, une certaine différence de marche, et, comme ils sont issus d'une même lumière déjà orientée, ils pourraient *interférer*, si leurs vibrations n'étaient pas à angle droit. En les recevant sur un *analyseur*, qui ne laisse passer, de chacune des vibrations, que les composantes parallèles, sans rien changer d'ailleurs à la différence de marche acquise dans le cristal, on rend l'interférence possible. On obtient, de cette manière, des images qui offrent un intérêt particulier dans deux cas, que nous examinerons successivement.

Figure des cristaux uniaxes. — Le premier est celui des cristaux uniaxes, taillés normalement à l'axe optique. Entre les nicols croisés, avec une lumière simple, l'image se compose d'une série d'anneaux circulaires, alternativement clairs et obscurs, et de plus en plus serrés à mesure qu'on s'éloigne du centre. Ces anneaux sont traversés par une croix noire, dont les branches sont parallèles aux deux sections principales des nicols.

La forme exactement circulaire des anneaux s'explique sans peine, tout étant symétrique autour de l'axe optique et l'obscurité du centre est la conséquence forcée de l'absence de biréfringence dans la direction de l'axe. L'intensité des anneaux noirs est constante à la même distance du centre et celle des anneaux clairs va en croissant depuis les branches de la croix jusqu'aux bissectrices de leurs angles (fig. 146).

Entre les nicols parallèles, on observe une croix blanche, traversant un système d'anneaux clairs d'intensité constante et

d'anneaux obscurs dont l'intensité augmente depuis les branches de la croix jusqu'à 45 degrés (fig. 147).

Avec la lumière blanche, l'extinction des diverses radiations ne se faisant pas à la même place, les extinctions annulaires s'échelonnent et ainsi, à la place des anneaux noirs, on obtient des

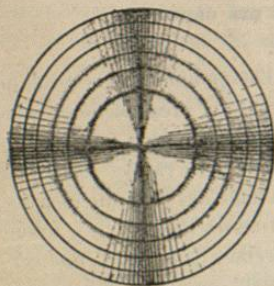


Fig. 146.

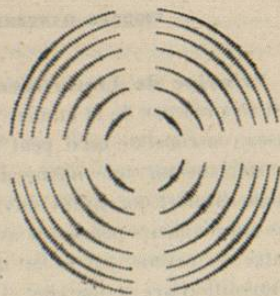


Fig. 147.

cercles également colorés, ou *isochromatiques* (voir la planche à la fin de l'ouvrage). Chaque bande uniformément colorée représente le résultat de la suppression, dans la lumière blanche, de celle des radiations qui eût été seule éteinte à cette place.

Les cercles isochromatiques sont d'autant plus serrés que la substance est plus biréfringente et aussi que la lame est plus épaisse. A partir d'une certaine épaisseur, les extinctions se superposeraient si bien qu'on aurait simplement une lumière blanche affaiblie.

Figure des cristaux biaxes. — S'il s'agit d'une lame biaxe, il faut la tailler perpendiculairement à la bissectrice aiguë de l'angle des axes optiques, ce qui permet, quand cet angle n'est pas trop grand, de recevoir en même temps, dans l'œil, des rayons ayant cheminé suivant la direction des deux axes. Alors, en lumière simple, ces rayons sont marqués par des points noirs, devenant les centres de deux systèmes d'anneaux non circulaires, qui tendent à se souder sous forme de courbes en 8 ou lemniscates (fig. 148).

Si, les nicols étant croisés, le plan des deux axes optiques coïncide avec une de leurs sections principales, l'image est traversée par une croix noire, dont la branche perpendiculaire au plan

des axes est très dilatée. Si le plan des axes est à 45 degrés des sections principales, les deux systèmes d'anneaux sont traversés par des hyperboles noires symétriques, qui passent en s'aminçissant par les traces des axes (fig. 149).

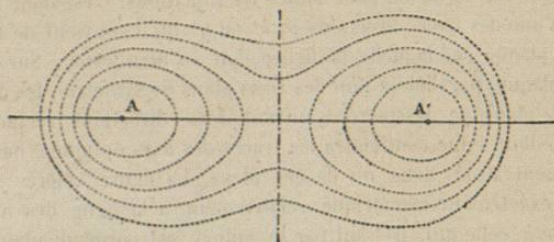


Fig. 148.

En lumière blanche, les anneaux noirs se transforment en anneaux colorés, qui ne sont plus isochromatiques et les hyperboles prennent aussi une coloration, mais moins marquée (voir la planche à la fin de l'ouvrage).

Au lieu d'appliquer un microscope polarisant à l'étude des phénomènes d'interférence, on peut se servir de la pince à tourmalines. En l'approchant très près de l'œil, on reçoit des rayons venant de tous les points de l'espace et les lentilles de l'œil font l'office de l'appareil de convergence. Seulement les images sont affaiblies à cause de la coloration de la tourmaline.

La figure d'interférence des cristaux biaxes est employée à la mesure de l'angle que font entre eux les axes optiques. Mais nous n'insisterons pas ici sur les dispositions à l'aide desquelles on procède à cette mesure.

Divers modes de dispersion. Dispersion des axes. — La figure d'interférence d'une lame biaxe, normale à la bissec-

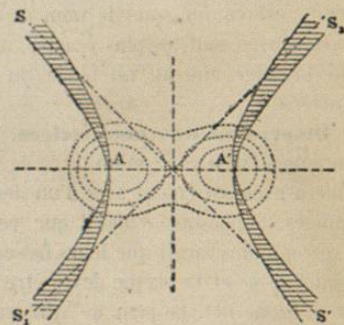


Fig. 149.

trice aiguë de l'angle des axes, varie, quand on emploie la lumière blanche, suivant le degré de symétrie des cristaux.

S'il s'agit de substances rhombiques, la bissectrice aiguë coïncide toujours avec l'un des trois axes binaires; de plus, elle est généralement la même pour toutes les radiations. C'est donc suivant l'une des trois directions p , h^1 ou g^1 qu'il convient de tailler la plaque sur laquelle la figure doit se manifester. Sur une telle plaque, parallèle à l'un des trois plans de symétrie, les deux autres plans se dessineront suivant deux directions rectangulaires, dont l'une contiendra les traces des axes optiques, nécessairement situés dans un de ces plans. La figure colorée sera donc exactement symétrique relativement à la ligne des axes, comme à celle qui, passant par le milieu, est perpendiculaire à la première. Mais l'angle des axes optiques du rouge n'étant pas le même que celui des axes violets, les extinctions de ces deux couleurs ne se feront pas aux mêmes distances du centre. Par suite, un anneau donné pourra être intérieurement frangé de rouge du côté du centre et de bleu du côté opposé. Ce phénomène est connu sous le nom de *dispersion des axes*. Tantôt les axes rouges sont les plus écartés, auquel cas la frange intérieure du premier anneau est bleue du côté du centre; tantôt c'est l'inverse.

Dispersion des bissectrices. — Avec les cristaux monocliniques, il n'y a qu'un axe de symétrie. Sa direction coïncidera nécessairement avec l'un des trois axes de l'ellipsoïde des indices. Supposons d'abord que ce soit l'axe moyen. Alors les axes optiques, ainsi que leurs bissectrices, seront dans le plan de symétrie g^1 et la plaque devra être taillée suivant l'une des faces de la zone ph^1 . Le plan de symétrie g^1 s'y profilera suivant une ligne droite, contenant les traces des axes optiques et qui sera certainement une ligne de symétrie pour la figure. Mais les bissectrices aiguës des diverses radiations, toutes situées sur cette ligne, ne coïncideront pas ensemble. Il y aura donc, outre la *dispersion des axes*, c'est-à-dire l'inégale valeur de leurs angles, une *dispersion des bissectrices* aiguës, se traduisant par ce fait, que les anneaux de droite, par exemple, pourront différer de forme et de grandeur des anneaux de gauche. Les lignes qui réunissent les points homologues des anneaux de droite et de gauche sont alors inclinées, relativement à la trace, supposée

horizontale, du plan g^1 . D'où le nom de *dispersion inclinée*.

Si l'axe de symétrie fait fonction de bissectrice obtuse, cela veut dire que la bissectrice aiguë est située dans le plan g^1 ; mais alors le plan des axes optiques, qui doit contenir les deux bissectrices, est un plan normal à g^1 et faisant partie de la zone ph^1 . C'est encore suivant cette zone que la lame doit être taillée et le plan g^1 s'y profile suivant une ligne droite, qui est pour la figure d'interférence une ligne de symétrie. Seulement les axes et les anneaux se placent, à droite et à gauche de cette ligne, supposée verticale, à des hauteurs et à des distances variables. Il y a donc identité de couleurs, à la même distance de la trace de g^1 , sur des lignes horizontales; mais il n'en est pas de même suivant des lignes verticales: c'est la *dispersion horizontale*.

Enfin, si l'axe de symétrie fait fonction de bissectrice aiguë, les axes optiques sont simplement assujettis à se trouver sur des plans passant par cet axe et faisant, par conséquent, partie de la zone ph^1 . C'est suivant g^1 qu'il faudra tailler la lame, et l'axe s'y projetant en un point, qui sera le centre de la figure, tout sera symétrique *relativement à ce point seulement*. Il n'y aura pour la figure aucune ligne de symétrie, horizontale ou verticale, passant par ce point. C'est la *dispersion croisée* ou *tournante*.

Quant aux cristaux tricliniques, comme rien n'y règle à l'avance la position d'aucun des axes de l'ellipsoïde, la figure offrira une sorte d'enchevêtrement des divers genres de dispersion déjà mentionnés. L'expérience seule pourra faire connaître la direction suivant laquelle on doit tailler la lame.

§ 5

POLARISATION ROTATOIRE. POLARISATION CHROMATIQUE.
POLYCHROISME.

Définition du pouvoir rotatoire. — La règle relative à la figure d'interférence des cristaux uniaxes est en défaut avec certaines substances, telles que le quartz. Lorsqu'une lame de quartz, taillée normalement à l'axe optique (c'est-à-dire parallèlement à la base a^1 du prisme vertical e^2), est placée entre les nicols croisés, elle rétablit le passage de la lumière et, pour obtenir l'obs-

curité (avec une lumière simple), il faut tourner l'analyseur d'un certain angle, tantôt à droite, tantôt à gauche. Cela tient à ce que le quartz, à partir d'un minimum d'épaisseur, possède la propriété de *tourner le plan de polarisation*. La vibration issue du polariseur est donc déviée quand elle parvient à l'analyseur, et il faut alors tourner ce dernier de telle manière que sa section principale devienne perpendiculaire à la nouvelle direction de la vibration. Tel est le phénomène connu sous le nom de *polarisation rotatoire*.

Si l'on emploie de la lumière blanche, les angles de rotation diffèrent tellement, pour les diverses radiations, qu'il est impossible, entre les nicols croisés, de rétablir l'extinction. L'angle dont il faudrait tourner, pour éteindre les rayons jaunes, par exemple, permettrait encore le passage d'une notable quantité de rayons rouges et de rayons violets. Aussi le centre de l'image d'interférence du quartz est-il toujours coloré, d'une couleur qui dépend de l'épaisseur de la plaque. L'image, entre nicols croisés, se compose d'un centre coloré, qu'entourent des anneaux isochromatiques, interrompus par deux branches de croix qui ne se rejoignent pas au milieu, la polarisation rotatoire ne se produisant que pour la direction de l'axe optique.

Cristaux dextrogyres, lévogyres. — Certains cristaux de quartz tournent le plan de polarisation à droite et sont dits *dextrogyres*. D'autres le tournent à gauche et sont dits *lévogyres*. Un cristal est lévogyre quand il porte les faces rhombes et plagiédres en bas à gauche d'une face *p* (fig. 150). La superposition de deux quartz, l'un dextrogyre, l'autre lévogyre, dans le microscope polarisant ou la pince à tourmalines, fait naître, au centre de l'image, quatre branches noires en spirales, dites *spirales d'Airy*.

La théorie indique que la polarisation rotatoire appartient en propre aux substances dont la molécule n'a ni centre ni plans de symétrie, mais qu'elle peut aussi se produire, si l'on empile régulièrement, en les croisant sous un certain angle, des lames de cristaux biaxes.

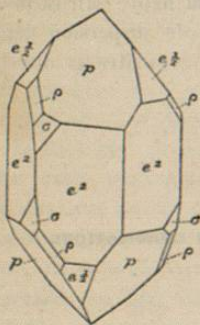


Fig. 150.

Polarisation chromatique. — Quand une lame cristalline biréfringente et très mince est placée entre les nicols croisés et éclairée par des rayons normaux, les deux rayons engendrés par la biréfringence ne se séparent pas à la sortie, vu la minceur de la plaque. Mais comme ils ont cheminé avec des vitesses inégales, il s'est introduit entre eux une différence de marche, qui peut amener une interférence. L'analyseur, en ne laissant passer de ces deux rayons que les composantes extraordinaires, permet à l'interférence de se manifester.

Ainsi, pour toute plaque mince, suivant sa biréfringence et le sens dans lequel elle a été taillée, il y a une radiation qui est mieux éteinte que les autres. Lors donc qu'on emploie, non plus de la lumière simple, mais la lumière blanche, la plaque se colore, entre les nicols croisés, de la teinte qui convient à l'extinction de la radiation pour laquelle il y a interférence. Tel est, en gros, le phénomène de la *polarisation chromatique*. Ce phénomène rend de grands services pour l'étude des roches; car, pour les rendre accessibles à l'observation microscopique, il faut les éclairer par transparence et, par suite, on est forcé de les amener à un tel degré de minceur que toutes les couleurs propres des minéraux disparaissent. Mais alors, entre les nicols croisés, une telle plaque se colore de teintes parfois très vives et très contrastantes, dont chacune dépend de la nature, de l'épaisseur et de l'orientation du minéral rencontré par la surface de la plaque.

Coloration des cristaux. — Beaucoup de cristaux présentent une coloration, due à la présence de matières étrangères, oxydes métalliques, hydrocarbures, etc., disséminés en très faible quantité dans leur masse. Cette dissémination, dans les cristaux homogènes, est d'ailleurs en rapport avec le mode de distribution des particules cristallines; c'est-à-dire qu'elle est régulièrement ordonnée.

Quelle que soit d'ailleurs la cause de la couleur des cristaux, cette couleur dépend d'un phénomène d'*absorption*. D'une part, l'ensemble des radiations lumineuses est plus ou moins affaibli, ce qui, suivant les cas, engendre la distinction des corps en *transparents*, *translucides* et *opaques*. D'autre part, l'absorption peut peser également ou inégalement sur les diverses radiations, ce qui fait naître les corps *incolorés* et les corps *colorés*.

Dans les corps isotropes colorés, l'absorption, qui engendre la

couleur, ne dépend que de l'épaisseur traversée et nullement de la direction des vibrations. Des plaques de même épaisseur, taillées en sens quelconque dans un même morceau d'un corps isotrope homogène et éclairées normalement, offriront toutes la même coloration.

Polychroïsme. — Il n'en saurait être de même pour les corps anisotropes. L'absorption y varie, pour une même épaisseur, avec la vitesse de propagation des vibrations, vitesse variable, comme on sait, suivant la direction. Ainsi les deux rayons, auxquels donne lieu la biréfringence, ne se propageant pas aussi vite l'un que l'autre, sont inégalement absorbés, et cette différence d'absorption change suivant le sens des vibrations. Pour chaque direction des rayons transmis, l'œil perçoit une couleur qui résulte de la combinaison des deux absorptions propres aux deux rayons réfractés. Il peut arriver que les teintes ainsi perçues diffèrent sensiblement les unes des autres. Tel est le cas de la cordiérite ou dichroïte, dont un cristal donné se montre d'un beau bleu dans un certain sens, d'un bleu pâle dans une autre direction perpendiculaire à la première et d'un gris jaunâtre dans une troisième direction, à angle droit sur les deux autres. Ce phénomène a reçu le nom de *dichroïsme*. Mais c'est en réalité un *polychroïsme*, car il y a autant de nuances que de directions de transmission. Seulement ces nuances, composées par la combinaison de deux absorptions, sont rarement assez différentes pour qu'on s'en aperçoive à l'œil nu. Pour les mettre en évidence, on se sert de l'appareil appelé *loupe dichroscopique*. Cet appareil isole, mais en les juxtaposant, les deux images d'une même ouverture, aperçues à travers un cristal biréfringent, et permet d'apprécier la plus petite différence dans leur coloration.

Il faut remarquer que le polychroïsme n'a rien de commun avec la *double coloration* que présentent certaines substances. Ainsi la fluorine est souvent verte par *réflexion* et bleue par *transmission*. On comprend la différence de ce fait avec le vrai polychroïsme, uniquement fondé sur ce que la différence d'absorption des deux rayons réfractés varie avec la direction qu'ils suivent.

CHAPITRE DEUXIÈME

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DIVERSES. GROUPEMENTS CRISTALLINS. CRISTALLOGÉNIE

§ 1

ACTION DES PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES, DE LA CHALEUR ET DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES CRISTAUX.

Cohésion, Clivage. — De même que les propriétés optiques, toutes les propriétés physiques, quelle qu'en soit la nature, sont ordonnées, dans les cristaux, conformément au degré de symétrie. Seulement, il en est plusieurs dont la distribution est, si l'on peut s'exprimer ainsi, plus délicate que celle de l'élasticité optique et se représente par une surface plus compliquée qu'un ellipsoïde.

De ce nombre est la *cohésion*. Tandis qu'un cristal cubique offre les mêmes propriétés optiques suivant toutes les directions, la cohésion, évaluée par la résistance à la rupture, n'a pas partout la même valeur dans un cristal de ce système. Elle peut être double, pour la direction d'un axe ternaire, de ce qu'elle est pour celle des arêtes cubiques.

Les directions de moindre cohésion, dans un cristal, déterminent la production des plans de *clivage*, c'est-à-dire de ceux suivant lesquels s'opère la séparation des cristaux en lames planes, sous le choc ou sous l'effort d'un outil tranchant. Toujours ces directions sont coordonnées à la symétrie du cristal et, de plus, on remarque que leur distribution est, en général, la plus simple qu'on puisse imaginer. C'est ainsi, par exemple, que, dans les cristaux cubiques, le clivage *p* est de beaucoup le plus fréquent; ensuite vient *b*¹; *a*¹ est sensiblement plus rare. On peut donc dire que ces cristaux présentent, pour la cohésion, le plus petit nombre de maxima et de minima que comporte leur degré de symétrie. Il en est de même, d'ailleurs, pour les autres

systèmes, où les combinaisons les plus simples sont aussi les plus fréquentes.

Faces de glissement. — En dehors des phénomènes de clivage, certains cristaux, soumis à des effets mécaniques, laissent apparaître, dans leur intérieur, des faces planes miroitantes. appelées faces de glissement. M. Reusch a montré qu'un cristal de spath d'Islande étant comprimé dans une direction perpendiculaire à l'une des faces du prisme d^1 , on y voit naître des plans de glissement parallèles au rhomboèdre inverse b^1 . De son côté, M. Baumhauer a fait l'expérience suivante : un prisme de clivage de calcite étant posé horizontalement sur l'une de ses arêtes, si,



Fig. 151.

sur l'arête opposée, on appuie normalement la lame d'un canif, il vient un moment où le cristal cède comme une substance plastique; alors, toute la partie séparée par l'outil, intérieurement limitée par une face parallèle à b^1 , s'incline en sens inverse de l'autre en produisant un angle rentrant (fig. 151), et cette portion possède désormais une orientation

optique et cristallographique inverse de celle qui est demeurée fixe. Ainsi la pression a dû entraîner une rotation des molécules.

Dureté. — C'est aux mêmes lois qu'obéit la distribution de la dureté dans les cristaux.

Cette propriété est la résistance qu'un corps oppose à l'action d'un outil tendant à entamer sa surface. La dureté des cristaux peut être appréciée, tantôt avec une pointe d'acier trempé, tantôt avec une arête d'un cristal de dureté connue. On fait naître ainsi, à la surface des cristaux, des stries ou rayures, qui se produisent avec plus ou moins de facilité suivant les espèces. En tout cas, il faut toujours avoir soin d'opérer sur une face plane bien nette, de peur de prendre pour des rayures les traces qu'un outil peut laisser en désagrégeant des éléments cristallins mal unis entre eux, comme les parties d'un cristal fendillé, par exemple. De plus, il faut s'assurer que la rayure persiste après nettoyage de la face, car souvent des apparences de rayures sont dues à ce que l'outil est lui-même attaqué par le cristal, sur lequel il laisse une trace, comme celle qu'un marteau abandonne après le choc sur un bloc de grès dur.

La dureté des minéraux est un élément important de leur détermination spécifique. Il y a longtemps que Mohs a constitué une échelle de duretés, comprenant dix termes successifs, dont chacun raye celui qui le précède et est rayé par celui qui le suit. En voici l'énumération :

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. Talc. | 6. Orthose. |
| 2. Gypse ou sel marin. | 7. Quartz. |
| 3. Calcite. | 8. Topaze ou émeraude. |
| 4. Fluorine. | 9. Corindon. |
| 5. Apatite. | 10. Diamant. |

Les deux premiers termes représentent des minéraux qui se rayent à l'ongle. Les numéros 3 à 5 sont rayés par une pointe d'acier. La dureté du numéro 6 surpasse un peu celle du verre à vitres. A partir de 7 les minéraux rayent nettement le verre. Lorsqu'un minéral est rayé par l'apatite, tandis qu'il raye la fluorine, on dit que sa dureté est égale à 4,5.

Bien entendu, l'échelle de Mohs n'est pas rigoureusement proportionnelle; il n'y a pas la même distance entre les différents termes et, en particulier, la différence de dureté est beaucoup plus grande entre 9 et 10 qu'entre 4 et 5. Néanmoins cette échelle suffit aux besoins des minéralogistes et tout essai de l'enrichir n'aurait pour résultat que d'en rendre l'emploi moins facile.

Quand on veut mesurer avec beaucoup d'exactitude l'effort nécessaire pour rayer une surface cristalline, on se sert d'instruments particuliers, appelés scléromètres.

L'emploi de ces instruments révèle un certain nombre de particularités, dont plusieurs montrent que la dureté est une propriété *sui generis*, qu'il ne faudrait nullement confondre avec la cohésion. C'est ainsi que la dureté ne varie, suivant les faces, que dans les cristaux susceptibles de se cliver et que toujours le minimum de dureté se produit sur les faces de clivage. De plus, sur certaines faces, par exemple sur les faces p des rhomboèdres de calcite, la dureté est plus grande si l'on suit la diagonale culminante d'un angle a vers l'angle e opposé que si l'on marche en sens inverse.

On peut, par des expériences au scléromètre, construire les courbes de dureté qui conviennent, pour chaque espèce, à des faces cristallines déterminées. La figure 152 représente une telle