Polarisation de la lumière et optique cristalline

Bernard Maitte
Professeur émérite à l'Université de Lille 1, Sciences et Technologies

1690, Christiaan Huygens publie son *Traité de la lumière*. Il y explique par une théorie géométrique l'émission, la propagation rectiligne, la réflexion, la réfraction de la lumière : celle-ci serait constituée par des ondes se propageant dans un milieu très subtil emplissant l'espace, *l'éther*. La réfraction serait due à un ralentissement des ondes passant, par exemple, de l'air à l'eau. Huygens rend compte aussi d'une curieuse propriété que présentent les cristaux de calcite : ils dédoublent les images sur lesquelles ils sont posés (figure 1). L'une suit les lois de la réfraction, est dite *ordinaire*, l'autre, *extraordinaire*, non. Cette *biréfringence*, Huygens le mesure très précisément, est liée aux formes géométriques du cristal.

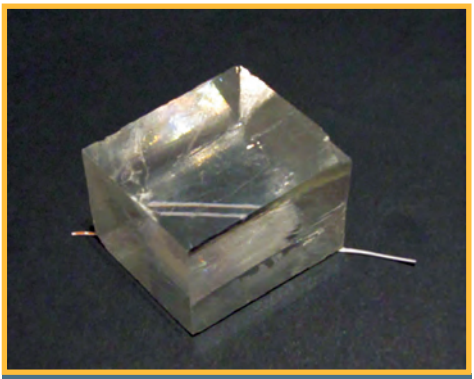

Figure 1 : Biréfringence de la calcite.

Comment expliquer cette relation ? Huygens infère que toutes les propriétés physiques symétriques de la calcite sont dues à l'empilement de petites molécules invisibles, empilées symétriquement. Mieux, de sa conjecture, il infère quelles biréfringences doit avoir le cristal dans telle ou telle direction, déduit que le quartz et le mica doivent eux aussi dédoubler les images, conséquences qui n'avaient jamais été observées et qu'il met en évidence. Sa théorie est explicative et prédictive. Un fait intrigue cependant Huygens : quand il superpose deux calcites, la première transmet deux rayons lumineux, la seconde, qui les reçoit, en transmet quatre. Mais ces quatre rayons n'ont pas la même intensité. Plus, quand il tourne la seconde calcite dans

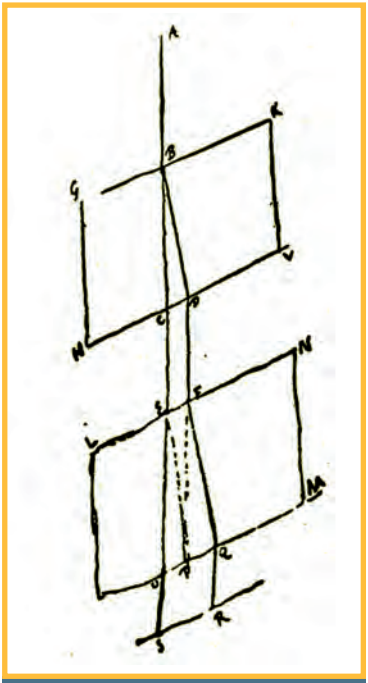

Figure 2 :
les doutes de Christiaan Huygens, une seconde calcite peut ne pas dédoubler les rayons incidents.

son plan, les intensités des rayons varient et peuvent devenir nulles : deux fois par tour, deux des rayons s'éteignent (figure 2). «*Quant à expliquer ce fait, je n'ai rien trouvé qui me satisfasse*» écrit Huygens.

1703, après la mort de Huygens, Isaac Newton publie son *Optique*. Il y accumule expériences et démonstrations et fait de la lumière des corpuscules qui se propagent dans un espace vide. Réflexion, réfraction, dispersion… sont expliquées par l'action de forces qui agissent sur des masses. Comme il l'avait fait pour justifier la trajectoire de la Lune autour de la Terre, l'analyse mathématique permet à Newton de préciser les trajectoires que suit la lumière : le calcul lui montre que, contrairement à ce qu'avait déduit la théorie ondulatoire, la réfraction lors du passage air–eau correspond à une augmentation de vitesse dans ce milieu. Ce n'est pas la seule divergence qui apparaît : au sujet de la calcite, Newton cite la phrase où Huygens exprime son insatisfaction et déclare fausses toutes les mesures effectuées par le savant néerlandais. Pour sa part, il croit pouvoir dire, sans le justifier, que l'extinction des rayons pourrait être due à ce que les corpuscules lumineux possèdent des formes géométriques. Le succès de la gravitation universelle fait que cette divergence sombre dans l'oubli et que les positions de Newton triomphent.

1802, un Britannique, William Hyde Wollaston, reprend les expériences sur la calcite. Extrêmement surpris, il constate que toutes les mesures de Huygens sont justes, celles de Newton fausses. En France, René Just Haüy confirme ces conclusions. Les physiciens s'intéressent à nouveau à la biréfringence. En 1808, l'Académie des sciences offre un prix *à qui en donnera une théorie mathématique vérifiée par l'expérience*. Étienne Louis Malus reprend toutes les expériences, en ajoute d'autres. C'est surtout l'extinction des rayons par la seconde calcite qui retient son attention. Il en multiplie les variantes, en vient à regarder la lumière réfléchie par les vitres du Palais du Luxembourg au travers d'une calcite :

le rayon est dédoublé, mais, lorsqu'il tourne le cristal, il a la grande surprise de voir l'un des rayons s'éteindre, réapparaître quand le second faiblit. La même propriété se manifeste donc lorsqu'une calcite reçoit de la lumière réfléchie ou de la lumière doublement réfractée. Personne n'avait constaté qu'une simple réflexion modifie les caractéristiques de la lumière : Malus se consacre entièrement à ce fait nouveau.

Ses expériences, menées jour et nuit, alors avec des chandelles, lui apprennent qu'il faut une incidence précise ***i*** sur un miroir pour que le rayon réfléchi soit ensuite éteint par une calcite ; que s'il remplace ce cristal par un second miroir, celui-ci éteint le rayon qu'il reçoit si l'angle d'incidence est ***i*** et que son plan d'incidence est perpendiculaire à celui du premier miroir. Voici mises en évidence des régularités géométriques qui doivent avoir une raison géométrique, pense Malus : il reprend les conjectures de Newton et attribue aux corpuscules de lumière des formes, explique la réflexion par l'action de forces.

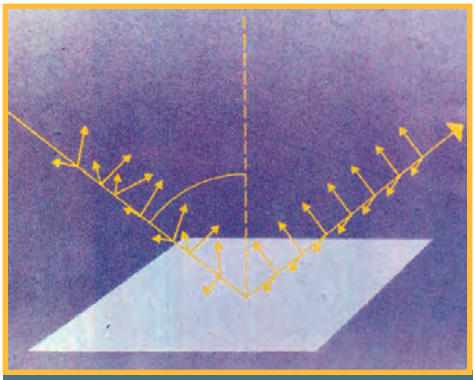

Figure 3 :
Réflexion sous l'angle ***i***

Une réflexion sous l'angle ***i*** laisserait passer ceux des corpuscules qui auraient une certaine orientation, une seconde réflexion sur un miroir identique aurait la même propriété (figure 3). Si les plans d'incidence sont perpendiculaires, le second miroir ne pourrait laisser passer que des corpuscules à orientations perpendiculaires à ceux que laisse passer le premier… qu'il ne reçoit pas : il y a extinction. Une explication analogue est donnée pour la double réfraction, avec deux types de forces orientant les corpuscules. Malus décrit donc le phénomène en ayant recours à des corpuscules lumineux qu'il caractérise par les orientations de leurs pôles par rapport aux trois axes de l'espace : il appelle *polarisation de la lumière* la nouvelle propriété observée, du nom de l'explication fournie…

Les physiciens s'intéressent à ce nouveau phénomène, multiplient les expériences. En 1811, François Arago regarde une lame mince transparente de mica au travers d'une calcite. Il voit deux images qui se recouvrent partiellement. L'une est verdâtre, l'autre pourpre, des couleurs complémentaires. Lorsqu'il modifie les orientations de la calcite ou du

mica, les couleurs des teintes varient, tout en restant complémentaires. Il appelle *polarisation colorée* ce phénomène qu'il n'explique pas. C'est Jean-Baptiste Biot qui va développer une théorie analytique des phénomènes. Ses nombreuses expériences lui apprennent que les couleurs observées sur divers cristaux varient avec la nature de ceux-ci, leurs orientations, les épaisseurs traversées (figure 4). En cinq années de dur labeur, il relie ces couleurs à celles qu'avait décrites Newton sur les bulles de savon, les explique en considérant que, non seulement un cristal oriente les pôles des corpuscules lumineux, mais les met en vibrations. Ces vibrations conserveraient les orientations, seraient perpendiculaires à la direction de propagation du rayon lumineux, sinusoïdales et pourraient ou se renforcer ou se contrarier. Toutes ces conjectures expliquent les observations effectuées, mais supposent que les cristaux génèrent des forces pouvant mettre en vibration, dès leur entrée dans la lame, des corpuscules lumineux se propageant à, au moins, 300 000 km/s…

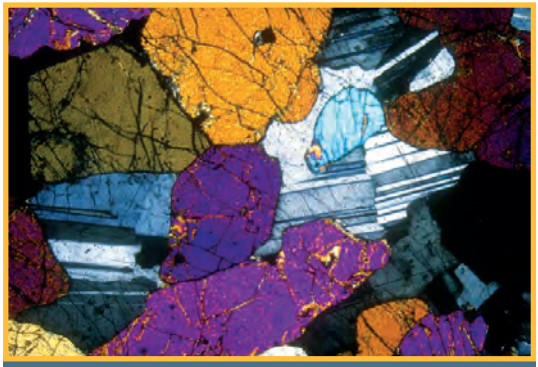

Figure 4 :
Polarisation chromatique des cristaux

Cette invraisemblance n'échappe pas à Arago, lui qui commence à douter de l'ensemble de la physique newtonienne : si elle explique bien le mouvement des astres et la mécanique, elle rencontre des difficultés en électricité, en magnétisme, dans les phénomènes de chaleur, où elle est obligée d'introduire des substances sans poids.

En 1814, Arago reçoit d'un ancien polytechnicien, Augustin Fresnel, un mémoire soutenant la théorie des ondes, la justifiant par le fait que la lumière, comme une onde, peut contourner les objets, peindre des couleurs à l'intérieur et à l'extérieur des ombres géométriques : c'est ce que l'on appelle *diffraction*. Arago encourage Fresnel, lit ses travaux à l'Académie des sciences : elle offre un prix à qui expliquera cet effet. Fresnel l'obtient pour un mémoire qui décrit de très nombreuses expériences exprimées mathématiquement et en rend compte par la composition d'ondes sinusoïdales. Elles expliquent propagation rectiligne, réflexion, réfraction, dispersion, biréfringence, diffraction, interférences (découvertes un peu plus tôt par Thomas Young). Pas un mot sur la polarisation de la lumière : c'est le seul effet lumineux qui résiste.

Arago et Fresnel vont travailler ensemble. Ils multiplient les expériences, découvrent de nombreuses propriétés de la polarisation, généralisent la polarisation colorée des cristaux, la relient à la symétrie du cristal, en font une méthode de détermination des espèces minérales. Le tout sans explication. Toutes les propriétés mises en évidence impliquent des caractéristiques perpendiculaires à la direction des rayons. Fresnel décide de sauter le pas. Une onde est toujours associée à des vibrations. Arago et Fresnel avaient toujours supposé que celles-ci étaient dans la direction du rayon, longitudinales, comme celles du son. Fresnel les suppose transversales (1821). Arago déclare : «*Je ne vous suis plus dans vos acrobatie.*» Pourquoi cette opposition ? Les calculs mathématiques ne sont pas modifiés (composition d'ondes sinusoïdales), les vibrations se feraient dans la même direction que celle des corpuscules de Biot, ce qui traduit la symétrie du phénomène. Oui, mais en physique, des vibrations longitudinales se produisent dans des milieux fluides (l'air, l'eau, l'éther), des vibrations transversales ne peuvent se propager que dans des milieux analogues à de la gelée visqueuse. Toutes les propriétés de la lumière sont expliquées par l'hypothèse des vibrations transversales, mais il faut alors supposer que la Terre circule dans un éther visqueux sans rencontrer de résistance à son mouvement. «*C'est que tout l'éther passe librement au travers de la Terre*» ose proposer Fresnel.

Arago repense alors à la vitesse de la lumière, plus lente dans l'eau selon la théorie ondulatoire, plus rapide selon la théorie corpusculaire. Il suggère d'effectuer cette mesure, ce qui devient possible à cette époque de perfectionnement des instruments de mesure. En 1849, Léon Foucault et Hyppolyte Fizeau montrent que la lumière va plus lentement dans l'eau que dans l'air, qu'elle est donc ondulatoire. Il va falloir se pencher sur les curieuses propriétés de l'éther. Cela se fera lentement : avec la théorie électrodynamique de la lumière (1873), James Clerk Maxwell le réduira à un simple support, support qui perdra toutes ses propriétés et sera rejeté par Albert Einstein dans la théorie de la Relativité restreinte (1905), mais ceci est une autre histoire…

B. M.

Pour en savoir plus :

Bernard MAITTE, ***Histoire de l'arc-en-ciel*****,** Paris, Seuil, Science-Ouverte, (2005)

Bernard MAITTE, ***Histoire des cristaux*****,** Paris, Hermann, (2014)

Bernard MAITTE, ***Une histoire de la lumière de Platon aux photons*****,** Paris, Seuil, Science-Ouverte, (2015)