

Une histoire de l'optique géométrique : quelques jalons.

2) La lumière est-elle ondes ou corpuscules ?

Bernard Maitte(*)

Dans un premier article, nous avons présenté la naissance de l'optique géométrique. Nous montrons ici l'évolution des idées dans ce domaine, de Christiaan Huygens et Isaac Newton à nos jours. Le premier élabore la première théorie ondulatoire géométrisée de la lumière, le second lui oppose une théorie corpusculaire qu'il intègre à sa gravitation universelle, exprimée grâce à l'analyse. Dès lors, débats et controverses se succèdent ; chacune des conceptions prend tour à tour l'avantage sur l'autre, ce qui amène, au cours des XVIIIème et XIXème siècles, à des formulations de plus en plus précises des deux théories.

Christiaan Huygens et la théorie ondulatoire de la lumière.

Nous avons vu que Christiaan Huygens (1629-1695) partage avec Descartes la conception d'un monde plein, empli d'éther, mais s'oppose aux « romans » et comparaisons de son illustre maître en ce qu'il veut bâtir une théorie géométrique de la lumière rigoureuse capable d'expliquer tous les faits observés et en prévoir de nouveaux, selon les principes adoptés par la science moderne. Il commence par remarquer que deux rayons lumineux peuvent se propager dans la même direction en sens contraires sans s'affaiblir. Pour lui, ce fait permet de rejeter définitivement toute théorie corpusculaire (les corpuscules se heurteraient, déviaient de leur trajet). Il cherche alors les moyens d'expliquer rigoureusement l'optique géométrique, grâce à une concordance entre les observations et les prévisions que permet une théorie ondulatoire de la lumière.

Il commence par remarquer que les sources lumineuses sont les lieux d'une agitation intense : les chocs engendrés par ces mouvements heurtent les particules d'éther, se propagent dans toutes les directions. À partir de cette propagation d'ondes sphériques auxquelles les rayons lumineux sont perpendiculaires, à l'aide du crayon et du compas, Huygens peut rendre compte (1690) de la propagation rectiligne (fig. 9), de la dimension des ombres, de la réflexion, de la réfraction (en déduisant que la lumière va moins vite dans l'eau que dans

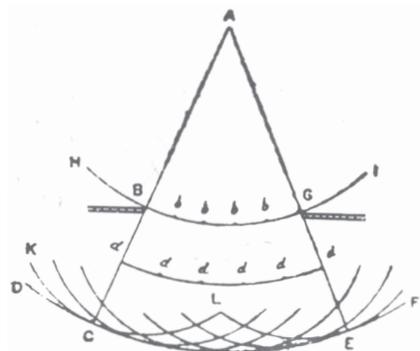


Figure 9

(*) Professeur émérite à l'université de Lille, 1 sciences et technologies.

l'air, comme l'avait supposé Fermat). Il explique aussi les mirages, cette fois par une propagation anisotrope des ondes en fonction de la teneur en eau de l'atmosphère. Étendant cette anisotropie aux cristaux, il parvient à justifier très précisément un curieux phénomène qui vient d'être observé : la double réfraction de la calcite. Il relie la géométrie de cette propriété avec celle des formes extérieures du cristal, de ses clivages et, grâce à un raisonnement par symétrie, peut conjecturer que le cristal possède une structure interne (la cause de ces effets) elle-même symétrique⁽¹⁾. Dès lors, il postule que d'autres substances cristallisées (le quartz, le mica) doivent nécessairement présenter la biréfringence : il recherche celle-ci et l'observe. C'est, on le voit, une belle théorie ondulatoire de la lumière, précise, élégante en ce qu'elle relie, explique et rassemble des faits jusqu'alors disparates que Huygens parvient à formuler.

Attardons-nous sur l'explication que donne Huygens de la réfraction. Si une source O est supposée à l'infini, l'onde sphérique qui arrive sur une surface de séparation AB de deux milieux (air et verre) peut être considérée comme plane, confondue avec son plan tangent (fig. 10). Soit AC cette onde, associée au faisceau de rayons OA, OH, OC qui lui sont perpendiculaires. Au temps t l'onde touche AB en A, au temps t' le rayon OC arrive en B. Si les vitesses étaient les

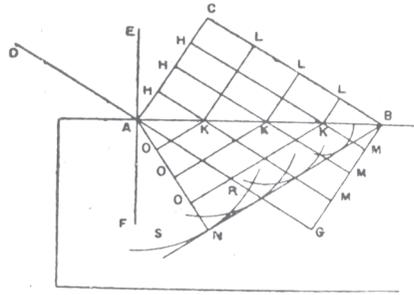


Figure 10

mêmes dans les deux milieux, l'onde serait en GB en t' . Comme la lumière va moins vite dans le verre (v') que dans l'air (v), entre t et t' , l'onde s'est propagée selon le cercle SR de centre A et de rayon $r = v' \cdot (t' - t)$; de même elle s'est propagée entre les temps t et t' (compris entre t et t') selon les cercles de rayons $r' = v \cdot (t' - t)$ et de centres K. Plus généralement, Huygens démontre que les lois de Descartes, $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ (où n_1 est l'indice du premier milieu, n_2 l'indice du second, i l'angle d'incidence OAE, r l'angle de réfraction FAN), sont vérifiées quand $v_1 = v/n_1$ et $v_2 = v/n_2$ (où v est la vitesse de la lumière dans l'éther). Il peut donc donner une manière de construire l'onde et le rayon réfractés et une évaluation précise de la vitesse de la lumière dans différents milieux, à une époque où l'on vient juste d'évaluer la vitesse de la lumière entre Jupiter et la Terre (Römer en 1676 a trouvé 215 000 km/sec, valeur qui s'avérera sous-estimée). Les prévisions de Huygens, conséquences obligatoires de sa théorie, seront à vérifier par des mesures précises dans l'eau, dans le verre et divers milieux, mesures inaccessibles alors.

Isaac Newton, la théorie corpusculaire de la lumière et le principe de Maupertuis.

« En ce qui concerne la lumière, Monsieur des Cartes n'a jamais rien écrit de

(1) Christiaan Huygens, *Traité de la lumière*, intro. de M. Blay, Paris, Dunod, 1992.

bon ». Celui qui se permet cette appréciation péremptoire, est un jeune homme de 23 ans, Isaac Newton (1643-1727). Dans la filiation de son maître, Robert Boyle, il postule que l'univers est vide, la lumière constituée de corpuscules, la matière d'atomes. En 1666, il donne une théorie des couleurs qui renverse 2000 ans d'histoire (le blanc est composé, les couleurs peuvent être homogènes) ; malgré six ans d'efforts et d'expériences soignées, il ne parvient pas à faire admettre sa position à la Royal Society, dominée par les tenants d'une lumière ondulatoire. En 1670, grâce à des calculs de géométrie infinitésimale qu'il met au point (il part de triangles égaux ou semblables et use d'une méthode combinant tradition et novation), il démontre pour un public de très peu d'étudiants, que les rayons qui émergent d'une goutte de pluie sont compris entre des limites : ceci lui permet d'expliquer les deux arcs aux couleurs inversées de l'arc-en-ciel, la bande sombre (dite d'Alexandre) qui se trouve entre eux ; Newton prévoit que l'on pourrait observer les arcs d'ordres 3, 4... : la vérification en sera faite au XVIIIème siècle.

En 1687, il publie ses *Principia mathematica...* dans lesquels il montre qu'une seule force, la gravité, agit à distance sur les corps : il peut ainsi réunir dans une même description la chute d'une pomme sur Terre et tous les mouvements des planètes, régis par les lois que Kepler avait données à partir des mesures de Tycho Brahé. Pour ce faire, il met au point le calcul infinitésimal (fig. 11), exprime par l'analyse les forces qui agissent sur les masses des corps en présence, en fonction inverse au carré de leur distance. En conclusion de son ouvrage, il étend ces lois à la lumière, explique ses effets par une théorie corpusculaire. Comme ces corpuscules traversent en ligne droite les milieux, tel le verre, il conclut que les solides sont faits de beaucoup plus de vide que de plein. Il rend compte de la réflexion et de la réfraction par l'action d'une force réfringente n'agissant qu'à proximité des surfaces de séparation de milieux différents, dirigée perpendiculairement à ces surfaces, « diversement mise en action » et qui courbe, sur un espace très petit, les trajectoires des corpuscules (fig. 12).

Quantitativement, il rend compte de la réfraction par une accélération de la lumière dans les milieux denses (elle se rapproche alors de la normale dans le verre) : $v' = n' \cdot c$, où n' est l'indice de réfraction d'un milieu, v' est la vitesse de la lumière dans ce milieu, c cette vitesse dans le vide. Il faudra confronter cette

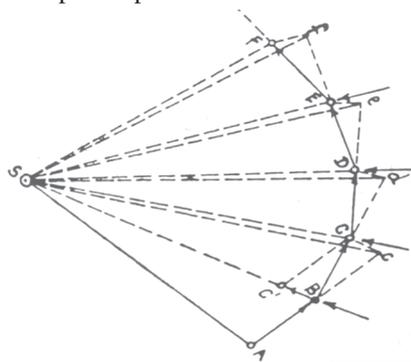


Figure 11

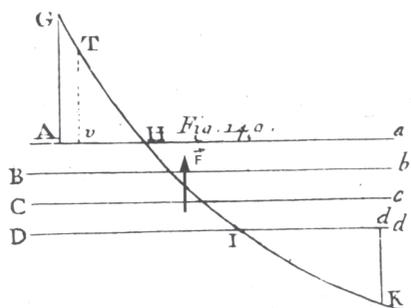


Figure 12

conséquence, contraire à celle tirée par Huygens, à l'expérience. Cette vérification est hors de portée expérimentale à son époque. En 1703, Newton donne son *Optique*, dans laquelle il rend compte par sa théorie corpusculaire, et non sans contradictions, de tous les effets de la lumière (émission, propagation, réflexion, réfraction, couleurs, diffraction). Il n'aborde que très succinctement le problème de la double réfraction de la calcite, se contentant de condamner à ce propos les conceptions de Huygens.

Newton explique donc (presque) tous les effets observés dans le monde, de l'infiniment grand (les astres) à l'infiniment petit (la lumière), par une mécanique très différente de celle des cartésiens : il remplace les contacts et entraînements par des forces, des masses, la densité des corps, exprime les trajectoires grâce à l'analyse. Mais cette mécanique newtonienne n'est pas sans poser problème : la gravité s'exerce à distance dans le vide. Ce n'est donc pas une force mécanique : c'est une « cause première » bannie de la physique depuis la fin du Moyen Âge lui opposent Leibniz et les cartésiens ; c'est l'action constante de Dieu sur le monde soutient Newton, dont la physique conduit à une théophanie, l'espace étant le sensorium du Dieu, créateur et omnipotent. On comprend les oppositions !

Au XVIIIème siècle cependant, l'Angleterre devient presque unanimement newtonienne alors que, sur le continent, Maupertuis (1698 – 1759) cherche un principe d'économie compatible avec l'optique de Newton. Il raisonne : en se réfractant, la lumière abandonne le chemin le plus court, la ligne droite. Pourquoi irait-elle par la route la plus rapide ? Elle ne suit aucune de ces deux voies. Et Maupertuis d'affirmer : « *Le chemin qu'elle tient est celui par lequel la quantité d'action est moindre* »⁽²⁾. Qu'est-ce que la quantité d'action ? C'est une grandeur d'autant plus importante que la vitesse est grande et le chemin parcouru long. « *Elle est proportionnelle à la somme des espaces multipliés chacun par la vitesse avec laquelle le corps les parcourt... C'est cette quantité d'action qui est ici la vraie dépense de la nature, et ce qu'elle ménage le plus qu'il est possible dans le mouvement de la lumière* ». Et Maupertuis de démontrer par un raisonnement différentiel que cette proposition est vérifiée quand la lumière suit précisément les lois de la réfraction... Il pense donc avoir prouvé à la fois que la lumière se propage plus vite dans l'eau que dans l'air, comme l'affirme Newton, et que « *la Nature, dans la production de ses effets agit toujours par les voies les plus simples* ». « *Tout l'édifice de M. Fermat est détruit* » écrit Maupertuis, qui ajoute : « *Je connais la répugnance que plusieurs mathématiciens ont pour les causes finales appliquées à la physique et je l'approuve même jusqu'à un certain point ... On ne peut [cependant] douter que toutes choses ne soient réglées par un Être Suprême, qui, pendant qu'il a imprimé à la matière des forces qui dénotent sa puissance, l'a destinée à exécuter des effets qui marquent sa sagesse* ». Nous revoici donc en présence d'un nouveau principe théologique : « *Notre principe... laisse le monde dans le besoin naturel de la puissance du créateur et est une suite nécessaire de l'emploi le plus sage de cette puissance* », note Maupertuis qui, fort de cette déduction, estime logique d'étendre

(2) Lettre du 15 avril 1744, citée par R. Dugas, *Histoire de la mécanique*, Neufchâtel, Griffon, 1950, (II, 25),

son principe au domaine de la dynamique et à la résolution du problème des chocs entre deux corps. Les conséquences qu'il tire de ce « *Principe de moindre action* » sont démontrées et généralisées par Euler et permettent d'englober tous les chocs des corps élastiques ou des corps durs dans une même description (en ce sens, il est encore admis actuellement). Mais il ne faudrait pas faire de Maupertuis seulement le partisan d'un principe théologique : il marque aussi, jusqu'à un certain point, de la répugnance pour les causes finales. Dans la « *Vénus physique* », par exemple, il affirme que le père et la mère ont une influence égale sur l'hérédité et tente d'expliquer les phénomènes génétiques par une théorie d'attraction physico-chimique : son œuvre fournira des arguments à la fois aux athées et aux déistes...

Cependant, pour la majorité des savants continentaux, le recours aux causes finales rend nécessaire les études destinées à prendre en défaut la « philosophie anglaise » : tous leurs essais conduisent, au contraire, à l'augmentation de la précision des lois de Newton et de leur fécondité ! Ils en viennent ainsi à expliquer l'inégalité de la pesanteur sur notre globe (par la forme de la Terre), la précession des équinoxes (par l'inclinaison de son axe), le retour de la comète de Halley (par la résolution et l'extension du « problème des trois corps - 1759). Cet événement, observé par toute l'Europe, fait triompher la mécanique newtonienne et par là même son optique. Laplace (1749-1829) peut alors formuler une mécanique s'appliquant de l'astronomie à la constitution de la matière et à l'optique, faite de forces, de masses, de vide, de trajectoires réversibles repérées dans un espace et selon des temps absolus (1799-1805). La lumière est de nature corpusculaire, la gravité devient une propriété inhérente de la matière, Dieu est chassé de l'explication.

Augustin Fresnel et la victoire de la théorie ondulatoire de la lumière.

Alors même que l'optique de Newton s'impose, un médecin anglais, Thomas Young (1773-1829), familier des phénomènes vibratoires, découvre (1802) les *interférences* de la lumière : celle-ci, passant par deux petits trous, donne deux faisceaux qui se superposent dans une zone où apparaissent des franges alternativement sombres et claires : de la lumière ajoutée à de la lumière peut donner de l'obscurité ! Il ne peut expliquer ce phénomène que par la composition d'ondes. Ses travaux sont refusés par une Royal Society maintenant totalement acquise à Newton. En 1814, Augustin Fresnel (1788-1827), qui ne connaît pas les travaux de Young mais est convaincu de la nature ondulatoire de la lumière, veut démontrer son présupposé : il observe des ombres, découvre qu'elles sont bordées par des franges colorées situées sur des courbes, redécouvre ainsi la diffraction de la lumière, qu'il explique par une belle théorie ondulatoire de la lumière (fig. 13). Encouragé par François Arago (1786-1853), qui le soutient auprès d'une Académie des Sciences

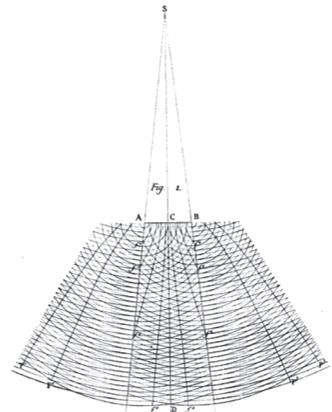


Figure 13

dominée par Laplace, newtonienne, il parvient à expliquer et prévoir tous les effets lumineux au moyen d'une théorie qu'il exprime, lui le virtuose à la fois de l'expérimentation et du calcul, non plus seulement par la géométrie mais par l'analyse. L'optique géométrique est ainsi reformulée mathématiquement. Ce faisant, Fresnel est obligé d'associer aux ondes des vibrations. Le phénomène de polarisation de la lumière l'oblige à conjecturer qu'elles sont transversales, perpendiculaires à la direction de propagation des ondes. Ceci implique, mécaniquement parlant, que la lumière se propage dans l'espace intersidéral au sein d'un éther laissant passer librement les astres mais ayant la consistance d'une gelée visqueuse. Cette conséquence paradoxale rend espoir aux newtoniens. Arago a alors l'idée de suggérer à Léon Foucault de mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau, ce qu'il parvient à faire en 1849, la même année que Hippolyte Fizeau, par une autre méthode. Tous deux trouvent une valeur qui s'accorde exactement avec les prévisions de la théorie ondulatoire : inversement proportionnelle à l'indice de réfraction du milieu concerné. La théorie corpusculaire de la lumière est ruinée. Il va falloir s'intéresser aux curieuses propriétés de l'éther.

L'optique aujourd'hui.

La suite de l'histoire n'appartient pas à l'optique géométrique, mais va permettre de reformuler celle-ci. En 1873, James-Clerk Maxwell (1831-1879) publie son traité d'électricité et de magnétisme : il y unifie ces deux domaines d'études, les décrit en termes de champ électromagnétique se propageant dans un éther, qui devient sans consistance et simple support. Ce faisant, il rompt avec la volonté de vouloir décrire le monde en termes de mécanique et utilise des « analogies physiques » capables de guider ses développements mathématiques. Calculant que ce champ se propage à la même vitesse que la lumière et possède les mêmes propriétés (ondulatoires avec des vibrations transversales), il saute le pas et, de manière théorique, fait de la lumière un champ électromagnétique qui se propage, ce qui sera vérifié au XXème siècle.

En 1900 et en 1902, les travaux de Max Planck (1858-1947) et d'Albert Einstein (1879-1955) accompagnent un renouveau de l'atomisme. En 1905, dans sa *théorie de la relativité restreinte*, Einstein décrit les phénomènes physiques dans des systèmes de coordonnées à 4 dimensions (3 d'espace et une de temps) ; il rejette alors l'éther devenu inutile. La même année, il est amené à admettre que l'énergie de la lumière est émise ou absorbée sous forme discrète. Peu à peu cette idée s'impose et la *physique quantique*, en vient à décrire la lumière comme formée de *photons*. En 1915, Einstein formule sa théorie de la *relativité générale*, dans laquelle il donne à la gravitation une structure de champ : elle se propage et la lumière suit une trajectoire qui est la géodésique de l'espace-temps. Nous ne savons toujours pas unifier physique quantique et relativité générale.

Insistons sur la physique quantique : elle englobe matière et lumière dans une même description, dans lesquels interviennent les photons, électrons... Contrairement à la conception des physiciens du début du XXème siècle et à une image encore bien colportée aujourd'hui, les photons ne sont *ni* ondes *ni* particules

(matérielles) : une particule est discrète en nombre (on peut les dénombrer) et discrète en étendue (assimilable à un point) ; une onde est continue spatialement et continue en nombre ; un photon est continu spatialement et discret en nombre. Il convient donc de revisiter les concepts classiques d'onde et de corpuscule... Au dualisme de la physique classique succède le monisme quantique.

Ainsi va la science, par une dialectique du doute et de la certitude : nous sommes assurés que les connaissances actuelles sont perfectibles ; elles reposent donc à la fois sur des savoirs stables et sur des fragilités. Et, l'histoire de l'optique que nous venons d'esquisser le montre, la résolution de celles-ci fera toujours pousser plus loin les pertinences des théories. Celles-ci engloberont, ou non, des théories anciennes dans d'autres plus générales, feront découvrir de nouveaux horizons, seront fruits de tâtonnements, d'hésitations, d'erreurs, d'apports extérieurs, de contextes dans lesquels se déroule la recherche scientifique. C'est, nous l'avons vu, parfois les voies de traverse qu'empruntent les avancées théoriques.

Il reste que, pour expliquer un phénomène lumineux particulier, il convient de se rappeler que nous utilisons toujours des modèles : le rayon lumineux pour l'optique géométrique, les ondes pour les interférences, l'électromagnétisme pour les spectres continus et ses extensions hors du champ du visible, la Quantique pour les lasers et les spectres de raies (obtenus par des techniques à plus grande résolution), la Relativité pour la propagation de la lumière dans l'espace et sa déviation par les masses. Tous ces modèles sont pertinents entre des limites de validité que nous savons poser : c'est ce qui fait la fécondité de la démarche scientifique, une démarche collective qui se remet en cause sans cesse grâce au recours à la rationalité, à la mathématisation, à l'expérience, qui porte en elle sa propre capacité de contestation et dont la fécondité dépasse, de loin, la simple affirmation d'une vérité intangible.

Pour aller plus loin :

- Bernard Maitte, *Une histoire de la lumière de Platon au photon*, Paris, Seuil, Scienceouverte, 2015, 392 pages.
- Bernard Maitte, *Histoire de l'arc-en-ciel*, Paris, Seuil, Science-Ouverte, 2005, 316 pages.