Jérémy Monteilh

L'HISTOIRE DES SCIENCES

VOYAGE DE L'ANTIQUITÉ À NOS JOURS EN EXERCICES

ellipses

Chapitre 1

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

« Mais il m'est impossible de voir un tel homme parmi les Achéens : ils sont enveloppés de brume, eux et leurs chevaux pareillement. Zeus Père, va, soustrais à la brume les fils des Achéens. Fais-nous un ciel serein ; accorde à nos yeux qu'ils voient. […]

Ce furent ses paroles, et, le voyant verser des larmes, le Père en gémit. Aussitôt il dispersa les vapeurs et repoussa la brume. Là-dessus, le soleil brilla et le combat apparut tout entier. »

Homère, *L'Iliade*, Chant XVII

Dans l'Iliade, lors d'une bataille, les Grecs doivent battre en retraite sous les coups du troyen Hector, masqué par une nuée dirigée par Aphrodite. Ajax implore les dieux de leur venir en aide, et c'est en ramenant la lumière que prend fin le désastre.

THÉORIE ANTIQUE

Les premières conceptions sur la lumière sont inséparables du problème de la vision. Nous distinguons trois théories que les anciens avaient à ce sujet.

1. Les atomistes croient que la vision est causée par l'arrivée dans l'œil d'une réplique de l'objet observé. Autrement dit, chaque objet projette en permanence une myriade d'émanations appelées simulacres, ou écorces, qui ont la forme de l'objet et qui, en s'approchant de l'œil, s'amenuisent de manière à le pénétrer et à nous communiquer une sensation de la forme de l'objet. Dans cette conception, la lumière n'existe pas : ce sont les simulacres qui se déplacent et qui causent la vision.
2. Chez les Pythagoriciens, c'est l'œil qui émet des rayons en direction des objets observés. Ces rayons émanent du feu intérieur contenu dans chaque être vivant. L'un des arguments appuyant cette théorie est le suivant : si on cherche un petit objet, comme une aiguille qui est tombé par terre, on ne peut le trouver que si notre regard tombe sur lui. Il y a donc quelque chose

qui émane de nos yeux en ligne droite et se dirige vers les objets observés. Euclide (vers 300 av. J.-C.), un adepte de cette théorie pythagoricienne, publie un ouvrage sur le sujet : la *Catoptrique*, qui est peut-être l'œuvre de Théon d'Alexandrie (env. 335-405). Par ailleurs, cette théorie est essentiellement géométrique : elle décrit les ombres, la réflexion de la lumière sur un miroir plan ou sphérique, et la réfraction, c'est-à-dire la description du chemin de la lumière quand elle passe d'un milieu transparent à un autre. On y trouve l'égalité de l'angle de réflexion à l'angle d'incidence mais la réfraction est incorrectement décrite.

3. Enfin, Aristote (384-322 av. J.-C.) s'oppose à l'idée que l'œil émette de la lumière. Son argument est que si l'œil émet de la lumière, nous pourrions voir la nuit aussi bien que le jour. Aristote pense plutôt que la sensation de vision est causée par une propagation de l'objet vers l'œil, à travers un milieu intermédiaire. Aristote donne donc à la lumière une existence indépendante mais cette conception plus moderne de la lumière n'est pas adoptée dans l'Antiquité en dépit de la grande influence d'Aristote dans tous les autres domaines.

Dans l'Antiquité, la compréhension de la nature de la lumière est très limitée. Empédocle (env. 490-430 av. J.-C.) émet l'hypothèse qu'elle se propage à une vitesse finie mais Aristote pense qu'elle se propage instantanément. C'est cette dernière idée qui va s'imposer pendant les siècles suivants.

Le mode de propagation de la lumière pensé par les anciens ne diffère pas de celui utilisé aujourd'hui pour faire de l'optique géométrique. On peut le définir en termes modernes :

> Dans un milieu homogène[1] et isotrope[2], la lumière se propage en ligne droite ; les rayons lumineux sont des droites.

Lors des éclipses de lune, la projection de l'ombre de la Terre sur la Lune permet de comprendre que la Terre est ronde. Elle est d'abord assimilée à un disque, puis à un cylindre, et finalement à une sphère. Par des jeux d'ombre et l'identification de quelques triangles semblables, Thalès de Milet (env. 625-548 av. J.-C.) réalise les premières mesures de la hauteur des pyramides, Pythéas le Massaliote (vers 325 av. J.-C) mesure les arcs méridiens et Eratosthène de Cyrène (env. 276-194 av. J.-C.) calcule le rayon de la Terre[3]. Les distances Terre Lune, ou Terre Soleil, sont calculées par Aristarque de Samos (env. 310-230

1. On considère le milieu seulement rempli d'une seule substance comme l'air ou l'eau, dont les propriétés sont les mêmes en tous points. On néglige toute fluctuation locale de grandeurs comme la température, la pression, la masse volumique etc.
2. Toutes les directions sont équivalentes.
3. Voir chapitre 5.

av. J.-C.) et Hipparque de Nicée (env. 190-120 av. J.-C.). Toutes ces déductions sont des conséquences directes du modèle du rayon lumineux qui se déplace en ligne droite.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION

Ibn Al-Haytham, dit Alhazen (965-1040), est le plus grand physicien arabe du Moyen Âge et il peut être considéré comme le fondateur de l'optique. Selon lui, la lumière a une existence indépendante de l'objet qui l'émet, et de l'œil qui la reçoit. L'œil ne peut sentir un objet que par l'intermédiaire de la lumière que cet objet lui envoie. La lumière est d'abord émise par des objets autolumineux (sources principales) et elle se propage en ligne droite. Il considère aussi une émission secondaire de lumière, par une source accidentelle, plus faible, tel un grain de poussière. Alhazen énonce les lois de la réflexion, comme l'avait fait Euclide. Il explique le phénomène par analogie avec le rebondissement d'une particule sur un mur.

Si on note i_1 l'angle d'incidence et r l'angle réfléchi, on a alors : $i_1 = r$.

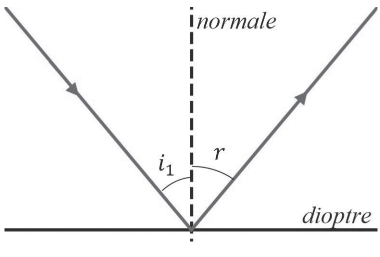

FIGURE I.I. Schéma de la réflexion

Alhazen explique également la réfraction par un changement de vitesse de la lumière à l'interface entre les deux milieux, exactement comme le feront bien plus tard René Descartes (1596-1650) et Isaac Newton (1642-1727). Après des observations, Alhazen conclut, incorrectement, que l'angle de réfraction i_2, est proportionnel à l'angle d'incidence i_1, cette conclusion est cependant correcte dans la limite des petits angles. Il croit, incorrectement aussi, que l'image se forme dans le cristallin et non sur la rétine. En Occident, au Moyen Âge, l'œuvre d'Alhazen est traduite et diffusée.

Le moine polonais Vitellion (env. 1230-1280) écrit un traité entre 1270 et 1278, *De Perspectiva,* qui vise à rassembler toute la tradition optique connue. Cet ouvrage, composé de dix livres, est une source essentielle d'informations et de débats jusqu'au XVI^e siècle, il est édité à de nombreuses reprises. Vitellion reprend les expériences de Claude Ptolémée (env. 100-168) pour déterminer la valeur de l'angle de réfraction de la lumière quand elle traverse des milieux différents (air, eau, verre…), et il cherche à en déterminer la loi mathématique, ce qui ne sera réalisé qu'au XVII^e siècle. Lorsque la lumière change de milieu de propagation, comme lorsqu'elle passe de l'air à l'eau par exemple, la lumière peut subir deux phénomènes : une réflexion, le rayon repart dans le milieu initial, ou une réfraction qui est un changement de direction de propagation au niveau du *dioptre*, la surface de séparation entre ces deux milieux. Johannes Kepler (1571-1630) établit, comme Alhazen, une relation de proportionnalité entre l'angle incident i_1 et l'angle réfracté i_2. Cette relation n'est valable que pour des petits angles : $i_1 = k\, i_2$.

La relation, valable pour tous les angles est établie expérimentalement par le mathématicien et physicien néerlandais Willebrord Snell (1580-1626), mais il ne la publie pas. Le premier à apporter une explication théorique est le français René Descartes, dans sa *Dioptrique* publiée en 1637[1] (voir **Exercice 1**).

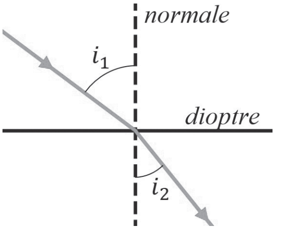

FIGURE I.2. **Schéma de la réfraction**

La première loi de Snell-Descartes stipule que le rayon incident, le rayon réfracté et le rayon réfléchi sont dans le même plan.

La deuxième loi de Snell-Descartes établit, dans sa version moderne, la relation entre les sinus des angles :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

n_1 et n_2 sont les indices optiques, ou indices de réfraction, des milieux traversés 1 et 2. Tous les milieux matériels sont caractérisés par un indice de réfraction noté n ; cette quantité est toujours supérieure à 1, on pose que pour le vide $n_{vide} = 1$. L'indice de réfraction d'un milieu matériel est une grandeur sans dimension et n'a donc pas d'unité[2].

1. Descartes connaissait les travaux de Snell, qui lui avait communiqué ses résultats.
2. Il dépend de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique qui traverse le milieu. Il dépend aussi des conditions thermodynamiques locales du milieu comme sa densité, sa pression ou sa température.

VITESSE DE LA LUMIÈRE

La mesure de la vitesse de propagation a fortement progressé au cours des siècles. Galilée (1564-1642), au début du XVII^e siècle, a tenté de mesurer cette vitesse en plaçant deux personnes éloignées de quelques kilomètres et munies d'horloges. Le temps mis par la lumière pour parcourir cette distance est impossible à mesurer avec le matériel de l'époque, son expérience n'a donc pas été concluante.

En 1676, l'astronome danois Olaüs Römer (1644-1710), en étudiant les mouvements des satellites de Jupiter, démontre que la lumière se propage à une vitesse finie (voir **Exercice 2**).

En 1725, le physicien anglais James Bradley (1693-1762) apporte la preuve du mouvement de la Terre autour du Soleil et trouve que la lumière se déplace à une vitesse proche de 300 000 $km.s^{-1}$. Il fait ses calculs[1] à partir de la distance entre la Terre et le Soleil, or cette valeur n'est pas bien connue à l'époque.

En 1849, Hippolyte Fizeau (1819-1896) détermine la vitesse de la lumière sans se fier aux astres en utilisant un ingénieux dispositif (voir **Exercice 3**). Le français Léon Foucaud (1819-1868) trouve également par une autre méthode une valeur sensiblement identique. Il est établi en 1874, par le théoricien James Clerk Maxwell (1831-1879), que la lumière est une onde électromagnétique. Ces ondes, dont la lumière visible fait partie, se propagent toutes à la même vitesse dans le vide (et approximativement dans l'air). Cette vitesse, notée c, a pour valeur exacte 299 792 458 $m.s^{-1}$.

$$c = 3{,}00 \times 10^{8}\ m.s^{-1}$$

La vitesse de la lumière v dans un milieu dépend de son indice optique. Par définition :

$$n = \frac{c}{v}$$

Cet indice vaut rigoureusement 1,00 pour le vide et est très proche de 1,00 pour l'air. L'indice optique ne peut donc pas être inférieur à 1,00. Plus l'indice est grand, plus la vitesse de la lumière dans ce milieu est petite.

1. Voir chapitre 5.

EXERCICE 1 1642, La loi de la réfraction de Descartes ★★

▸ *https://archive.org/details/discoursdelamet00desc/page/10/mode/2up*

En 1637, le français et philosophe René Descartes, publie le *Discours de la Méthode*. Descartes s'interroge très jeune sur la place de la science dans la connaissance. Convaincu par l'héliocentrisme et le projet de Galilée que la Nature est écrite en langage mathématique, il pense cependant que le savant italien a manqué de méthode. Son *Discours* est une tentative de palier à ce manque. Il complète son *Discours* avec trois traités : *La Dioptrique*, *Les Météores* et *La Géométrie*. C'est dans *La Dioptrique*, publié en 1642 qu'il énonce la loi sur la réfraction :

> *« Pensons maintenant que la balle qui vient de A vers D rencontre au point B, non plus une toile, mais de l'eau, dont la superficie CBE lui ôte justement la moitié de sa vitesse ainsi que faisait cette toile […] Puisque la balle qui vient de A en ligne droite jusqu'à B se détourne étant au point B et prend son cours de là vers I, cela signifie que la force ou facilité dont elle entre dans le corps CBEI est à celle dont elle sort du corps ACBE, comme la distance qui est entre AC et HB à celle qui est entre HB et FI, c'est-à-dire comme la ligne CB est à BE. »*

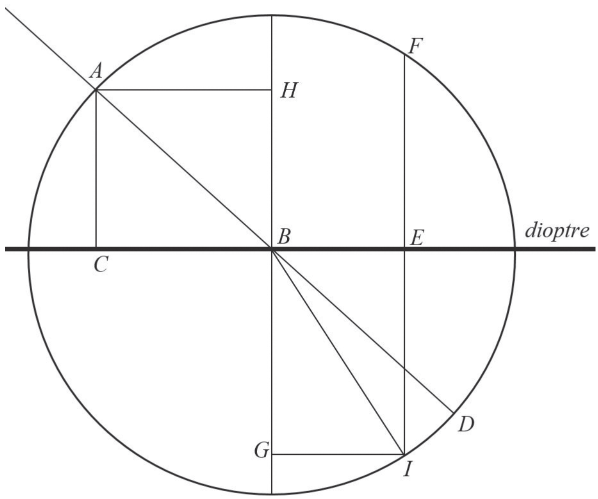

FIGURE 1.3. Dessin pour démontrer la réfraction par Descartes

1 Exprimer la vitesse v_1 dans le milieu 1 (entre A et B) en fonction de la vitesse v_2 dans le milieu 2 (entre B et D).

2 Calculer n, rapport $n = \dfrac{v_1}{v_2}$.

3 Écrire le sinus de l'angle en B $\sin i_1$ dans le triangle ABH et le sinus de l'angle en B $\sin i_2$ dans le triangle GBI.

4 Calculer le rapport $\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$.

5 Conclure.

Descartes ne formule pas sa loi de réfraction avec des sinus mais utilise seulement des rapports de longueurs.

EXERCICE 2 1676, Römer et les satellites de Jupiter ★

▸ *https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56527v/f234.item*

Depuis les premières observations de 1610 faites par Galilée, l'observation des astres se fait avec des lunettes astronomiques[1]. Johannes Kepler établit des lois des mouvements des planètes et le français Jean-Dominique Cassini (1625-1712) les utilise pour réaliser des tables qui permettent de prévoir quand une lune entre dans le cône d'ombre de Jupiter (immersion) et quand elle en ressort (émersion). Cependant des irrégularités sont observées pour Io, un des satellites de Jupiter. Les phénomènes d'immersion et d'émersion se font avec une certaine avance ou un certain retard.

Cassini émet le premier l'hypothèse que la vitesse de la lumière n'est pas infinie, comme l'avaient cru jusque-là tous les Philosophes. Il laisse cependant son ami, l'astronome danois Römer qui séjourne à l'Observatoire de Paris, de réaliser les calculs. Ses résultats sont publiés dans le *Journal des Sçavans*, le lundi 7 décembre 1676.

> *« Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour sortir en D, & soit E, F, G, H, K, L la Terre placée à diverses distances de Jupiter. Supposons la Terre en L, voyant le satellite émerger de l'ombre en D et qu'ensuite environ 42 heures et demie plus tard, la Terre se trouve en K après une révolution totale du satellite, qui sera alors à nouveau en D : il est manifeste que si la lumière demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le satellite sera vu plus tard en D. Inversement, si la Terre se déplace de F en G et qu'on observe l'immersion du satellite dans le cône d'ombre en C, la Terre va au-devant de la lumière, les révolutions des immersions s'en verront raccourcies. La distance parcourue par la Terre entre deux émersions ou immersions successives est d'environ 210 diamètres de la Terre. »*

1. Voir chapitre 2.

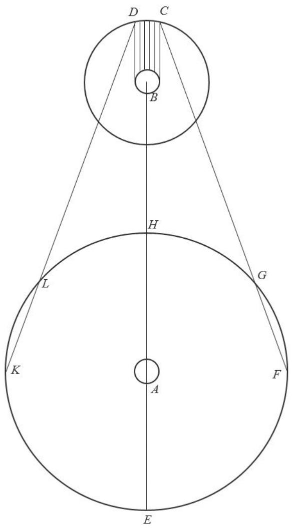

FIGURE 1.4. Schéma de l'orbite terrestre autour du Soleil (en A) et de l'orbite de Io, autour de Jupiter (en B)

Römer montre que la durée entre 40 immersions est sensiblement plus courte quand la Terre est du côté *F* que du côté *K*. Sans tenir compte de la vitesse finie de la propagation de la lumière, c'est-à-dire en considérant que la durée entre deux immersions est constante sur une année (égale à sa valeur moyenne), Römer obtient une date et une heure pour observer la quarantième immersion après celle observée alors que la Terre est au point *L*. L'observation de cet évènement se produit le 9 novembre à 5 h 35' 45" du soir, soit 10 minutes plus tard que prévu, la Terre se trouvant alors au point *K*, distant de *L* de 210 diamètres terrestres.

Données

En 1676 :

- 1 lieu = 3,898 km ;
- 1 diamètre terrestre = 3 000 lieues ;
- période de révolution : 365,25 jours.

1 Calculer la distance parcourue par la Terre, en kilomètre, entre 2 émersions successives d'après Römer.

2 Expliquer pourquoi Römer fait une prédiction sur 40 révolutions de Io et non une seule.

3 Calculer la distance parcourue par la Terre sur son orbite pendant 40 révolutions de Io.

4 Calculer la valeur de la vitesse de la lumière obtenue par Römer. Commenter