LA REFRACTION DE LA LUMIERE

ELEMENTS D'HISTOIRE, DE L'ANTIQUITE A LA FIN DU 17ème SIECLE

Gilles ITARD
Lycée Racan CHATEAU DU LOIR

Le texte qui suit est conçu comme articulation entre Histoire des Sciences, Mathématique et Physique dans la perspective de travaux interdisciplinaires au niveau du second cycle des Lycées. Si l'article en lui-même s'adresse à un lecteur possédant les connaissances de base sur la réfraction et s'attache à dégager quelques thèmes : liens entre technique et théorie, émergence du concept de loi mathématique en physique, méthodes de calcul, modes de démonstration, il se prolonge ou s'enracine dans le "Lexique commenté" qui éclaire les notions physiques utiles. Les termes qui figurent dans ce lexique sont marqués d'une astérisque lors de leur première apparition dans le texte.

Isoler le phénomène de Réfraction peut sembler peu satisfaisant. Notre choix est lié d'une part aux objectifs indiqués qui semblent pouvoir être atteints plus aisément avec un sujet limité, d'autre part à nos propres connaissances et au temps disponible. Le lecteur que nous aurions su mettre en appétit trouvera dans la bibliographie des ouvrages généraux sur l'histoire de la Lumière.

Notre travail s'appuie sur des textes originaux, sur des traductions, mais aussi, en trop grande part, sur des textes à propos des originaux. Les risques de dérive, de répétition d'idées reçues sont donc grands. Que le lecteur retourne aux sources chaque fois qu'il le peut.

JALONS CHRONOLOGIQUES

Siècles

- 3 EUCLIDE : mention du phénomène

0

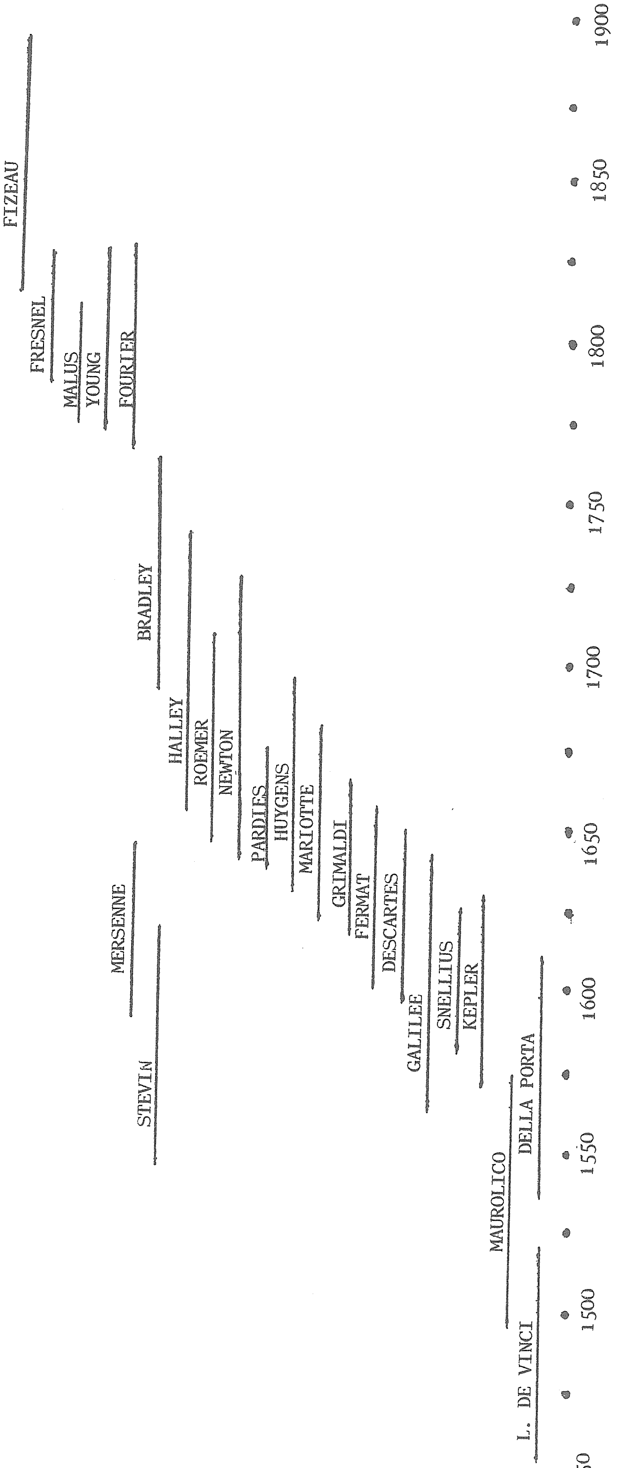
2 PTOLEMEE : mesures du phénomène
Tables numériques

11 ALHAZEN : Etude du "sens de variation" de la déviation en fonction de l'incidence
Essai d'interprétation par composition de mouvements

1604 KEPLER : Premières formulations mathématiques.

17 1630 (vers) SNEL-DESCARTES : Loi des sinus
DESCARTES : explication par mouvement

1680 (vers) NEWTON : Théorie corpusculaire
HUYGENS: Théorie vibratoire.


L. DE VINCI
MAUROLICO
DELLA PORTA
STEVIN
MERSENNE
GALILEE
SNELLIUS
KEPLER
DESCARTES
FERMAT
GRIMALDI
MARIOTTE
HUYGENS
PARDIES
NEWTON
ROEMER
HALLEY
BRADLEY
FOURIER
YOUNG
MALUS
FRESNEL
FIZEAU
1450
1500
1550
1600
1650
1700
1750
1800
1850
1900

I. LES GRANDES LIGNES

Le phénomène de réfraction* est évidemment connu depuis la plus haute antiquité ; le fait qu'un bâton en partie plongé dans l'eau semble coudé, qu'une pièce de monnaie tombée dans le bassin semble plus proche de la surface qu'elle ne l'est, n'a pu passer inaperçu.

Le phénomène est déjà mentionné par Euclide, promoteur de l'optique géométrique, au 6è postulat de sa Catoptrique (Catoptron : miroir) : "Que si quelque objet regardé dans un vaisseau y acquiert une distance telle qu'il ne soit plus vu, et si cette distance restant la même, on verse de l'eau, l'objet regardé sera vu"(1).

Utilisé pour rendre compte d'autres faits, tels que crépuscules, grosseur apparente du soleil à l'horizon, certaines éclipses, le phénomène n'a pas laissé de traces comme objet d'étude avant Claude Ptolémée(2) au second siècle de notre ère. Ptolémée mesure les angles d'incidence* et de réfraction* et dresse des tables de corrélation entre ces angles.

Le relais est pris au début du onzième siècle par Alhazen(3) qui énonce des lois du type "si i' > i alors D' > D "où i et i' sont les angles d'incidence, D et D' les angles de déviation* compris entre le rayon incident et le rayon réfracté. Mais on trouve chez Alhazen une tentative toute différente(4) : celle de rendre compte du phénomène en introduisant le mouvement de la lumière, mouvement décomposé en un mouvement parallèle à la surface de séparation des milieux et un mouvement perpendiculaire à cette surface.

Dès la fin du 13ème siècle les "lentilles", dont le nom trahit l'origine plébeienne, sont utilisées pour corriger la vision. C'est le fait d'artisans, de médecins ambulants. Alhazen au 11ème siècle, Roger Bacon au 13ème, Léonard de Vinci au 15ème, Cardan au 16ème les mentionnent comme moyen pour "agrandir", mais aucune étude théorique n'est entreprise avant Maurolico (Diaphanéon) et Della Porta (Magia Naturalis, 1558, puis De Refractione, 1593).

(1) EUCLIDE, L'optique et la catoptrique, Paul Ver Eecke.
(2) Optique, Livre V.
(3) RASHED, Le discours de la Lumière - Alhazen.
(4) RONCHI, Histoire de la lumière ; CORTES PLA El Enigma de la luz.

Les choses vont alors très vite. Kepler s'attaque au problème et propose en 1604 (Ad Vitellionem Paralipomena : "compléments à Vitellion") la première formulation mathématique d'une loi de réfraction. Galilée construit sa première lunette et publie le Messager Céleste (Sidereus Nuncius 1609). Kepler publie en 1611 sa Dioptrique avec une loi simplifiée donnée, explicitement, comme valable pour les faibles incidences : il y a proportion entre les angles d'incidence et de réfraction. Vers 1625 Snellius et Descartes sont en possession de la loi des sinus : il n'y a pas proportion entre les angles d'incidence et de réfraction mais entre les sinus de ceux-ci. Descartes a la priorité en ce qui concerne la publication (1637 La Dioptrique) et, au contraire de Snellius, donne une explication du phénomène basée sur le même principe que la tentative d'Alhazen au 11è siècle.

Le phénomène physique maîtrisé par une quantification achevée en une loi mathématique simple exigeait alors une explication plus fondamentale ; il fallait comprendre le phénomène en lui-même, ou tenter de le faire. Une telle explication est nécessairement sous-tendue par la conception que l'on a de la nature de la lumière. Il appartiendra à Newton (théorie corpusculaire) et à Huygens (théorie ondulatoire) de construire des modèles théoriques, rendant compte, entre autres, de la loi des sinus devenue incontournable.

Ce premier survol permet de dégager quelques axes de réflexion. Phénomène répertorié plusieurs siècles avant notre ère, la réfraction apparaît sous forme quantifiée au deuxième siècle. Cette quantification semble suffire jusqu'au 17ème siècle et les travaux de Képler reposent sur les tables numériques de Ptolémée ou plus exactement sur leurs variantes dues à Vitellion (13è siècle). D'autres exigences apparaissent alors, des formulations mathématiques explicites traduisent la relation entre incidence et réfraction.

La science de l'antiquité a-t-elle été bloquée par la difficulté du problème ? mais de quel problème ? en d'autres termes, les objectifs étaient-ils ceux de Descartes ? étaient-ils les mêmes à l'époque d'Euclide et à celle de Ptolémée ? Et, si ces objectifs étaient voisins, quel type de réponses était jugé satisfaisant ?

Deux difficultés peuvent être, a priori, mentionnées, l'une générale, l'autre propre au phénomène de réfraction.

Dans l'antiquité l'idée d'isoler les paramètres, ou même de les repérer, n'est pas "naturelle". La physique (physis : nature) s'intéresse à la nature prise globalement : lumière, oeil et perception par le cerveau forment un tout, les trois éléments sont indissociables ou peu dissociés. Pour sentir la difficulté on peut comparer l'attitude de Simon Stevin(1) (16ème siècle) qui écarte de ses travaux la chute des graves et la dynamique en raison du trop grand nombre de paramètres (surtout la résistance de l'air) à celle de Galilée qui fait abstraction de cette résistance et énonce la loi de chute dans le vide(2). Il ne faut pourtant pas exagérer l'importance de cette difficulté qui n'a pas empêché la naissance de l'optique géométrique dès Euclide avec le concept de rayon lumineux rectiligne et la prise en compte du phénomène de réflexion tant sur des miroirs plans que sur des miroirs concaves ou convexes. Ajoutons que divers textes portant sur la Dioptrique (réfraction) semblent disparus, on cite par exemple Archimède(3) ; faire le point sur l'état de la Dioptrique avant notre ère n'est pas aisé.

Par ailleurs, au contraire de la réflexion, le phénomène de de réfraction n'est pas stigmatique*, c'est-à-dire qu'après réfraction sur une surface plane les rayons lumineux issus d'un point ne convergent pas. Pour obtenir une quasi-convergence il est nécessaire de travailler sous une faible incidence, la loi simplifiée de Kepler (proportionnalité entre les angles d'incidence et de réfraction) est alors satisfaisante. Pour étudier des incidences plus grandes il faudrait suivre UN rayon lumineux (un pinceau étroit) mais le phénomène de dispersion* provoque alors l'apparition de colorations et celui de diffraction* (découvert et nommé par Grimaldi au 17è siècle) risque d'intervenir. Notons au passage que Descartes sera le premier à tenter de rendre compte physiquement des couleurs (Dioptrique 1637).

Le problème du stigmatisme n'est sans doute pas étranger à celui qui conduit Kepler(4), et peut être Descartes, vers la loi de réfraction : déterminer une surface sur laquelle un faisceau de rayons parallèles se réfracte en un faisceau conique. En 1644, Cavalieri écrit encore à Torricelli "vous avez peut-être spéculé sur (cette surface) recherchée par un si grand nombre, mais en vain".

(1) Eliane BONNEFON, Article sur Simon Stevin dans le présent document.
(2) Evelyne BARBIN, Article sur la portée du canon dans le présent document.
(3) VER EECKE, Introduction XI, Euclide Optique et Catoptrique.
(4) ITARD Jean, La réfraction chez Képler.

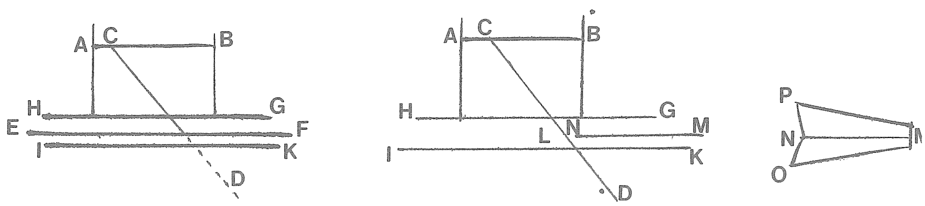
L'intérêt de Descartes pour la taille des verres dans sa correspondance antérieure à la Dioptrique suggère que le long chapitre sur la forme des verres n'est peut être pas aboutissement mais point initial dans l'élaboration de ce texte. Les extraits que nous donnons illustrent l'attention portée par Descartes aux moyens techniques à mettre en oeuvre. On verra dans la lettre à Constantin Huygens, père de Christian, que Descartes devait savoir, ou être très persuadé, dès 1626 ou 1627, que la courbe cherchée est une hyperbole. Nous verrons plus loin que Képler a "raté" de peu cette courbe en 1604 et on trouvera dans l'appendice qui termine cet article un exposé sur la liaison entre hyperbole et loi de la réfraction.

DESCARTES à FERRIER (extrait) (Amsterdam, 8 octobre 1629) : "Et si vous pouvez avoir du temps de reste pour travailler sur l'espérance d'un plus grand profit à l'avenir, je vous conseille de l'employer aux verres. Mais afin que vous jugiez, auparavant que de vous y employer, si c'est chose qui puisse réussir, je vous décrirai ici une partie de ce que j'en ai pensé, et vous en enverrai des modèles au prochain voyage, si vous le désirez, sans qu'il vous manque aucune chose de ce qui dépendra de moi, non plus que si j'étais à Paris.

Premièrement, je crois que vous vous souvenez de la machine que je vous décrivis avant que de partir(1), qui consistait en trois pièces principales : savoir, l'axe AB qui tournait en rond, la pièce CD qui se mouvait au travers de l'axe AB, et le cylindre EF qui coulait entre les deux planches GH et IK, et taillait le verre avec l'une de ses extrimités, E ou F. Maintenant je désire que cette machine vous serve seulement pour tailler les lames de fer ou d'acier de la figure qu'est P N O M, c'est-à-dire comme le fer d'un rabot de menuisier, en sorte que P N O, qui est la partie tranchante, soit la ligne que nous désirons. Je retiens donc de la machine précédente l'axe AB et la pièce CD, mais qui doit être ferme avec l'axe AB, en sorte qu'il n'y ait que le seul mouvement circulaire en toute la machine ; et je ne me sers plus du cylindre EF, d'autant que, lorsqu'on tourne l'axe AB, la partie de CD qui se rencontre entre les deux planches, à savoir L, y décrit exactement notre ligne. J'applique la lame NM ferme entre les deux planches contre la partie L de la pièce CD, laquelle partie je voudrais être taillée en forme

(1) La Dioptrique, Discours dixième, Voir VI, 216 et suivants.

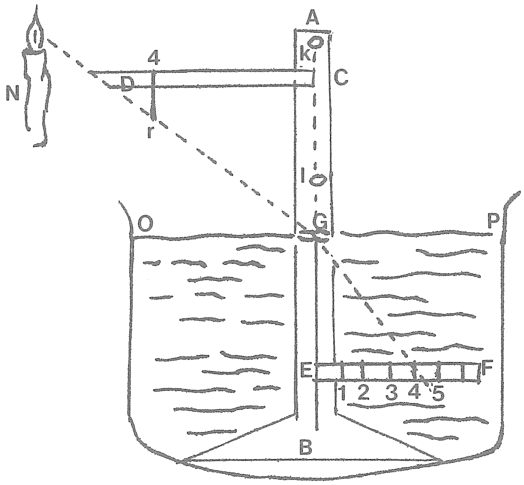
de lime, afin qu'en tournant elle pût limer la lame NM selon la ligne PNO, ainsi que nous le désirons ; et après l'avoir ainsi limée, je voudrais qu'on changeât la pièce CD, ou sa partie L, et qu'on en mît une autre en sa place, non plus taillée en lime, mais polie,



et de matière propre pour aiguiser et adoucir le plus qu'il se pourrait le tranchant de la lame NM. Je désire aussi qu'on fasse plusieurs lames d'acier...".

DESCARTES à GOLIUS (extrait) (Amsterdam, 2 février 1632) : "Je vous ai très grande obligation du favorable jugement que vous faites de mon Analyse. Car je sais bien que j'en dois la plus grande part à votre courtoisie ; toutefois je ne laisse pas d'en avoir un peu meilleure opinion de moi-même, parce que je vois que vous avez pris connaissance de cause avant que d'en donner un jugement définitif. Et je suis bien aise que vous veuillez faire le semblable touchant la matière des réfractions. Et afin que je contribue autant qu'il m'est possible, au moins de volonté, à la peine que vous voulez prendre d'en faire l'expérience, je vous dirai comment je m'y voudrais comporter, si j'avais le même dessein. Je ferais, premièrement, faire un instrument de bois ou autre matière, tel que vous le voyez ici décrit : AB est une règle ou pièce de bois toute droite, avec un pied B sur lequel elle se peut soutenir ferme dans le fond du vase OP ; EF et CD sont deux autres règles jointes à angles droits avec AB ; G est une pinnule qui doit être assez grande et environ de cette figure 

; sa grandeur est requise afin qu'elle n'empêche point la superficie de l'eau d'être toute plate et égale au point du milieu marqué i, auquel précisément se doit faire la réfraction ; et les pointes G et H servent à déterminer ce point i. La règle EF est divisée en plusieurs parties 1, 2, 3, 4, etc..., qui peuvent être égales ou inégales, il n'importe. Enfin kl est un plomb ou niveau par le moyen duquel il faut dresser le vase où est posé l'instrument, en sorte que la ligne AB regarde justement le centre du monde ; puis verser de l'eau dans ce vase jusques à ce que la



superficie de cette eau touche justement la pinnule G ; et tenant d'une main le style r sur la règle DC, et de l'autre la chandelle N, il les faut mouvoir çà et là (sans toutefois séparer le style r de la règle DC) jusques à ce que l'ombre du style r aille justement donner sur le milieu de la pinnule GHi, et de là sur quelqu'une des divisions de la règle EF, comme sur 4. Or, ayant marqué sur la ligne CD, le point où se trouve pour lors le style r, à savoir le point 4, il faut tirer l'instrument hors de l'eau, et suivant la ratiocination que savez, marquer les autres divisions de la ligne CD qui doivent correspondre à toutes les divisions de EF".

<u>DESCARTES à Constantin HUYGENS</u> (11 décembre 1635) : "Il a fait ce matin un peu de soleil, qui m'a donné moyen d'éprouver votre verre ; mais vous me pardonnerez, s'il vous plaît, si j'ose assurer que le tourneur ne lui a point donné la figure qu'aviez prescrite,

et vous le verrez fort clairement si vous prenez la peine de couvrir celui de ses côtés qui est plat de cette carte où il y a divers petits trous, et que, l'exposant au soleil, vous teniez derrière l'autre carte où il y a plusieurs cercles et lignes qui marquent les lieux où les rayons passant par ces trous doivent donner ; car, en l'approchant et reculant, vous verrez que ceux qui passent par les trous les plus proches du centre, s'assemblent dès la distance de 5 ou 6 pouces, et que ceux du cercle suivant ne s'assemblent que beaucoup plus loin, lorsque ceux du premier commencent déjà derechef à s'écarter, et ceux du 3 et 4 encore plus loin, lorsque ceux du 1 et 2 sont déjà fort écartés, au lieu qu'ils devaient s'assembler tous à la distance de 14 pouces. Et je vous dirai bien que j'ai voulu voir si cela ne procédait point de ce qu'en traçant l'Hyperbole vous auriez supposé la réfraction du verre plus ou moins grande qu'elle n'est, à cause que je n'ai point su si vous aviez pris la peine auparavant de la mesurer. Mais cela ne peut être ; car, si vous l'aviez supposée trop petite et que le tourneur eût bien suivi votre modèle, les rayons du milieu s'assembleraient plus près que 14 pouces, comme ils font ; mais ceux qui passent par les bords, s'assembleraient encore plus près que ceux du milieu, tout au contraire de ce qu'ils font. Et si vous l'aviez supposée trop grande, il est vrai que ceux des bords s'assembleraient plus loin que ceux du milieu comme ils font, mais ceux-ci même s'assembleraient plus loin que 14 pouces, au lieu qu'ils s'assemblent beaucoup plus près. Et ainsi ce verre ne peut avoir la figure d'une hyperbole, si ce n'était d'une dont le point brûlant extérieur fût seulement éloigné d'environ 6 pouces, et l'intérieur de beaucoup plus de 11/5. Car la réfraction du verre étant à peu près comme 2 à 3, si la distance qui est entre le sommet de l'hyperbole et son point brûlant extérieur est de 6 pouces, celle de l'intérieur ne doit être que d'environ 11/5 ; et celle de l'extérieur étant de 14, celle de l'intérieur doit être de 2 4/5. Il y a déjà huit ou neuf ans que je fis aussi tailler un verre par l'aide du tour, et il réussit parfaitement bien ; car, nonobstant que son diamètre ne fût pas plus grand que la moitié du vôtre, il ne laissait pas de brûler avec beaucoup de force, et l'ayant mis à la même épreuve que le vôtre, on voyait que tous les rayons qui passaient par les trous d'une carte s'approchaient proportionnellement jusques à la distance de 8 pouces, où ils se trouvaient assemblés en un, très exactement, et c'était à cette distance que le verre brûlait. Mais je vous dirai les précautions dont on usa pour le tailler. Premièrement, je fis polir trois petits triangles de même grandeur qui avaient chacun un angle droit et l'autre de 30 degrés, en sorte que l'un de leurs côtés était double de l'autre ; et je fis faire l'un de cristal de montagne, l'autre de verre de Venise ou cristallin, et l'autre de verre plus grossier. Puis je fis faire aussi une règle de cuivre avec 2 pinnules pour y appliquer ces triangles et mesurer les réfractions, ainsi qu'il est expliqué en la Dioptrique. Et de là j'appris que la réfraction du cristal de montagne est beaucoup plus grande que celle du cristallin, et celle-ci que celle du verre moins pur ; mais je ne me souviens point particulièrement de la grandeur de chacune. Après cela M. Mydorge, que vous aurez peut-être ouï nommer et que je tiens pour le plus exact à bien tracer une figure de mathématique, qu'on puisse trouver, décrivit l'Hyperbole qui se rapportait à la réfraction du cristallin sur une grande lame de cuivre bien droite et bien polie, et avec des compas dont les pointes d'acier étaient aussi fines que des aiguilles ; puis il coupa cette Hyperbole hors de la lame de cuivre et la lima curieusement suivant les traces de son compas. Et cette Hyperbole de cuivre fut le patron sur lequel un faiseur d'instruments de mathématiques, nommé Ferrier, tailla au tour un moule aussi de cuivre, cavé en rond selon la figure que le verre devait avoir ; et afin de ne point corrompre son patron en l'ajustant souvent sur ce moule, il coupait seulement dessus des pièces de carte dont il se servait en sa place, jusques à ce qu'ayant amené ce moule à sa perfection, il attacha son verre sur le tour, et l'appliquant de contre, avec du grès entre deux, il le tailla. Mais, voulant après en tailler un concave en la même façon, il lui fut impossible à cause que le mouvement du tour étant plus lent vers le centre du verre que vers ses extrémités, il s'y usait moins, et ce fut là que je remarquai beaucoup de fautes en cercle ; mais si j'eusse alors considéré que les défauts du verre concave ne sont pas de si grande importance que ceux du convexe, ainsi que j'ai fait depuis, je crois que je n'eusse pas laissé de lui faire faire d'assez bonnes lunettes avec le tour. Pardon, Monsieur, si je vous ai ennuyé de ce long et mauvais discours ; c'est vous-même qui avez attiré sur vous cette importunité, et le désir que j'ai de vous témoigner que je suis, votre très obéissant serviteur.

II. Aperçu sur les conceptions de la lumière avant le 17è siècle(1)

La Physique, comme toute science, délimite, explicitement ou non, son champ d'action, crée en quelque sorte la Réalité sur laquelle elle travaille.

Dans l'antiquité une entité physique n'existe qu'à travers les sensations, nos sens étant le seul moyen de les appréhender (faut-il sourire des réserves faites aux découvertes de Galilée... avec une lunette ?). Le concept de lumière est ainsi assujeti aussi bien à la vision qu'à la réalité de la chose vue. On peut dès lors concevoir trois modèles principaux :

a) Quelque chose va de l'oeil voyant vers la chose, ainsi vue

b) Quelque chose va de la chose vers l'oeil, ainsi rendu voyant

c) Double émission de la chose qui existe et manifeste ainsi son existence et de l'oeil capable de voir et qui cherche à réaliser la vision. Ces deux émanations, lors de leur rencontre, rende la chose vue et l'oeil voyant.

A ces trois modèles de base il faut ajouter la conception d'Aristote, qui eut peu d'écho à l'époque : il n'y a pas d'émission mais une modification du milieu intermédiaire.

Les différents courants ont coexisté, les deux premiers étant prédominant. Ainsi jusqu'au 4ème siècle de notre ère et sans doute jusqu'au 11ème siècle la théorie de l'émission par l'oeil (a) s'impose. C'est le choix "Pythagoricien", défendu par Archytas de Tarente (-430 ; -365), Euclide, Hipparque, Ptolémée, Damianus de Larisse (4è siècle de notre ère ?).

Euclide soutient sa thèse par des arguments du type : on ne voit pas toujours ce que l'on cherche, on ne voit pas tout... si tout émettait on devrait tout voir. Il compare aussi l'oeil aux autres organes des sens : seul l'oeil est globuleux, cela le prédispose à l'émission plus qu'à la réception. Les rayons visuels sont des lignes droites qui, légèrement espacées les unes des autres, divergent en un cône dont le sommet est situé dans l'oeil. Dans sa récension de l'optique d'Euclide, Théon d'Alexandrie (4è siècle) placera le sommet du cône sur l'oeil, mais Archimède semble avoir une conception plus subtile en faisant jouer un rôle aux divers points de la pupille(2).

(1) RONCHI, Histoire de la lumière ; CORTES PLA El enigma de la luz.
ROSMORDUC, L'idée d'unestructure de la lumière dans l'histoire de la physique.
VER EECKE, Euclide-Optique et Catoptrique, Introduction.

(2) ARCHIMEDE, L'arénaire, 4è hypothèse.

Entre autres difficultés liées à cette théorie, il ne semble pas évident que la lumière solaire, capable de mettre le feu si on la concentre, soit la même, ou de même nature, que la lumière émise par l'oeil qui voit. Dans la trentième et dernière proposition de la Catoptrique(1) Euclide semble assimiler lumière solaire et lumière mais cette proposition pourrait être, au moins en partie, une addition tardive, provenant peut-être d'un ouvrage d'Archimède.

Damianus, sans doute au quatrième siècle de notre ère, attribue les mêmes propriétés aux deux types de lumière et, citant Héron d'Alexandrie (-100) déclare que le mouvement de la lumière est rectiligne(2) afin d'être de moindre durée (ce qui sera le Principe de Fermat).

Les atomistes, Leucippe de Milet, Démocrite d'Abdère, Epicure, relayés par Lucrère et Galien de Pergame, considèrent (courant b) que le corps émet des effluves, des species, fantômes ayant la forme du corps et venant s'imprimer sur l'oeil. Au onzième siècle, Alhazen s'engagera dans cette voie mais en faisant émettre chaque point du corps illuminé, l'oeil et le cerveau reconstituant l'image.

Le courant Platonicien admet une double action : l'objet émet un flux objectif, corpusculaire, existant par lui-même et qui porte l'ordre, la forme et les couleurs, mais l'oeil émet aussi et c'est la rencontre des deux flux qui rend la vision effective.

Aristote critique les diverses conceptions. Si les yeux émettaient on verrait aussi bien la nuit que le jour, mais si les corps émettaient leurs simulacres comment ceux-ci pourraient-ils se croiser sans déformation ?

Nous devons indiquer ici un défaut majeur de cet (notre) article. Nous avons déjà indiqué que les phénomènes optiques sont nécessairement liés à la vision, normale ou non ; il serait intéressant d'étudier les théories de la vision et leur corrélation avec le concept de lumière, c'est même une nécessité et cela permettrait d'associer les professeurs de biologie à un travail interdisciplinaire. Nous n'avons pu prendre cet aspect en compte (...et il est bon que d'autres travaillent).

La première description structurale de l'oeil semble revenir à Galien de Pergame (130-201) pour lequel l'extérieur émet vers

(1) opus cité.
(2) RONCHI, Histoire de la Lumière, p. 22.

le cristallin, partie réceptive de l'oeil sensibilisée par l'âme à travers le nerf optique. Alhazen, au 11ème siècle, aborde le problème de la lumière par des considérations physiologiques : la lumière peut blesser les yeux, la tonalité des couleurs varie avec la lumière qui les éclaire, un objet trop éclairé ne laisse pas voir ses détails, les images persistent dans l'oeil, on ne voit les étoiles que la nuit(1). En conclusion, il n'est pas raisonnable de penser que l'oeil émet quelque chose pour voir. Alhazen suppose que chaque point du corps émet et que chaque rayon impressionne un point du cristallin, corps transparent mais particulier puisque sensible mais non traversé. Alhazen connait pourtant la rétine. Est-ce pour éviter d'avoir à transmettre au cerveau des images inversées qu'il fait du cristallin la plaque sensible de l'oeil ?

Les hésitations durent. Si pour Roger Bacon (13ème siècle) la lumière est une sorte de mouvement, transmissible dans un temps très bref et avec moins de rapidité dans les milieux les plus "denses", Dante, cinquante ans plus tard (La Divine Comédie et Chap. IX. Le Convive) (2) énonce des idées très Gréco-Romaines... opinions de vulgarisateur cultivé.

A l'aube du dix-septième siècle cependant la lumière est émise par les points de l'objet. Il reste à savoir ce qui est émis, comment s'effectue la propagation et surtout à poser clairement ces problèmes où se mêlent philosophie, physique, géométrie et biologie.

<u>Extrait du prologue à la récension de l'Optique d'Euclide</u> par Théon d'Alexandrie, prologue où Théon est cité à la troisième personne : "Lorsqu'il expliquait les choses relatives à la vue, il apportait en manière de conclusion certaines confirmations du fait que toute lumière se propage suivant des lignes droites, et il en relevait comme preuve la plus importante les ombres projetées par les corps, ainsi que les traits lumineux introduits par les fenêtres et par les ouvertures ; car toutes ces choses n'auraient pas lieu, comme on constate qu'elles se produisent maintenant, si les rayons du soleil ne se propageaient pas suivant des lignes droites... ...D'ailleurs, tous ces faits s'observent de la façon la plus manifeste dans des conditions que l'on obtient artificiellement. Ainsi, par exemple, si, en disposant une lampe n'importe de quelle manière, l'on place devant celle-ci un petit panneau muni d'une

(1) RONCHI, op.cit., p. 33.
(2) idem, p. 45.

fente pratiquée à la fine scie, de telle sorte que la fente tombe suivant le milieu de la lampe, et si l'on met, en outre, de l'autre côté du petit panneau, et très près de lui, un petit panneau sur lequel tombera la lumière introduite à travers la fente, on découvre indubitablement que la lumière projetée sur le petit panneau est entourée de lignes droites, et que la ligne qui relie le milieu de la lampe et la fente du petit panneau est dans une même droite. Le fait que toute lumière se propage suivant une ligne droite étant sensible et patent pour tout le monde, il s'est occupé de l'oeil et des rayons qu'il projette. Il a voulu qu'on lui concède aussi que ces rayons se propagent suivant des lignes droites tout en s'écartant l'une de l'autre, et que ce soit pour cela, tout en fournissant l'exemple suivant, que les objets regardés ne sont pas vue entièrement tout à la fois. En effet, si une aiguille, ou quelque autre petit corps de ce genre, est jeté sur le sol, d'aucuns se sont livrés souvent d'une manière obstinée à leur recherche ; ils ont scruté plusieurs fois un même endroit, bien que rien ne cachât le petit objet cherché, et ils n'ont cependant vu l'aiguille que plus tard, en dirigeant la vue sur l'endroit où se trouvait ce petit objet. Il est donc évident que, s'ils n'ont pas vu l'objet tombé c'est que l'endroit où il se trouvait n'a pas été vu non plus ; de sorte que toutes les parties de l'endroit placé sous l'oeil du chercheur n'ont pas été regardées ; car, si elles l'avaient été, l'objet cherché aurait été vu ; or, il n'a pas été vu... ...et si des images excitant notre perception affluaient continuellement de tous les corps, quelle serait dès lors, disait-il, la cause pour laquelle celui qui cherche une aiguille ne la voit pas, et pour laquelle celui qui regarde attentivement un livre n'en voit pas toutes les lettres ? Serait-ce parce qu'il est distrait d'esprit ? Cependant, ceux qui cherchent en réfléchissant ne trouvent néanmoins pas, et ils trouvent souvent aussitôt tout en conversant avec autrui et en ayant l'esprit distrait. Or, toutes les images ne parviendraient-elles pas à la vue ? Pourquoi celles qui y parviennent seraient-elles alors désignées par le sort ? Il alléguait encore que, chez les êtres vivants, la nature avait organisé les sens, les uns d'une manière propre à la réception, les autres d'une manière qui ne l'est pas. C'est ainsi qu'elle a organisé l'ouïe, le goût et l'odorat en cavités internes, en raison de ce que les éléments qui excitent ces sens leur parviennent de l'extérieur. En effet, la voix, en arrivant à l'ouïe, doit trouver un endroit favorable pour s'y maintenir, afin de ne pas laisser le sens inerte en étant repoussée dès son arrivée, et ne pas rendre ainsi la voix transmise en vain. Il en est encore de même pour l'odorat, et, quant au goût, que faudrait-il en dire ? Dès lors, si ces sens ont été organisés creux et caverneux, c'est principalement pour que les éléments qui les frappent y séjournent plus longuement. D'autre part, en ce qui concerne la vue, si les éléments qui l'excitent lui arrivaient de l'extérieur, et si elle ne faisait pas émaner quelque chose d'elle-même, il aurait fallu que son organisation fut concave et appropriée à la réception des éléments qui la frappent. Or, on constate qu'il n'en est pas ainsi, et que la vue est plutôt globulaire. Il estimait en avoir dit assez pour prouver que des rayons en émanent et provoquent l'émotion visuelle ; tandis que, pour prouver que les arcs situés dans le même plan que l'oeil ont l'apparence de lignes droites, il disait notamment que l'oeil, situé dans le même plan qu'un objet regardé quelconque, est disposé de telle sorte qu'il ne soit ni plus haut ni plus bas que l'objet regardé ; car c'est là ce que signifie se trouver dans le même plan, et que, par conséquent, si l'oeil n'est pas plus haut ni plus bas qu'un arc décrit dans un plan, il ne projette pas de rayons sur les parties plus hautes ni sur les parties plus basses, mais il projette les rayons menés au travers du plan d'une manière uniforme sur toutes les parties de l'arc ; de sorte que le plan et l'arc décrit dans ce plan donnent l'impression d'une ligne droite pour une raison identique ; car le plan, situé sur la même droite que l'oeil, est invisible, puisque aucun rayon émanant de l'oeil ne tombe sur lui, et que, ce qui est vu est sa limite, c'est-à-dire son contour, (il désignait ainsi la ligne placée à proximité de l'oeil, laquelle, en cachant les autres parties du plan, le rend invisible), et la cause qui donne l'impression de former une droite, dans le cas du plan situé dans la direction de l'oeil, est la même que celle qui donne également l'impression de former une droite dans le cas des arcs situés dans le même plan que l'oeil".

III. La Réfraction avant 1600

Nous avons déjà mentionné le 6è postulat de la Catoptrique d'Euclide. Il ne peut cependant servir de repère chronologique, le texte d'Euclide semble avoir été perdu très tôt et l'on peut envisager qu'un pseudo-Euclide, compilateur de diverses oeuvres, ait introduit ce postulat qui n'avait pas sa place dans un traité de Catoptrique (étude de la Réflexion). Le compilateur en question pourrait être Théon d'Alexandrie, ce qui nous conduirait au 4è siècle de notre ère, deux siècles après l'étude quantitative réalisée par Ptolémée. L'oeuvre de ce dernier n'aurait alors guère marqué ses successeurs.

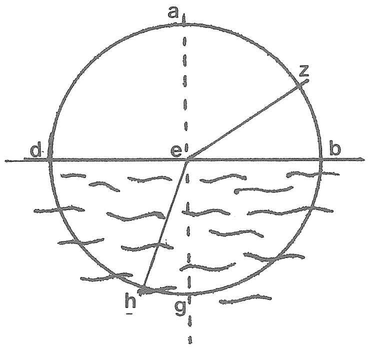
A l'orée de l'ère Chrétienne les vulgarisateurs s'en tiennent au contenu du 6è postulat, ceci indique les connaissances de "l'honnête homme" sur un phénomène considéré sans doute comme plus curieux qu'important. Voici comment s'exprime Cleomedes, vulgarisateur du 1er siècle avant ou après JC. : "si dans une coupe ou quelqu'autre récipient on place un anneau d'or et si le récipient est vide, en se plaçant à une distance convenable on ne voit pas ce qu'il y a au fond parce que la "respiration visuelle" se déplace en ligne droite le long du bord du récipient. Mais si on remplit le vase d'eau, de la même distance, on voit l'anneau qui est au fond, parce que la "respiration visuelle" ne suit plus une ligne droite selon le bord mais touchant l'eau et se brisant elle va au fond et rencontre l'anneau"(1).

Au second siècle de notre ère Claude Ptolémée s'attache à la première étude expérimentale quantifiée que nous connaissions sur la Réfraction.

L'oeuvre de Ptolémée en Optique est connue à travers une traduction en latin, au 12è siècle, d'un texte arabe mutilé(2). L'Optique de Ptolémée comprend cinq livres. Le premier, perdu, étudie la Vision ; le second parle de la Lumière, constituée de rayons émis par l'oeil, sortes de bras qui vont toucher l'objet. Les troisième et quatrième traitent de la réflexion sur les miroirs plans, concaves, convexes, cylindriques et comportent descriptions et compte-rendus d'expériences faites à l'aide d'un cercle gradué portant en son centre un miroir. Le cinquième traite de la Réfraction.

(1) COSTES PLA, El enigma de la luz.
(2) ITARD Jean, La Réfraction chez Képler (qui cite Brunet et Mieli p. 822-833, Histoire des Sciences - Antiquité).

Ptolémée mentionne que la normale à la surface de séparation des milieux et les rayons, incident et réfracté, sont coplanaires. Il conduit des expériences sur la mesure des angles d'incidence et de réfraction(1) : Le diamètre (db) d'un cercle vertical gradué est placé dans le plan de séparation des deux milieux (air-eau ; air-verre ou eau-verre). On cherche à réaliser l'alignement apparent du centre e du cercle avec les curseurs h et z (avec un matériel plus sophistiqué c'est le type des expériences scolaires actuelles).



Ptolémée énonce que l'arc gh sera toujours inférieur à l'arc az sauf si z est en a, auquel cas il n'y a pas réfraction. Il donne des séries de valeurs : "si l'arc az est de 10 des 90 parties qui divisent le quart du cercle, l'arc gh sera approximativement de 8". Dans le cas du passage de l'air dans l'eau on a :

arc az	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
arc gh	8°	15,5°	22,5°	29°	35°	40,5°	44,5°	50°
	7,48	14,86	22,02	28,82	35,07	40,50	44,81	47,61

La troisième ligne du tableau ci-dessus est obtenue par la loi des sinus (17è siècle) en prenant pour indice* de réfraction air-eau la valeur $n = \frac{4}{3}$, c'est-à-dire que $\sin i = \frac{4}{3} \sin r$ où i correspond à l'arc az et r à gh. On constate que l'accord est assez bon, et même bon entre 40° et 60°.

(1) CORTES PLA, El enigma de la luz, p. 64 et suivantes.

Au-delà de la qualité des mesures qui seront utilisées sans grandes modifications jusqu'au 17è siècle, la structure même du tableau mérite examen. Les différences successives entre les valeurs de gh sont 7,5 ; 7 ; 6,5 ; 6 ; 5,5 ; 5 et 4,5. Ces différences diminuent régulièrement de 0,5 ou, comme l'on dit, les différences secondes sont constantes et égales à -0,5. Képler, dans son Paralipomena, fait remarquer cet ajustement des données expérimentales sur un a priori mathématique. On est ici en présence d'une technique qui remonterait à l'astronomie babylonienne(1) et qui laisse des traces au cours du moyen-âge. La loi d'Ufano sur la portée du canon(2) en est un exemple. Face à un phénomène difficile à cerner, dont les variations ne laissent apparaître aucune proportionnalité mais qui est, au sens actuel, monotone, on lisse, on régule, les variations en considérant que celles-ci varient comme les termes d'une suite arithmétique (différence constante), on remplace donc le phénomène étudié par un phénomène que Nicole Oresme (14è siècle) aurait qualifié d'uniformément difforme. La fonction sous-jacente à la table de Ptolémée est, pour nous, $r = \frac{33}{40} i - \frac{i^2}{400}$ où r équivaut à gh et i à az. Mais Ptolémée n'énonce pas une loi en terme de fonction, l'énoncé d'un tableau de corrélation est pour lui un objectif satisfaisant.

Le livre de Ptolémée s'achève brusquement sur un début d'exposé d'expériences liées aux précédentes...

La "Renaissance Arabe" nous offre, au 11è siècle, une nouvelle étude expérimentale d'envergure avec "le Trésor de l'Optique" d'Alhazen et son résumé "Le discours de la Lumière(3)". L'oeuvre d'Alhazen exerce une grande influence, si elle n'est traduite qu'en 1572(4) elle est connue en Europe à travers le traité de Vitellion écrit en Italie vers 1271 et imprimé dès 1533. Le titre choisi par Képler en 1604 : "Ad Vitellionem Paralipomena" en témoigne.

Dans l'Optique d'Alhazen la lumière n'est pas émise par l'oeil et le ton un peu polémique laisse penser que l'auteur s'attaque à une conception encore dominante ou, au moins, très courante. Non seulement la lumière est émise par l'objet vu, en lignes droites et dans toutes les directions ("propagation sphérique de la lumière")

(1) ITARD Jean, La Réfraction chez Képler.
(2) Evelyne BARBIN, article sur La portée du canon dans le présent document.
(3) RASHED, Le Discours de la Lumière - Alhazen.
(4) traduction due à F. RISNER, publiée à Basel. Une traduction très fragmentaire a été publiée à Lisbonne en 1542 par Crémone.

mais chaque point de l'objet émet, ce qui est une innovation ; il ne s'agit plus de "simulacres", "écorces" ou autres, voyageant vers l'oeil et émanant en bloc de l'objet.

Si nous notons i l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction et D l'angle de déviation formé par le rayon incident prolongé et le rayon réfracté, les "lois" énoncées par Alhazen peuvent se traduire par(1) :

rayons incident et réfracté et normale à la surface sont coplanaires. Si $i' > i$ alors $D' > D$

$D' - D < i' - i$

$\frac{D}{i}$ n'est pas constant et si $i' > i$ alors $\frac{D'}{i'} > \frac{D}{i}$

Si $i' > i$ alors $r' > r$

Pour i fixé, D varie selon l'opacité des milieux

Si un rayon issu de z se brise en e selon eh, un rayon issu de h se brisera en e selon ez (loi du retour inverse). Les troisième et cinquième affirmations ne sont pas générales mais dans les conditions expérimentales où se plaçe Alhazen, le dispositif est semblable à celui de Ptolémée(2), il ne pouvait le percevoir(1). Nous verrons plus loin comment Képler "exploite" la quatrième affirmation.

Alhazen ne se contente pas d'expérimenter avec soin, il utilise la Réfraction pour expliquer certains phénomènes astronomiques, il déduit par exemple de ses observations sur le soleil que l'atmosphère terrestre a une épaisseur d'environ 16 000 km. Surtout il tente d'expliquer le phénomène lui-même. Alhazen se base sur une analogie entre la propagation de la lumière et le mouvement des projectiles(3). Lors de la réflexion sur un miroir la lumière "rebondit" comme une balle qui frappe le sol sous un angle quelconque. Alhazen décompose alors le mouvement en une composante parallèle à la surface séparant les deux milieux et une composante perpendiculaire à celle-ci. La composante parallèle à la surface, qui effleure celle-ci, n'a aucune raison pour être modifiée. L'autre composante correspond à une pénétration dans le second milieu. Elle peut donc se trouver augmentée si ce milieu est plus facile à traverser que le premier, ou diminuée dans le cas contraire (totalement et brusquement inversée lors de la Réflexion). Alhazen semble ne pas aller plus loin ; nous verrons les prolongements de cette tentative, ou sa réinvention, chez Descartes et Newton.

(1) RASHED, Le discours de la Lumière - Alhazen.

(2) CORTES PLA, El Enigma de la Luz, p. 82.

(3) CORTES PLA, El Enigma de la Luz, p. 80, qui cite Mieli La Science arabe, p. 106, Ed. E.J. Brill Leyde 1938.

Dès la fin du 13ème siècle on utilise les verres correctifs, progrès empirique, né vraisemblablement chez les verriers de Venise ou de la vallée de l'Arno. On peut imaginer quelque vieux maître verrier (Presbyte, presbytère, prêtre : âgé) remarquant qu'il voit mieux à travers un verre qu'il examine pour contrôler son travail. La diffusion commerciale des verres correctifs, convexes pour les presbytes, concaves pour les myopes, semble rapide mais ne provoque aucune recherche théorique jusqu'au 16ème siècle. On ne peut croire que les "milieux universitaires" ne soient parmi les utilisateurs mais il y a comme une conspiration du silence face à cette vulgaire technique (Technè : métier, art, moyen, mais aussi artifice, machination)(1). Il est d'ailleurs intéressant de constater que le premier auteur influent qui traite du sujet, Della Porta, utilise deux termes(2) : dans la Magia Naturalis, oeuvre de vulgarisation qui fut largement diffusée (1ère édition en 1558 suivie d'une cinquantaine d'autres en latin, italien, français, arabe) il utilise le terme courant de Lentille, "lens cristallina", par contre dans son ouvrage savant De Refractione publié en 1593 il utilise "Specillum" (petit miroir, en latin classique ; à rapprocher de "Species", ces formes émanées des objets et qui provoquent la vision dans l'oeil).

L'oeuvre de Della Porta a sans doute exercé une grande influence. Il analyse les effets des lentilles convexes et concaves, compare, au moins dans l'édition de 1589, l'oeil à une lentille placée à la sortie d'une chambre noire (Cardan et Léonard de Vinci l'ont déjà fait, mais ils furent peu lus). Il accuse les scientifiques de n'avoir pas porté attention aux propriétés des lentilles. Dans tous les cas cette oeuvre témoigne d'un nouvel état d'esprit, du désir de rendre compte du phénomène, et l'on peut s'amuser à voir un raccourci de l'histoire en comparant les titres de 1558 et de 1593 qui nous font passer de la "magie naturelle" à la "réfraction", des illusions d'optique à l'analyse du phénomène.

Della Porta nous intéresse à un autre point de vue, non seulement il provoque sciemment le monde scientifique mais encore, dans la Magia Naturalis, il donne une recette pour associer des lentilles convexes et concaves ; il semble que ce soit pour corriger des défauts

(1) Le roman d'Umberto ECO, Le Nom de la Rose, donne un aperçu vivant sur le sujet.
(2) RONCHI, Histoire de la Lumière, p. 62.

profonds de vision mais, qu'interprétée autrement, cette recette ait conduit à la première lunette à objectif divergent (1590) en Italie, lunette construite par des verriers. Cette innovation aurait été exportée vers la Hollande et se serait diffusée à partir de 1604 en Europe. Ces lunettes, vendues à prix modique, sont de mauvaise qualité et les milieux scientifiques en critiquent la fourberie : elles font voir n'importe quoi, seuls nos sens nous permettent de connaître le monde extérieur et seules nos "idées", priorité platonicienne, permettent de l'expliquer. Galilée prendra une position différente : les lunettes mal construites créent des illusions, mais c'est par leurs défauts et non par principe, il faut les améliorer... et il y parviendra. Sur ce problème des sens, prolongés, améliorés ou déformés par les appareils, on lira avec intérêt l'article "Roberval éditeur de Mersenne et de Nicerôn" dans le numéro de Juillet-Septembre 1957 de la Revue d'Histoire des Sciences.

Pour terminer ce tour d'horizon et rappeler au lecteur l'existence des textes, seules références acceptables, nous donnons ci-dessous les débuts de l'Optique et de la Catoptrique d'Euclide, mais on lira avec intérêt l'introduction de P. Ver Eecke(1) que nous ne pouvons, à notre regret, donner ici.

"DEFINITION :

I. Supposons que les lignes droites qui émanent de l'oeil se propagent à divergence des grandes grandeurs (dans sa récension Théon d' Alexandrie dit :

I. Supposons que les rayons visuels émanés de l'oeil se propagent suivant des lignes droites faisant quelque divergence entre elles).

II. Et que la figure comprise sous les rayons visuels est un cône ayant son sommet dans l'oeil, et sa base aux limites des grandeurs regardées.

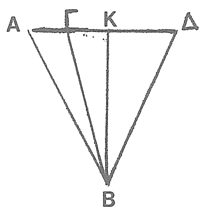
III. Et que les grandeurs sur lesquelles tombent les rayons visuels sont vues ; tandis que celles sur lesquelles les rayons visuels ne tombent pas ne sont pas vues.

IV. Et que les grandeurs vues sous un plus grand angle apparaissent plus grandes ; tandis que celles qui sont vues sous un plus petit angle apparaissent plus petites, et que celles qui sont vues sous des angles égaux apparaissent égales.

V. Et que les grandeurs vues sous des rayons plus relevés apparaissent

(1) op.cit.

plus élevées ; tandis que celles qui sont vues sous des rayons plus abaissés apparaissent plus basses.
VI. Et que pareillement, les grandeurs vues sous des rayons plus à droite apparaissent plus à droite ; tandis que celles qui sont vues sous des rayons plus à gauche apparaissent plus à gauche.
VII. Enfin, que les grandeurs vues sous des angles plus nombreux apparaissent plus distinctement.
PROPOSITION I. (Théor.) - Nulle grandeur regardée n'est vue simultanément tout entière.
En effet, soit AΔ la grandeur regardée, et soit B l'oeil d'où tombent les rayons visuels BA, BΓ , BK, B Δ . Dès lors, puisque les rayons visuels incidents se propagent en divergence, ils ne tombent pas



sur la grandeur AΔ d'une manière contiguë ; en sorte qu'il se produit aussi, sur la grandeur AΔ , des intervalles sur lesquels les rayons visuels ne tombent pas. En conséquence, on ne verra pas simultanément toute la grandeur AΔ ; mais, comme les rayons visuels se transportent rapidement, il semble que l'on voit simultanément".

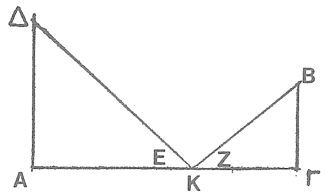
Enchaînons sur le début de la Catoptrique :

"DEFINITION :

I. Soit supposé que le rayon visuel est une droite dont toutes les parties médianes se butent à des limites.
II. Que tous les objets regardés sont vus suivant des lignes droites.
III. Qu'un miroir étant posé dans un plan, il y a proportion telle que la hauteur de celui qui regarde est à la hauteur établie à angles droits sur le plan comme la droite menée entre le miroir et celui qui regarde est à la droite menée entre le miroir et la hauteur établie à angles droits.
IV. Qu'un objet regardé dans les miroirs plans n'est pas vu occupant le lieu sur lequel tombe la perpendiculaire amenés de l'objet regardé.
V. Qu'un objet regardé dans les miroirs convexes n'est pas vu occupant

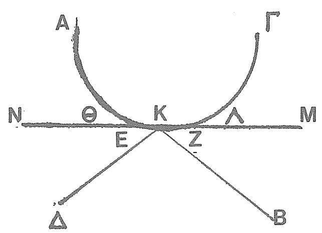
le lieu par où passe la droite menée de l'objet regardé au centre de la sphère, et que la même chose a lieu dans les miroirs concaves.
VI. Que si quelque objet regardé dans un vaisseau y acquiert une distance telle qu'il ne soit pas vu, et si cette distance restant la même, on verse de l'eau, l'objet regardé sera vu.

PROPOSITION I. (Théor.) - Les rayons visuels sont réfléchis sous des angles égaux par les miroirs plans, convexes et concaves. Soit B l'oeil et AΓ le miroir plan. Que le rayon visuel BK se propage de l'oeil, et soit réfléchi au point Δ ; je dis que l'angle Z est



égal à l'angle E. Menons les perpendiculaires BΓ , ΔA sur le miroir. Dès lors, la droite ΔA est à la droite AK comme la droite BΓ est à la droite ΓK ; car cela a été supposé dans les définitions. En conséquence, le triangle BΓK est semblable au triangle ΔAK ; donc, l'angle E est égal à l'angle Z ; car les triangles semblables sont équiangles.

Que le miroir AKΓ soit maintenant convexe, et que le rayon visuel BK soit réfléchi sur le point Δ ; je dis que l'angle, somme des angles E, Θ, est égal à l'angle somme des angles Z, Λ. Ajoutons le miroir plan NM ; il s'ensuit que l'angle E est égal à l'angle



Z. Mais l'angle Θ est égal à l'angle Δ ; car la droite MN est une tangente ; donc, l'angle entier, somme des angles E, Θ , est égal à l'angle entier, somme des angles Λ , Z.

IV. Les enjeux philosophiques

Les premières applications du phénomène de réfraction sont, nous l'avons vu, liées à l'astronomie et à la réfraction de l'atmosphère terrestre. Après les astronomes Ptolémée, Alhazen, nous trouverons l'entourage de Tycho-Brahe avec Képler et Snellius. Optique et astronomie s'accompagnent. Mais la première application pratique, qui concerne la vie quotidienne, est apparue empiriquement, pure technique mise au service du mal-voyant. L'emploi de verres correctifs pose problème non à l'individu mais à la Science. Si celle-ci a bien pour objectif de découvrir la Vérité de la Nature elle ne peut y parvenir par la ruse, la machination. Notre connaissance du monde passe par nos sens, seul lien naturel, par ailleurs les illusions d'optique dues aux arfices humains sont notoires, même un simple miroir permet de voir ce qui est là où il n'est pas. Si nous voulons connaitre la nature évitons de la déformer, de n'étudier que des illusions dont nous sommes les propres créateurs (Magia Naturalis est un titre évocateur). La position radicale du "milieu intellectuel" peut nous surprendre, mais le problème demeure : qu'est-ce qu'un instrument fiable ? quelle est l'influence de l'observation sur le phénomène observé ? dans quelle mesure la Physique crée-t-elle la réalité qu'elle étudie ?

Della Porta introduit l'étude des lentilles dans le champ théorique, provoque sans doute l'invention de la lunette. Mais lorsqu'en 1610 Galilée annonce ses découvertes astronomiques obtenues avec une lunette de sa fabrication il trouble le clan des savants. Képler lui-même, dont l'avis est sollicité, hésite. Astronome d'avant-garde et théoricien de la réfraction, il est pourtant peu enclin à craindre les innovations. Après un premier essai avec une lunette de mauvaise qualité, Képler reçoit, par l'Electeur de Cologne, une lunette offerte par Galilée et laisse éclater son enthousiasme(1).

Si la publication en 1610 du "Sidereus Muncius" de Galilée provoque des réactions violentes, et l'hésitation de Képler, c'est que l'enjeu est d'importance, à travers l'Optique c'est en fait l'édifice scientifique Aristotélo-scolastique qui est mis en question.

Il s'agit en effet d'un débat de fond portant sur deux thèmes : la structure du monde d'une part, qui régit la "philosophie naturelle",

(1) lettre à Galilée, 30 août 1610, rapport officiel en septembre 1610.

la relation de l'homme aux vérités éternelles d'autre part, c'est-à-dire le rôle de l'expérimentation instrumentale. Copernic, en plaçant le soleil au centre de l'univers, a peut-être moins ébranlé l'édifice scientifique et philosophique qu'un Galilée qui "invente" de nouveaux objets et phénomènes ou un Képler qui rompt avec la notion de mouvement circulaire uniforme. Les hardiesses de Copernic peuvent en effet n'être considérées que sur le plan de l'abstraction ; avec Galilée l'objectivité de l'observation instrumentale est interrogée ; avec Képler, c'est le type même, la logique interne, des explications qui est remis en cause. Avant Copernic, Galilée et Képler, la hiérarchie du monde est claire : un univers sphérique ayant en son centre la sphère du monde sublunaire, lieu des changements, des mutations, des corruptions, de la vie et de la mort. Au-delà, le monde des astres éternels, incorruptibles. Copernic fait de la terre un astre, c'est un scandale, une atteinte à la philosophie. Mais il peut ne s'agir que d'un modèle intellectuel, qui a ses avantages bien qu'il ne soit pas beaucoup plus simple que le système géocentrique de Ptolémée. Il repose solidement sur la notion de mouvement circulaire uniforme, peut-être mieux même que le système héliocentrique. Avec Képler le mouvement circulaire uniforme disparait, les trajectoires calculées sur les observations de Tycho-Brahé, sont elliptiques et les mouvements ne sont plus uniformes. Il y a de quoi frémir car le modèle du monde se simplifiant, se généralisant, favorise l'héliocentrisme Copernicien. Galilée crée un danger plus inquiétant encore : il voit, il crée, des phénomènes inadmissibles de corruption dans le monde des astres ; Vénus, comme la Lune, a des phases, Jupiter est entouré de satellites et le Soleil lui-même porte des taches variables. Les premières lois cosmologiques de Képler sont de 1609, le Sidèreus Nuncius de Galilée est publié en 1610, l'univers bascule et les réactions des "classiques" sont souvent violentes. Le chevalier Florentin Sizi, très proche des académiciens de Pise(1), tente de nier ce que l'on voit dans la lunette et déclare entre autres que "...en fait, comme les maisons reposent sur leurs fondements, les sciences se fondent sur les principes ; si ceux-ci sont détruits, il est fatal que, comme une maison, la science s'écroule". La Science est-elle un savoir installé ou savoir en devenir...

(1) RONCHI, Histoire de la Lumière, p. 88.

V. De Képler à Descartes

Képler publie en 1604 ses "compléments à Vitellion" (Ad Vitellionem Paralipomena - Francfort - Bibliothèque Nationale v 7724). Cet ouvrage important qui englobe cinq chapitres d'Optique et six d'Astronomie, semble n'avoir eu que peu d'influence en son temps. Au chapitre IV Képler étudie la réfraction et quelques applications à la réfraction atmosphérique. Le titre de l'ouvrage rend hommage, à travers Vitellion, à Alhazen, mais l'étude renouvelée de la réfraction doit sans doute à la réaction impulsée par Della Porta, que Képler cite, et peut être à quelque copie de l'ouvrage de Maurolico alors non publié.

L'originalité fondamentale de Képler réside dans la recherche explicite d'une relation de type mathématique entre angle d'incidence et angle de déviation ou de réfraction. Bien qu'expérimentateur éprouvé, Képler n'a pas pour souci principal d'améliorer les mesures de Ptolémée ou de Vitellion, mais de tirer de celles-ci une relation, donc autre chose qu'un tableau de corrélation.

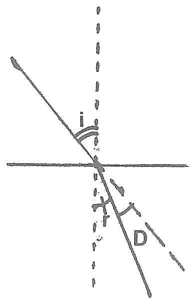
Le texte des Paralipomena est un texte vivant en ce sens qu'il semble écrit plutôt au fil des idées naissantes qu'après un temps de maturation. Les formulations sont souvent ambigues, se précisent ou corrigent les unes les autres et c'est en voyant Képler pratiquer que l'on comprend le plus sûrement sa pensée(1). La structure de l'ouvrage incite à penser que la recherche d'une loi est liée à celle de la forme des verres : il s'agit de trouver la surface de séparation sur laquelle un faisceau de rayons parallèles se réfractera en un faisceau conique. Si l'on considère une surface de révolution le problème revient à déterminer une courbe plane, dite courbe anaclastique (ana-klasis : action de briser).

Pour parvenir à ses fins Képler affronte, qualitativement, l'un des premiers problèmes inverses des tangentes : il cherche à reconstituer une courbe à partir de renseignements portant sur les tangentes à la courbe.

Pour donner une idée du problème partons des tables de Vitellion et Ptolémée, connues de Képler. Soit O le point d'où divergent les rayons qui se réfracteront tous "horizontalement", et S le point de la courbe situé sur l'axe de symétrie.

(1) ITARD Jean, La Réfraction chez Képler.

Si on connaît un point M de la courbe, le rayon OM se réfracte en Mx et la Déviation, D, apparaît sur la figure. Connaissant i, angle d'incidence, on peut alors construire la normale à la surface et donc aussi sa tangente. La figure s'obtient alors en confondant courbe et tangente au voisinage du point de contact, d'où une ébauche de courbe, première approche de la solution.



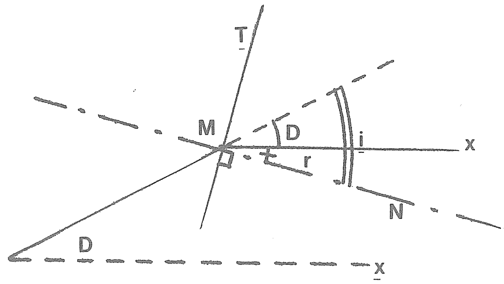
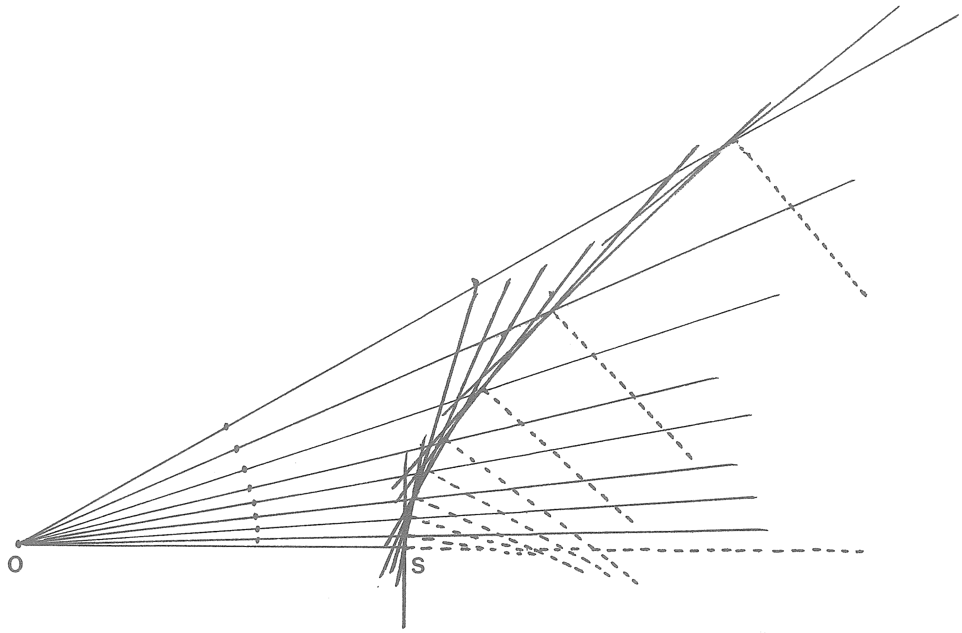


figure faite sur les données de Vitellion :



Képler sait dès lors que la courbe s'apparente à une hyperbole(1) mais ne peut aller plus loin. L'outillage mathématique reste à inventer et les données de Vitellion sont, on l'a vu, biaisées par la règle des différences secondes constantes. Nous explicitons en appendice

(1) voir en fin de chapitre la lettre de Descartes à Mersenne.

la liaison entre hyperbole et loi des sinus.

Képler sait à travers Vitellion, donc par Alhazen, que la déviation D n'est pas proportionnelle à l'incidence i et que pour $i' > i$ on a $\frac{D'}{i'} > \frac{D}{i}$. Ayant, relativement, échoué dans la recherche de l'anaclastique il tire de sa tentative, par des considérations peu claires, l'idée d'une proportionnalité à "géométrie variable", c'est à dire qu'il part d'un "noyau proportionnel à i ("réfraction simple" ou, plutôt, "Déviation simple"), noyau qu'il module par analogie entre le type de variation de la déviation et celui de la sécante (pour nous, l'inverse du cosinus). Sa formule revient à $D = ki\ (1+\varepsilon)$ où $1+\varepsilon = \sec r = \frac{1}{\cos r}$ (Paralipomena. Prop. X p. 127 : "Propositio 6 hujus capitis indicatum est, multiplicari simplicem refractionem ejus inclinationis, quae est radii in medio tenuiri super superficem communem, à secante ejus inclinationis, quae est refracti in medio densiore super superficiem communem").

Képler, tenté par des méthodes algébriques ("cela se ferait par l'algèbre si les notations algébriques s'appliquaient aussi bien aux courbes qu'à la droite"(1)), se voit obligé de procéder par approximations successives. Partant (pour quelle raison ?) des valeurs $i = 80°$, $D = 30°$ qui ne sont pas, expérimentalement, les meilleures de la table de Ptolémée, il obtient, avec $r = 50°$

$$ki = 80\ k = D.\ \cos r = 19°17'$$

ce qui revient à $k \simeq 0{,}241$ et permet, pour chaque incidence, de calculer la "réfraction simple". Selon les tables de Vitellion la "partie additionnelle liée à la sécante" est donc, pour $i = 80°$, de 10°43'. Képler calcule alors sa propre table comme indiqué ci-dessous. Cette table diffère de celle de Vitellion et Képler le mentionne explicitement (en substance : il est certain que Vitellion a manipulé ses résultats expérimentaux car ceux-ci font apparaître des différences secondes constantes(2)).

Suivons les calculs de Képler. Il admet que pour $i = 80°$ on a $ki = 19°17'$, ainsi pour $i = 50°$ on aura $ki = \frac{5}{8}\ (19°17') \simeq 12°04'$ qui fournit une <u>première approximation</u> de la déviation D, soit D_1 cette valeur. (Képler n'introduit pas la constante k, il procède par proportions comme nous venons de le faire).

(1) ITARD Jean, <u>La Réfraction chez Képler</u>.
(2) <u>Paralipomena</u>, p. 116.

L'approximation D_1 de D fournit une première approximation, r_1, de r par $r_1 = i - D_1$. Cette valeur donne alors, en appliquant la formule de Képler, une nouvelle approximation D_2 de D, puis une approximation r_2 de r et l'on réitère le procédé :

$$D_1 = ki \qquad r_1 = i - D_1$$

$$D_2 = \frac{D_1}{\cos r_1} = D_1\,(1+\varepsilon_1) \qquad r_2 = i - D_2 = r_1 - \varepsilon_1 D_1$$

$$D_3 = \frac{D_2}{\cos r_2} = D_1\,(1+\varepsilon_2) \qquad r_3 = i - D_3 = r_1 - \varepsilon_2 D_1$$

Dans l'exemple choisi, i = 50°, on a trouvé par proportions D_1 = 12°04' qui est la "déviation proportionnelle". On obtient alors :

$$r_1 = 37°56' \qquad \frac{1}{\cos r_1} = 1{,}26787 \qquad \varepsilon_1 D_1 = 3°14'$$

$$r_2 = 34°42' \qquad \frac{1}{\cos r_2} = 1{,}21633 \qquad \varepsilon_2 D_1 = 2°37'$$

$$r_3 = 35°19' \qquad \frac{1}{\cos r_3} = 1{,}22553 \qquad \varepsilon_3 D_1 = 2°43'$$

$$r_4 = 35°13' \qquad \frac{1}{\cos r_4} = 1{,}22402 \qquad \varepsilon_4 D_1 = 2°42'$$

et Képler conclut : "Comme 2°42' diffère insensiblement de 2°43' je m'arrête et dis que la déviation provenant de la sécante (additamentum ob secantis) est de 2°42' pour l'incidence 50°". La déviation totale déduite de la loi (Tota demonstrativa refractio) est ainsi de 12°4' + 2°42' soit 14°46' et Képler donne en regard la valeur annoncée par Vitellion, soit 15° (Vitellionis experientia investigata).

Képler ne pose pas le problème de la convergence, il agit. La suite r_1 , r_3 , r_5 ... décroît, tandis que r_2 , r_4 , r_6 ... croît. Les termes de rang impair sont supérieurs à ceux de rang pair. Il resterait, à notre époque, à prouver que $\left| r_n - r_{n-1} \right|$ tend vers zéro, mais à l'aube du 17ème siècle de telles questions ne peuvent se poser, elles sont hors de la problématique et la convergence se réalise dans les calculs de Képler, apportant ainsi une réponse suffisante.

La loi proposée par Képler, que nous exprimerions par $i - r = \frac{ki}{\cos r}$ où k est une constante, est intéressante à divers titres. Tout d'abord elle est la première loi énoncée, ensuite elle s'adapte bien aux données numériques sur lesquelles travaille Képler, elle s'y adapte aussi bien que la loi des sinus qu'elle précède d'une vingtaine d'années : Képler avait quelque raison de penser que sa formulation était la bonne, il avait réussi un joli lissage des données. Il est d'ailleurs curieux que Képler ait choisi comme pivot de son calcul la valeur marginale $i = 80°$ plutôt que la valeur centrale $i = 50°$, une petite programmation permet de comparer rapidement la loi de Képler basée sur cette valeur et la loi des sinus ($\sin i = n \sin r$, où $n = \frac{4}{3}$; l'accord pour les petits angles imposerait $k = \frac{n-1}{n} = 0{,}25$ alors que Képler aurait $k \simeq 0{,}246$), voici les résultats, à titre de curiosité.

	i	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Loi de Képler	r	7,52	14,91	22,04	28,78	35	40,58	45,48	49,63	53,13
Loi des sinus	r	7,48	14,86	22,02	28,82	35,07	40,50	44,81	47,61	48,59
Vitellion	r	8	15,5	22,5	29	35	40,5	45,5	50	.

Mais la loi énoncée dans les <u>Paralipomena</u> est encore intéressante à un tout autre titre : Képler transgresse, comme par inadvertance, les règles de la rigueur Euclidienne. Toute expression classique compare des rapports (λογοσ) de grandeurs de même "nature", de grandeurs homogènes. Le λογοσ n'est pas même un nombre comme le mot "rapport" peut le suggérer, mais "une certaine façon d'être", c'est à dire une relation (rapport au sens large). Et Képler est très classique lorsqu'il déclare "la déviation composée (totale) 30° est à la déviation proportionnelle à l'incidence 80° (ki dans nos explications, et ici k.80°) comme la sécante (de r) est à celle de 0° ou sinus total". Il énonce en effet qu'il existe la même relation (homothétie ?) entre tel angle et tel autre qu'entre telle longueur et telle autre (le sinus, la tangente, la sécante sont à l'époque des longueurs et non des <u>rapports</u> trigonométriques, le sinus total est le rayon du cercle considéré, que Képler prend égal à 100 000). Nous traduirons par $\frac{i-r}{ki} = \frac{\sec r}{\sec 0}$.

Mais dans la proposition X, déjà citée, Képler change de registre : "Dans la sixième proposition de ce chapitre il est indiqué de multiplier la réfraction simple (notre ki) de cette inclinaison, qui est du rayon dans le milieu le plus ténu sur la surface commune, par la sécante de l'inclinaison qui est du réfracté dans le milieu le plus dense sur la surface commune". Il énonce ainsi ce que nous écririons $i-r = ki \sec r$. Or la réfraction simple ki est, comme la déviation i-r, un angle ; Képler manipule donc ici la sécante comme un nombre et non comme une longueur. La dynamique du calcul prime sur la rigueur classique de l'époque, indique nos futurs "rapports trigonométriques", nombres purs, sans dimension physique, et annonce peut-être des audaces telles que le produit mV d'une masse par une vitesse (1686 Mariotte, Traité du mouvement des eaux est-il le premier ?)(1).

Abandonnons l'année 1604 et les Paralipomena. En 1609 Galilée construit sa première lunette et son Sidereus Nuncius est publié à Venise en 1610. Galilée s'intéresse peu à l'optique théorique mais ses observations astronomiques et la qualité des instruments qu'il produit provoquent une nouvelle recherche de Képler. La loi formulée en 1604 est lourde et n'est guère pratique pour établir une théorie de la lunette. Dans le Dioptrice, prêt dès septembre 1610 et publié en 1611, Képler énonce une forme simplifiée de la loi des Paralipomena en précisant que cette nouvelle formule n'est valable que pour de faibles incidences : "Les déviations sont, pour le cristal et jusqu'à l'incidence de 30°, sensiblement proportionnelles aux incidences. L'angle de déviation dans le cristal est, jusqu'au terme ci-dessus indiqué, très proche du tiers de l'incidence dans l'air"(2).

Sur cette loi simplifiée (i=nr), qui porte toujours son nom, Képler bâtit une étude des lentilles, une théorie de la lunette de Galilée et donne le principe du téléobjectif. Riche moisson qui nous entraînerait trop loin.

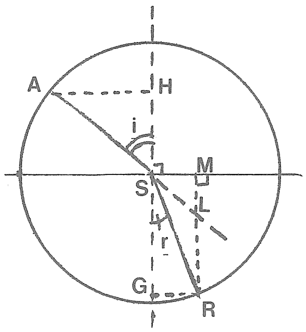
L'intérêt, alors récent mais intense, pour le phénomène de Réfraction est mis en évidence par l'apparition d'une nouvelle formule, simultanément ou presque, sous la plume de Snellius et sous celle de Descartes, vers 1625. Un phénomène similaire de double naissance s'est produit une dizaine d'années plus tôt pour les Logarithmes de Burgi et de Néper. Un problème crucial à une époque donnée provoque une mobilisation, la solution émerge parce qu'elle fait partie des priorités, et elle émerge souvent en différents endroits. Notons au passage le rôle moteur de l'Astronomie dans les deux cas cités. Snellius, comme Burgi et bien sûr Képler, a travaillé avec Tycho-Brahé, astronome hors du commun. Des relations ont existé entre Néper (Napier)

(1) 3ème règle. Citée dans Archives internationales d'Histoire des des Sciences n° 8 - 1949 - p. 868.
(2) ITARD Jean, La Réfraction chez Képler. Dioptrice Axiomes 7 et 8.

et "l'écurie" de Tycho-Brahé. Le Sidereus Nuncius de Galilée relance les recherches de Képler que Descartes reconnait comme son prédécesseur "le plus savant en optique", même s'il nie une influence trop directe(1).

Willebrod Snel Van Royen, dit Snellius(2) (Leyde 1580-30 octobre 1626), n'est sans doute pas comme Descartes l'un des phares du 17ème siècle mais c'est un scientifique de haut niveau. En 1613, il succède à son père, Rudolph, comme professeur à l'Université où il enseigne Mathématiques, Astronomie et Optique. S'il reste partisan de la cosmologie de Ptolémée, il participe aux observations de Tycho-Brahé et de Burgi. Il fréquente Van Ceulen et Simon Stevin qu'il traduit dès 1604. Il est impliqué dans la mesure du méridien pour laquelle il utilise la triangulation (proposée dès 1553 par Gemma Frisius) avec un cercle à graduation décimale (comme le recommande Stevin), il donne 34 décimales de π (en utilisant la méthode de Van Ceulen) et l'encadrement $\frac{3 \sin \phi}{2+\cos \phi} < \phi < \text{tg } \frac{\phi}{3} + 2 \sin \frac{\phi}{3}$; dans ses "leçons de navigation" il étudie les loxodromes en identifiant un petit triangle sphérique à un triangle plan. Il a aussi publié en 1604 une "restitution" de deux livres d'Apollonius.

Lecteur de Vitellion, Risner et Képler, expérimentateur patient, il énonce la loi des sinus dans un manuscrit de date incertaine (entre 1621 et 1626). Ce manuscrit, perdu, a été vu par Golius, en 1632 seulement, puis étudié par Vossius et Christian Huygens qui laissent entendre que Descartes s'en est inspiré, ce qui n'est ni prouvé ni impossible et importe peu pour notre sujet. La forme donnée par Snellius à ce que nous nommons loi des Sinus, ou loi de Descartes, est la suivante : il constate expérimentalement que le rapport $\frac{SL}{SR}$ est indépendant de i ce qu'il exprime par :



$$\frac{\text{cosec } i}{\text{cosec } r} = \frac{\text{cosec } i'}{\text{cosec } r'}$$ et que nous écririons

$$\frac{\text{cosec } i}{\text{cosec } r} = k$$ ou, plutôt, $\sin r = k \sin i$,

la cosécante étant pour nous l'inverse du sinus.

Descartes (Dioptrique - discours second) préferera comparer AH à GR c'est à dire sin i à sin r : "seulement faut-il prendre

(1) DESCARTES, Lettre à Mersenne 31 mars 1638 (Extrait en fin de chapitre).
(2) Dictionary of Scientific Biography.

garde que cette inclination (à traverser le milieu considéré) se doit mesurer par la quantité des droites comme AH et GR, et semblables, comparées les unes aux autres ; non par celle des angles, tels que sont ASH ou GSR, ni beaucoup moins par celle des semblables à LSR, qu'on nomme des angles de Réfraction. Car la raison ou proportion qui est entre ces angles, varie à toutes les diverses inclinations des rayons ; au lieu que celle qui est entre les lignes AH et RG ou semblables, demeure la même en toutes les réfractions qui sont causées par les mêmes corps...".

En 1558, Della Porta (Magia naturalis) provoque le monde scientifique et, en 1593 (De Refractione), offre des éléments de réponse. Képler dès 1604 donne une loi, compliquée mais fort bonne ; en 1611 il la simplifie dans le cas des faibles incidences (i = nr) et l'applique à la théorie de la lunette de Galilée. Vers 1625, Snellius et Descartes annoncent la loi des sinus... que le monde scientifique boude peut être un peu, est-ce parce que Descartes écrit systématiquement en français et que seules les traductions latines peuvent lui donner l'audience qu'il mérite ou parce que la loi simplifiée de Képler, très vite répandue, répondait aux besoins ? On trouvera ci-après une lettre de Cavalieri à Torricelli (16 février 1644) qui montre que la validité de la loi des sinus, établie par Descartes sur des principes mécanistes, reste longtemps sujette à caution.

<u>Lettre de Cavalieri à Torricelli</u> 16 février 1644

"Vous avez peut être spéculé sur (l'Anaclastique) recherchée par un si grand nombre, mais en vain. Je sais qu'Herigone, dans son cours de Mathématique(1), c'est à dire dans sa Dioptrique, suppose l'avoir trouvée en s'appuyant sur ce principe que les sinus des incidences sont proportionnels aux sinus des réfractions, mais comme il ne prouve ce principe qu'en transposant une loi de mécanique dans l'optique en disant que l'impulsion du rayon qui rencontre la surface du corps transparent est comparable à l'impulsion d'un grave tombant sur un plan horizontal ou incliné du même angle que le rayon sur cette surface, et qu'il n'apporte à cela aucune justification, j'ai toujours douté, et de ce principe, et que cette section ou ligne soit vraiment l'Anaclastique".

(1) Le cours d'Herigone, Tome V est de 1637, en latin.

Lettre de Descartes à Mersenne 31 mars 1638
(Correspondance de Descartes - lettre 152)

"Pour Ferrier, laissez-le faire ; il y a grande apparence qu'il n'achèvera rien, et je crois que le moindre petit tourneur ou serrurier serait plus capable que lui de faire voir l'effet des lunettes. Je vous remercie du soin que vous avez eu pour les livres de Rome ; le retardement ne sera peut-être qu'avantageux, à cause que ceux auxquels ils s'adressent en auront pu cependant ouïr parler. Celui(1) qui m'accuse d'avoir emprunté de Képler les ellipses et les hyperboles de ma Dioptrique, doit être ignorant ou malicieux ; car pour l'ellipse, je n'ai pas de mémoire que Képler en parle, ou s'il en parle, c'est assurément pour dire qu'elle n'est pas l'anaclastique qu'il cherche ; et pour l'hyperbole, je me souviens fort bien qu'il prétend démontrer expressément qu'elle ne l'est pas, bien qu'il dise qu'elle n'en est pas beaucoup différente. Or je vous laisse à penser si je dois avoir emprunté une chose d'un homme qui a tâché de prouver qu'elle était fausse. Cela n'empêche pas que je n'avoue que Képler a été mon 1er maître en Optique, et que je crois qu'il a été celui de tous qui en a le plus su par ci-devant. Je vous prie de convier M. Petit de m'envoyer au plus tôt tout le reste de ce qu'il dit avoir à objecter contre ma Dioptrique, ou autres choses, afin que j'y puisse répondre tout d'un coup, sans avoir la peine d'en faire à deux fois ; car il n'a que faire de craindre que la multitude m'accable, et pour le peu qu'il m'a envoyé, je ne veux employer à y répondre que quelques heures de récréation après le repas".

(1) "Celui qui accuse" semble être Petit.

VI. La Démonstration de Descartes

"... Vous demandez si je tiens que ce que j'ai écrit de la réfraction soit démonstration ; et je crois que oui, au moins autant qu'il est possible d'en donner en cette matière, sans avoir auparavant démontré les principes de la Physique par la Métaphysique (ce que j'espère faire quelque jour, mais qui ne l'a point été par ci-devant), et autant qu'aucune autre question de Mécanique, ou d'Optique, ou d'Astronomie, ou autre matière qui ne soit point purement géométrique ou arithmétique, ait jamais été démontrée. Mais d'exiger de moi des démonstrations géométriques en une matière qui dépend de la Physique, c'est vouloir que je fasse des choses impossibles. Et si on ne veut nommer démonstrations que les preuves des géomètres, il faut donc dire qu'Archimède n'a jamais rien démontré dans les Mécaniques, ni Vitellion en l'Optique, ni Ptolémée en l'Astronomie, etc, ce qui toutefois ne se dit pas. Car on se contente, en telles matières, que les auteurs, ayant présupposé certaines choses qui ne sont point manifestement contraires à l'expérience, aient au reste parlé conséquemment et sans faire de paralogisme, encore même que leurs suppositions ne fussent pas exactement vraies. Comme je pourrais démontrer que même la définition du centre de gravité, qui a été donnée par Archimède, est fausse, et qu'il n'y a point de tel centre ; et les autres choses qu'il suppose ailleurs ne sont point non plus exactement vraies. Pour Ptolémée et Vitellion, ils ont des suppositions bien moins certaines, et toutefois on ne doit pas pour cela rejeter les démonstrations qu'ils en ont déduites. Or ce que je prétends avoir démontré touchant la réfraction ne dépend point de la vérité de la nature de la lumière, ni de ce qu'elle se fait ou ne se fait pas en un instant, mais seulement de ce que je suppose qu'elle est une action, ou une vertu, qui suit les mêmes lois que le mouvement local, en ce qui est de la façon dont elle se transmet d'un lieu en un autre, et qui se communique par l'entremise d'une liqueur très subtile, qui est dans les pores des corps transparents. Et pour la difficulté que vous trouvez en ce qu'elle se communique en un instant, il y a de l'équivoque au mot d'instant ; car il semble que vous le considérez comme s'il niait toutes sortes de priorité, en sorte que la lumière du Soleil pût ici être produite, sans passer premièrement par tout l'espace qui est entre lui et nous ; au lieu que le mot d'instant n'exclut que la priorité du temps, et n'empêche pas que chacune des parties inférieures du rayon ne soit dépendante de toutes les supérieures, en même façon que la fin d'un mouvement successif dépend de toutes ses parties précédentes. Et sachez qu'il n'y a que deux voies pour réfuter ce que j'ai écrit, dont l'une est de prouver par quelques expériences ou raisons que les choses que j'ai supposées sont fausses ; et l'autre, que ce que j'en déduis ne saurait en être déduit. Ce que M. de Fermat a fort bien entendu ; car c'est ainsi qu'il a voulu réfuter ce que j'ai écrit de la réfraction, en tâchant de prouver qu'il y avait un paralogisme. Mais pour ceux qui se contentent de dire qu'ils ne croient pas ce que j'ai écrit, à cause que je le déduis de certaines suppositions que je n'ai pas prouvées, il ne savent pas ce qu'ils demandent, ni ce qu'ils doivent demander"(1).

Nous ne considèrerons ici que le début de la Dioptrique, l'étude de l'oeil, de la vision et de la forme des verres dépassant notre propos, bien que la question déjà mentionnée de la taille des verres soit peut être un élément déterminant de l'étude entreprise par Descartes.

Les deux premiers Discours (De la Lumière ; De la Réfraction) s'établissent sur un équilibre entre analogie et différentiation, entre a priori conceptuel et fait d'expérience.

La lettre ci-dessus éclaire l'attitude de Descartes : la "vraie nature" de la lumière importe peu (...est sans doute hors de notre portée), ce que l'on doit prendre en compte c'est le comportement de la lumière assimilée à un mouvement. Dans le premier Discours Descartes cherche à justifier l'analogie lumière-mouvement en s'appuyant sur trois exemples (Le bâton de l'aveugle, la cuve percée, la balle qui rebondit ou pénètre dans l'eau). Nous les examinerons plus loin.

Le second Discours, fondé sur l'analogie avec le mouvement d'un corps pesant (3ème exemple du premier Discours), s'inverse par l'introduction d'un fait d'expérience : ce que vous constaterez semble tout autre que ce qui vient d'être étudié. Les deux premiers exemples du premier Discours servent alors de pivot : la lumière obéit aux lois du mouvement des corps mais n'est pas le mouvement d'un corps pesant, elle est plutôt transmission d'un mouvement sans déplacement de matière (le bâton de l'aveugle) ou inclination au

(1) DESCARTES, Correspondance, Lettre à Mersenne (n° 157) du 17 Mai 1658.

mouvement (la cuve percée), c'est une action plus qu'un mouvement. Ceci permet d'introduire l'argument ad hoc pour "sauver le phénomène" ou pour mieux élucider la nature de la lumière : les lois du mouvement sont respectées mais les milieux traversés ne s'opposent pas de la même façon au mouvement d'une balle et à celui de la lumière. Il y a unité mais pas identité, un peu comme, en Relativité, Temps et Espace s'unissent et restent distincts.

Les trois exemples du Premier Discours

Le premier exemple est celui du bâton de l'aveugle : dans un corps lumineux il y a de la lumière, celle-ci est un mouvement très rapide transmis à l'oeil par l'air et par les corps traversés, comme à travers le bâton la main perçoit l'objet touché par le bout du bâton.

Cet exemple est donné à double fin : il servira à expliquer pourquoi la lumière ne se réfracte pas comme une balle entrant dans l'eau, mais il annonce aussi une prise en charge par la Physique du phénomène des couleurs jusqu'alors réservé à la Philosophie. La réaction des corps au contact du bâton permet à l'aveugle de savoir s'ils sont lisses ou rugueux, solides ou liquides, de même la couleur dépend de la réaction des corps au contact de la lumière.

La lumière se transmet "en un instant" comme le heurt du bâton est ressenti "instantanément" par la main, il y a transmission d'un mouvement sans déplacement, aspect Aristotélicien d'une lumière "altération" du milieu qui interdit la propagation dans le vide. Descartes précise : "Je n'ai pas dit que la lumière fût étendue comme un bâton, mais comme les actions ou mouvements qui sont transmis par un bâton. Et bien que le mouvement ne se fasse pas en un instant, toutefois chacune de ses parties se peut sentir en l'un des bouts d'un bâton au même instant (c'est-à-dire exactement au même temps) qu'elle est produite en l'autre bout"(1).

Descartes achève cet exemple sur une nuance, comme une hésitation ; il est vrai, dit-il en substance, que l'oeil agit aussi, au moins pour ceux qui sont capables de voir de nuit. Réminiscence d'Empédocle et de Platon pour lesquels il y a double émission (synaugie) de l'objet vers l'oeil et de l'oeil vers l'objet ou souci d'intégrer le problème de la vision ?

(1) DESCARTES, La Pléiade, p. 1006, Lettre de Mars 1638.

Le second exemple est celui de la cuve percée pleine de raisin à demi foulé. Exemple de transition entre une lumière ébranlement du milieu (le bâton de l'aveugle) et une lumière corpusculaire (la balle lancée) et qui permet de préparer le revirement du second Discours : il n'y a pas mouvement mais inclination au mouvement. (Fermat critiquera l'application des lois du mouvement en acte à une inclination au mouvement(1)). La lumière n'a pas besoin d'un support qui la canalise, genre bâton, elle se propage en lignes droites en ébranlant un milieu très subtile (pour Descartes la lumière ne peut se propager dans le vide). Ces lignes droites ne sont pas, à proprement parler, des trajectoires de corpuscules mais des lignes abstraites qui traduisent une tendance globale du mouvement de la lumière, presque des lignes de lissage statistique.

Le raisin à demi-foulé représente la structure grossière des corps traversés par la lumière. Le vin doux représente la matière très subtile qui emplit les pores de tous les corps et grâce à laquelle se transmet la lumière. Aucune particule de vin ne peut couler à la fois vers les trous A et B, mais le vin coule vers A et B. Aucune particule ne peut aller en ligne droite d'un point C vers A car elle rencontre des obstacles mais elle va globalement en ligne droite, l'effet final est le même que si elle se propageait en ligne droite, et de tous les points C, D, etc... partent ainsi des faisceaux de droites abstraites dirigées tant vers A que vers B et "qui ne se gênent en rien".

Dans cet exemple, la lumière risque d'apparaître, à l'image du flux de vin, comme un transfert de particules ; Descartes tempère son exemple : la lumière n'est pas tant mouvement qu'inclination au mouvement. Dans sa correspondance il ajoute : "je n'ai pas dit aussi que la lumière fût comme le moût de la cuve, mais comme l'action dont les plus hautes parties de ce moût tendent en bas ; et elles y tendent exactement en ligne droite, nonobstant qu'elles ne se puissent mouvoir si exactement en ligne droite"(2).

Il n'est pas aisé de savoir si le flux du milieu subtile porte la lumière ou si, comme dans le premier exemple, celle-ci ébranle ce milieu et se propage même si celui-ci reste immobile. Cependant Descartes compare nos yeux aux trous A et B ; dès qu'ils sont ouverts

(1) MERSENNE, Correspondance, Lettre n° 98, Avril-Mai 1637.
(2) DESCARTES, La Pléiade, lettre de Mars 1638, p. 1006.

la lumière converge vers eux et Descartes dit "ainsi toutes les parties de la matière subtile... tendent en ligne droite vers nos yeux... sans s'empêcher les unes les autres et même sans être empêchées par les parties grossières des corps transparents...". Il reste que cette "inclination au mouvement" sauve les rayons lumineux rectilignes considérés depuis Euclide et leur permet de se croiser sans se gêner (ce qu'Alhazen a montré en recevant sur un écran les images de bougies placées derrière une fente).

Avec le troisième exemple la lumière devient corpusculaire. Une balle rebondit comme la lumière se réfléchit, une balle entrant dans l'eau dévie de son chemin initial comme la lumière se réfracte, une balle "brossée" (frisée, dit Descartes) a des réactions curieuses et l'auteur en profite pour reprendre à son compte le phénomène des couleurs : le choc avec certains corps "brosse" la lumière et, de ce fait, on les voit colorés(1).

La démonstration du second Discours

Elle se décompose en trois grandes étapes. Tout d'abord l'étude du mouvement d'une balle (lumière corpusculaire), puis le fait expérimental : vous m'avez suivi et vous croyez savoir comment la lumière se réfracte, vous avez tort. Dernière étape : souvenez-vous, la lumière n'est pas mouvement mais inclination au mouvement et se propage dans un corps très subtile, de ce fait elle se comporte à l'inverse de ce que vous attendiez. Cet enchaînement est la mise en oeuvre aboutie au projet d'Alhazen au 11ème siècle.

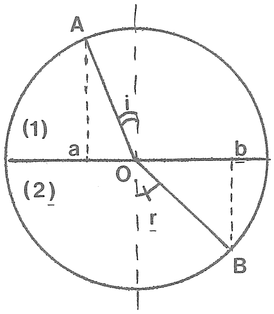
Envisageons une balle qui, lancée obliquement, pénètre dans l'eau. La balle est "parfaitement dure, n'a ni pesanteur, ni grosseur"(2). On suppose son mouvement rectiligne uniforme avant et après le contact et la vitesse réduite de moitié dans l'eau(3). Descartes décompose le mouvement en une composante horizontale, donc parallèle à la surface de l'eau, et une composante verticale. Le choc avec l'eau ne modifie pas la composante horizontale, hypothèse raisonnable, et diminue la composante verticale. La vitesse globale étant deux fois moindre dans l'eau que dans l'air la balle mettra deux fois plus de temps à parcourir OB que OA donc Ob = 2 Oa, ce

(1) On verra dans l'article de Christiane LIZE comment Mersenne applique au son les lois du mouvement.

(2) MERSENNE, Correspondance, Lettre de Descartes n° 928 du 28 Octobre 1640.

(3) A la fin du discours, Descartes envisage l'existence de rayons incurvés "comme par la pesanteur".

qui permet de déterminer B. On obtient ainsi $\frac{v(1)}{v(2)} = \frac{Ob}{Oa} = \frac{\sin r}{\sin i}$ en notant v(1) la vitesse dans l'air et v(2) dans l'eau. L'angle d'incidence i ne



peut ici dépasser 30°, mais Descartes indique que si l'on renvoit la balle de B vers O elle se "réfracte" vers A en s'approchant de la verticale au lieu de s'en éloigner et cette remarque prépare l'explication de la réfraction lumineuse.

L'expérience montre que la lumière, passant de l'air dans l'eau s'approche de la verticale alors que la balle s'en éloigne. Cela n'a rien de surprenant si l'on se souvient de la "nature" de la lumière "action reçue dans une matière très subtile qui remplit les pores de tous les corps". En effet une balle perd plus de vitesse au contact du sable que d'un corps dur parce qu'elle se fraie un chemin en écartant le sable alors qu'elle ne déplace pas les particules du corps dur. Mais la balle n'est pas une matière très subtile. Cette dernière progresse bien dans le verre, moins bien dans l'eau dont les parties peuvent être un peu déplacées par la matière subtile et beaucoup moins bien encore dans l'air dont les parties sont facilement déplacées, absorbant ainsi beaucoup de "l'agitation" de la matière subtile. Si Descartes avait voulu mettre l'accent sur l'aspect vibratoire annoncé par l'exemple du bâton il aurait pu remplacer la balle entrant dans le sable par une corde vibrante, envisager la propagation du son dans le bois et dans le duvet et saluer au passage son ami Mersenne.

La démonstration achevée bien des questions sont posées à Descartes, souvent de façon polémique. Qu'est-ce que cette matière subtile ? "Puisque j'ai fait profession de ne point vouloir expliquer les fondements de la physique, je n'ai pas cru devoir expliquer la matière subtile dont j'ai parlé, plus distinctement que je n'ai fait. Encore que l'eau ne demeure liquide, qu'à cause que ses parties sont entretenues en leur agitation par la matière subtile qui les

(1) HUYGENS, Traité de la Lumière.

environne, cela n'empêche pas qu'elle ne doive le devenir, lorsqu'elles seront agitées par quelqu'autre cause. Et pourvu qu'on sache que le feu ayant la force de mouvoir les parties des corps terrestres dont il approche, comme on voit à l'oeil en plusieurs, doit à plus forte raison mouvoir celles de la matière subtile, à cause qu'elles sont les plus petites et moins jointes ensemble, qui sont les deux qualités pour lesquelles un corps peut être nommé plus subtil que les autres, on ne trouvera aucune difficulté en cet article"(1). Comment peut-on soutenir que la lumière se meut en un instant et soutenir qu'elle va moins vite dans certains milieux que dans d'autres? Nous donnons ci-après la longue argumentation de Descartes (lettre du 22 Août 1634) qui distingue le mouvement propre de la lumière et la vitesse, infinie, de sa transmission. Le bel argument des éclipses s'écroulera lorsque Roemer (1673) évaluera la vitesse de la lumière en partant du principe même de l'argument et que Christian Huygens(2) analysera celui-ci. Mais Descartes meurt en 1650 sans qu'une objection sérieuse ait pu l'ébranler. La grande polémique a porté sur le retournement final de la démonstration : il est trop facile de dire tout et le contraire, en outre il n'est pas naturel ou raisonnable de prétendre que la lumière puisse aller plus vite dans les milieux les plus denses. "Cette opinion en elle-même et par son seul énoncé me paraît invraisemblable" dira Grimaldi (Physico-Mathésis-1665)(3). Christian Huygens sera du même avis mais les contemporains de Descartes n'ont pas attendu pour s'interroger et interroger. Le plus célèbre critique est Fermat, dont nous parlons plus loin, mais on lira avec intérêt la correspondance de Descartes, par exemple avec Plempius en 1637 (lettre 120) ou avec Morin en 1638 (lettres 140 et 162), ou celle de Mersenne (lettres 98, 124, 126 et 145).

Il nous semble, opinion tout à fait personnelle, que la discussion est, sur ce point, biaisée. Descartes n'a pas fait de la lumière un corpuscule matériel en mouvement et ainsi rien ne s'oppose à une propagation plus rapide dans le verre que dans l'air. Huygens, tenant d'une théorie ondulatoire, n'est pas nécessairement le mieux placé pour refuser cet argument et Fermat, dont les idées sont sous-

(1) DESCARTES, La Pléiade, p. 1006. Lettre de Mars 1638.
(2) HUYGENS, Traité de la Lumière.
(3) RONCHI, Histoire de la Lumière, p. 141-142.

tendues par une conception corpusculaire, attaque Descartes sur un terrain où celui-ci a refusé de se placer. Au demeurant il y a, au dix-septième siècle, confusion, au moins au niveau des mots, entre milieu plus dense et milieu plus résistant au mouvement. L'adjectif "réfringent" n'apparaît sans doute qu'au dix-huitième siècle et Descartes, pour sa part, déclare : "Pour les réfractions, sachez qu'elles ne suivent nullement la proportion de la pesanteur des liqueurs : car l'huile de térébenthine, qui est plus légère que l'eau, l'a beaucoup plus grande ; et l'esprit ou l'huile de sel (notre acide chlorhydrique), qui est plus pesante, l'a aussi un peu plus grande"(1). Newton, appliquant à la lumière la théorie de l'attraction, indiquera une proportionnalité entre réfrigence et densité... sauf pour les corps gras et sulfureux(2) ; la mise en garde du Maître a été entendue... et aménagée.

Lettre du 22 Août 1634(3) "Je suis bien aise que vous vous souveniez encore de la discussion qui s'est élevée dernièrement entre nous. Mais je vois que le raisonnement dont j'usais alors, ne vous a pas encore satisfait ; aussi je vous écrirai bien volontiers comment je juge votre réponse ; et pour qu'il ne subsiste aucun doute sur la thèse elle-même, je vais mettre ici brièvement le récit de toute l'affaire. J'ai dit dernièrement, lorsque nous étions ensemble, que la Lumière ne se meut pas en un instant, comme vous m'écrivez, mais (c'est, croyez-vous, la même chose) qu'elle parvient à nos yeux depuis un corps lumineux en un instant ; et j'ai même ajouté que cela était pour moi tellement certain, que si l'on pouvait m'en prouver la fausseté, j'étais prêt à confesser que je ne savais rien du tout en Philosophie. Vous souteniez, au contraire, que la lumière ne peut se mouvoir que dans un intervalle de temps ; et vous ajoutiez que vous aviez imaginé une expérience qui ferait bien voir lequel de nous deux se trompait. Voici cette expérience, débarrassée de quelques accessoires superflus (le son, le maillet et choses semblables), comme vous l'exposez maintenant beaucoup mieux en votre lettre : on tient à la main la nuit un flambeau, et on le remue : qu'on regarde dans un miroir distant d'un quart de lieue, on pourra noter si on sent un mouvement en sa main, avant qu'on ne le voie dans le miroir.

(1) DESCARTES, Lettre à Mersenne, 1er mars 1638.
(2) NEWTON, Les Principes ; Abrégé - Section III ; VIII.
(3) DESCARTES, Correspondance - lettre 66.

Et vous aviez tellement confiance en votre expérience, que vous déclariez tenir pour fausse toute votre Philosophie, s'il n'y avait pas un intervalle entre l'instant où le mouvement se verrait dans le miroir, et celui où on le sentirait en sa main, et s'il n'y avait pas de l'un à l'autre un retard appréciable. Je disais au contraire que, si on percevait un tel retard, ce serait l'écroulement de toute ma Philosophie. Mais alors, et ceci est à noter, la question n'était pas tant de savoir si la lumière se transporte en un instant ou en un certain temps, que de s'assurer si l'expérience réussit ou non : c'est là le débat entre nous. Mais le lendemain, pour en finir avec toute cette discussion et ne pas vous donner une peine inutile, je vous ai averti que nous avions une autre expérience, faite souvent déjà avec un soin extrême et une grande attention par des milliers de personnes, et elle fait voir manifestement qu'il n'y a pas d'intervalle ni de retard de ce genre entre l'instant où la lumière sort d'un objet lumineux et l'instant où elle entre dans nos yeux. Pour vous l'exposer, je vous ai demandé d'abord si vous pensiez que la Lune reçoit sa lumière du Soleil, et que les Eclipses se font par l'interposition de la Terre entre le Soleil et la Lune, ou de la Lune entre le Soleil et la Terre ? Vous me l'avez accordé. Je vous ai demandé, outre cela, comment vous supposiez, à votre choix, que la lumière nous vient des Astres, et vous m'avez répondu en droite ligne : ainsi, pendant qu'on regarde le Soleil, l'endroit où il apparaît n'est pas celui où il est réellement, mais celui où il était au moment où la lumière qui le fait voir en est sortie auparavant. Enfin je vous ai demandé de préciser de combien devait être pour le moins ce retard appréciable entre le moment où l'on remuait le flambeau, et celui où le mouvement apparaissait dans un miroir distant d'un quart de lieue : ce retard était au moins égal, m'aviez-vous marqué le jour précédent, à la durée d'un battement d'artère ; mais pour lors vous avez été plus généreux, vous me l'accordiez de telle durée que je voudrais. Aussi, pour qu'on vît bien que je ne voulais pas abuser de votre générosité, je n'ai pas voulu prendre plus du vingt-quatrième de la durée d'un battement d'artère ; et cette durée qui (vous n'aviez aucune peine à me l'accorder) ne serait plus du tout sensible dans votre expérience, j'ai dit qu'elle deviendrait fort sensible dans la mienne. Car, en posant que la distance de la Lune à la Terre est de cinq cents demi-diamètres de la Terre, le demi-diamètre étant de six cents lieues (ce qu'on doit admettre pour le moins, ou l'Astronomie et la Géométrie ne tiennent plus), si la Lumière a besoin du vingt-quatrième de la durée d'un battement d'artère pour franchir un quart de lieue deux fois, elle aura besoin de la durée de cinq mille battements, c'est-à-dire d'une heure au moins, pour franchir aussi deux fois l'espace intermédiaire entre la Terre et la Lune, comme on voit quand on fait le calcul. Cela accordé, voici mon argumentation. Soit la ligne droite A B C, et (afin que la conclusion puisse être la même, que ce soit le Soleil qui se meuve ou bien la Terre), soit A l'endroit où le Soleil, B la Terre et C la Lune sont vus quelquefois. Posons maintenant que de la Terre B on voie la Lune subir une Eclipse au point C : cette Eclipse, après ce qui a été accordé, doit se voir au même instant précis où la Lumière envoyée du Soleil pendant qu'il était au point A parviendrait à nos yeux après sa réflexion sur la Lune, si elle n'avait été interceptée par la Terre, c'est-à-dire, toujours d'après ce qui a été accordé, une heure plus tard que cette lumière n'atteint la Terre B ; et conséquemment, on ne peut voir l'Eclipse en C qu'une heure plus tard qu'on ne voit le Soleil en A ; si ce que vous m'aviez accordé est vrai, à savoir si on voit le mouvement du flambeau dans un miroir distant d'un quart de lieue plus tard d'un vingt-quatrième de battement d'artère qu'on ne le sent à la main. Pourtant l'observation constante et consciencieuse de tous les Astronomes, confirmée par nombre d'expériences, est là qui l'atteste : pendant l'Eclipse que subit la Lune, si de la Terre B on la voit en C, on doit voir en A le Soleil, non pas une heure plus tôt, mais au même instant exactement ; et l'intervalle d'une heure est bien plus appréciable dans cette observation de l'endroit du Soleil au regard de la Terre et de la Lune, que le vingt-quatrième d'un battement d'artère dans votre expérience. Donc votre expérience est inutile, et la mienne, qui est celle de tous les Astronomes, fait voir bien plus clairement qu'il n'y a nul intervalle de temps appréciable dans la vision de la lumière. Je disais donc que mon argumentation est une démonstration, tandis que vous l'appeliez à la fois un paralogisme et une pétition de principe. Mais on voit à plein dans votre réponse si vous aviez raison ou plutôt tort de l'appeler ainsi. Car vous ne répondez que deux choses, où l'on voit dans la première un paralogisme manifeste, et dans la seconde, s'il n'y a pas pétition de principe, ou le fait d'admettre de ce qui était à prouver, il y a (et ceci me semble pire) rétractation de ce qui avait été accordé. En effet, lorsqu'à l'exclusion du mouvement diurne, vous recourez au mouvement annuel, beaucoup plus lent, en une chose qui dépend toute du mouvement de la Lune en un mois, lequel est plus rapide et plus de douze fois que le mouvement annuel, j'ajoute, en une chose où, non seulement la différence d'une heure (ce qui suffisait, je crois), mais même la différence d'une demi-minute s'observe d'ordinaire assez commodément : comment ne pas reconnaître là un paralogisme ? Lorsque vous dites, après cela, que les rayons émis par le Soleil et par la Lune se meuvent circulairement ensemble avec le Soleil et la Lune même entre les deux, en sorte qu'on les voit toujours aux endroits où ils sont réellement, bien qu'on les voie à l'aide de la lumière émise auparavant par ces deux Astres mêmes, lorsqu'ils étaient en d'autres endroits (car on ne peut l'entendre autrement) : c'est la négation manifeste de ce que vous m'aviez accordé auparavant, et d'où dépendait toute cette partie de ma démonstration que je vous avais expliquée, et vous ne voyez pas que vous étiez passé à une autre question, qui concerne l'Eclipse du Soleil. Par exemple, soit A le Soleil, B la Terre, et C la Lune, sur une même ligne droite ; et suivant le calcul fait plus haut, posons que la lumière a besoin d'une demi-heure pour venir de la Lune C à la Terre B. Mais pour venir du Soleil A, qui est vingt-quatre fois plus éloigné que la Lune, il lui faudra douze heures ; donc, d'après ce qu vous m'avez accordé en dernier lieu, au même instant que le Soleil est en A, il est vu par des yeux qui sont en B, et la Lune entre les deux n'y met point d'obstacle, bien que pendant ce temps elle soit en C, et qu'on la verrait aussi elle-même à cet endroit, si elle avait sa lumière propre. Car le Soleil se voit en A à l'aide de la lumière sortie de lui douze heures auparavant, et qui traversant le ciel de la Lune une demi-heure avant, n'a pu être empêchée par elle, puisqu'à ce moment elle ne se trouvait pas encore entre le Soleil et la Terre ; mais la lumière qu'elle empêche maintenant, ne peut venir jusqu'en B qu'une demi-heure après, et par conséquent la disparition de cette lumière, c'est-à-dire l'Eclipse, ne peut se voir qu'une demi-heure après l'instant où le Soleil, la Lune et la Terre sont sur une même ligne droite. Mais l'expérience de tous les Astronomes constate tout le contraire : c'est lorsque le Soleil, la Lune et la Terre sont sur une même ligne droite, c'est alors qu'a lieu l'Eclipse, et en ce cas l'erreur non seulement d'une demi-heure, mais même d'une demi-minute, serait appréciable. Donc, etc... Je n'ajoute pas quantité d'autre choses, qui montrent que cette dernière position est encore plus absurde que la précédente : comme, par exemple, avec elle nous devrions toujours voir vers l'Orient un cercle noir entre la Terre et le Ciel à l'horizon, et vers l'Occident le Soleil et les Etoiles au-dessous des montagnes, et semblables choses. Je ne demande pas non plus par quelle force ce mouvement circulaire de la lumière venue de différents Astres en même temps, est réglé de façon à garder toujours les inégalités de vitesse des Astres d'où elle est sortie, etc... Si ce que je viens d'écrire ne vous convainc pas, je dois avouer que rien vraiment ne peut vous convaincre. Adieu. Amsterdam, 22 Août 1634".

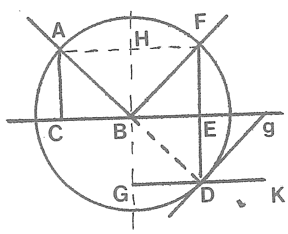
VII. Une opposition de Principes. Fermat et la loi des sinus

Avant même la parution de la Dioptrique de Descartes, Fermat a pu en lire le manuscrit(1). Fermat ne se targue pas de faire oeuvre de physicien, mais il réagit immédiatement(2). Dans un premier temps il refuse le bien fondé de la décomposition du mouvement, décomposition pour lui arbitraire (nous pourrions dire "sans signification physique"). Il critique l'application des règles du mouvement en acte à ce que Descartes donne comme une "tendance au mouvement". Il relève la contradiction entre propagation instantanée de la lumière et le fait que celle-ci doive, selon Descartes, aller plus ou moins vite selon le milieu traversé, enfin il trouve peu satisfaisant de penser que la lumière aille plus vite dans les milieux les plus réfringents.

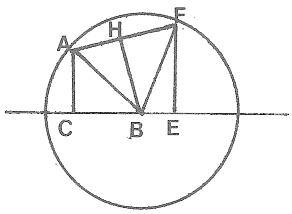
"Mon Révérend Père, Vous me demandez mon jugement sur le traité de Dioptrique de M. Descartes. Il est vrai que le peu de temps que M. de Beaugrand m'a donné pour le parcourir, semble me dispenser de l'obligation de vous satisfaire exactement et par le menu ; outre que la matière étant de soi très subtile et très épineuse, je n'ose pas espérer que des pensées informes, et non encore bien digérées, puissent vous donner une grande satisfaction. Mais d'ailleurs, quand je considère que la recherche de la vérité est toujours louable, et que nous trouvons souvent à tâtons et parmi les ténèbres ce que nous cherchons, j'ai cru que vous ne trouveriez pas mauvais que je tâchasse à vous débrouiller une mienne imagination sur ce sujet, laquelle, étant encore obscure et embarassée, j'éclaircirai peut-être davantage une autre fois, si mes fondements sont approuvés, ou si je ne change pas moi-même d'avis. La connaissance des réfractions a toujours été recherchée, mais inutilement. Alhasen et Vitellion y ont travaillé sans avancer beaucoup ; et ceux qui sont venus depuis ont très bien remarqué que tout se réduisait à établir une certaine proportion, par le moyen de laquelle une réfraction étant connue, on pût aisément trouver toutes les autres. De sorte que tous les fondements de la Dioptrique doivent consister en ce point : c'est-à-dire en la convenance et au rapport qu'une réfraction connue a à toutes les autres. Cela supposé, il a été nécessaire que ceux

(1) Beaugrand, qui le tient de Mersenne, le lui a communiqué... Descartes a fait connaître son déplaisir. Lettres 98, 100 et 103 - Correspondance de MERSENNE.
(2) DESCARTES. Correspondance - Lettres 98, 126 de 1637.

qui ont voulu établir les principes de la Dioptrique aient cherché cette convenance et ce rapport. Maurolic, abbé de Messine, en son Traité posthume De lumine & umbrâ, a soutenu que les angles qu'il appelle d'incidence, sont proportionnaux à ceux qu'il nomme de réfraction. Si cette proposition était vraie, elle suffirait pour nous marquer les vraies figures que doivent avoir les corps diaphanes qui produisent tant de merveilles. Mais, parce qu'elle n'a pas été bien démontrée par Maurolic, et que l'expérience même semble la convaincre de faux, il en est resté assez à M. Descartes pour exercer son esprit, et pour nous découvrir de nouvelles lumières dans ces corps, qui, pour en être seuls capables, n'ont pas laissé de produire jusques à présent de grandes obscurités... ...Je doute, premièrement, et avec raison, ce me semble, si l'inclination au mouvement doit suivre les lois du mouvement même, puisqu'il y a autant de différence de l'un à l'autre, que de la puissance à l'acte. Outre qu'en ce sujet il semble qu'il y a une particulière disconvenance, en ce que le mouvement d'une balle est plus ou moins violent, à mesure qu'elle est poussée par des forces différentes, là ou la lumière pénètre en un instant les corps diaphanes et semble n'avoir rien de successif. Mais la Géométrie ne se mêle point d'approfondir davantage les matières de la Physique. En la figure par laquelle il explique la raison de la réflexion, page 15 de la Dioptrique, il dit que la détermination à se mouvoir vers quelque côté peut, aussi bien que le mouvement et généralement que toute autre quantité, être divisée en toutes les parties desquelles on peut imaginer qu'elle est composée ; et qu'on peut aisément imaginer que celle de la balle qui se meut d'A vers B, est composée de deux autres, dont l'une la fait descendre de la ligne AF vers la ligne CE, et l'autre en même temps la fait aller de la gauche A C vers la droite F E, en sorte que ces deux jointes ensemble la conduisent jusques à B, suivant la ligne droite A B. Cela supposé, il en tire la conséquence de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, qui est le fondement de la Catoptrique. Pour moi, je ne saurais admettre son raisonnement pour une preuve et démonstration légitime. Car, par exemple, en la figure ci-jointe, en laquelle AF n'est plus parallèle à C B, et où l'angle C A F est obtus, pourquoi



ne pouvons-nous pas imaginer que la détermination de la balle qui se meut d'A vers B, est composée de deux autres, dont l'une la fait descendre de la ligne A F vers la ligne C E, et l'autre la fait avancer vers A F ? Car il est vrai de dire qu'à mesure que la balle descend dans la ligne A B, elle s'avance vers A F ; et que cet avancement doit être mesuré par les perpendiculaires tirées des divers points qui peuvent être pris entre A et B sur la ligne A F. Et ceci pourtant se doit entendre lorsqu'A F fait un angle aigu avec A B ; autrement, s'il était droit ou obtus, la balle n'avancerait pas vers A F, comme il est aisé de comprendre. Cela supposé, par le même raisonnement de l'auteur, nous conclurons que le corps poli C E n'empêche que le premier mouvement, ne lui étant opposé qu'en ce sens-là ; de sorte que, ne donnant point d'empêchement au second, la perpendiculaire B H étant tirée, et H F faite égale à H A, il s'ensuit que la balle doit réfléchir au point F ; et ainsi l'angle F B E sera plus grand qu'A B C. Il est donc évident que, de toutes les divisions de la détermination au mouvement, qui sont infinies, l'auteur n'a pris que celle qui lui peut servir pour sa conclusion ; et partant il a accommodé son medium à sa conclusion, et nous en savons aussi peu qu'auparavant. Et certes il semble qu'une divison imaginaire, qu'on peut diversifier en une infinité de façons, ne peut jamais être la cause d'un effet réel. Nous pouvons, par un même raisonnement, réfuter la preuve de ses fondements de Dioptrique, puisqu'ils sont établis sur un pareil discours. Voilà mon sentiment sur ces nouvelles propositions, dont les conséquences qu'il en tire, lorsqu'il traite de la figure que doivent avoir les lunettes, sont si belles, que je souhaiterais que les fondements sur lesquels elles sont établies fussent mieux prouvés qu'ils ne sont pas. Mais j'appréhende que la vérité leur manque, aussi bien que la preuve..."(1).



Si Fermat ne parle pas de la nature de la lumière, sa conviction intime transparaît : il y a mouvement de corpuscules à vitesse finie. Ce n'est pas un hasard si Leibniz utilise, plus tard, le travail de Fermat sur la réfraction de la lumière pour établir que la cycloïde est brachystochrone, c'est-à-dire qu'elle est la trajectoire idéale d'un corps qui, sous l'effet de son propre poids, "voudrait" aller

(1) in MERSENNE, Correspondance, Lettre 98 de Fermat, Avril-Mai 1637.

d'un point à un autre dans un temps minimal.

Fermat accepte, ou revendique même, le "principe de parcimonie" appliqué à la nature : celle-ci ne fait rien en vain et agit par les voies les mieux adaptées, les plus simples, les plus économiques. Pour Fermat, spécialiste des problèmes de maxima et minima, un tel principe physique est plus que naturel, il rejoint ses préoccupations. Reste à savoir sur quoi porte l'économie. Si la lumière est mouvement les notions de distance et de durée sont en jeu. Un principe d'économie des distances s'accorde bien avec le mouvement rectiligne uniforme de la lumière dans un milieu donné et avec les lois de la réflexion. Mais dans ces deux situations, si on suppose la vitesse uniforme, il y a aussi minimum de durée. Par contre dans le cas de la réfraction il n'y a pas distance minimale puisque la lumière se brise à la surface de séparation. Il s'agit donc, sans doute, de minimiser la durée du trajet.

Fort de ce principe, qui porte aujourd'hui son nom, Fermat pose, à l'inverse de Descartes, que la lumière va plus vite dans les milieux les moins réfringents. La recherche du trajet à durée minimale le conduit... à la loi de Descartes :

"Synthèse pour les réfractions(1) : Le savant Descartes a proposé pour les réfractions une loi qui est, comme on dit, conforme à l'expérience : mais, pour la démontrer, il a dû s'appuyer sur un postulat absolument indispensable à ses raisonnements, à savoir que le mouvement de la lumière se ferait plus facilement et plus vite dans les milieux denses que dans les rares ; or ce postulat semble contraire à la lumière naturelle. En cherchant, pour établir la véritable loi des réfractions, à partir du principe contraire, -à savoir que le mouvement de la lumière se fait plus facilement et plus vite dans les milieux rares que dans les denses,- nous sommes retombés précisément sur la loi que Descartes a énoncée. Est-il possible d'arriver sans paralogisme à une même vérité par deux voies absolument opposées, c'est une question que nous laissons à examiner aux géomètres assez subtils pour la résoudre rigoureusement ; car, sans entrer dans de vaines discussions, la possession assurée de la vérité nous suffit et nous l'estimons préférable à une plus longue continuation de querelles inutiles et illusoires.

(1) in FERMAT, Oeuvres, Tome III.

Notre démonstration s'appuie sur ce seul postulat que la nature opère par les moyens et les voies les plus faciles et les plus aisées. Car c'est ainsi que nous croyons qu'il doit être énoncé et non pas comme on le fait d'ordinaire en disant que la nature opère toujours par les lignes les plus courtes.

En effet, de même qu'en spéculant sur les mouvements naturels des graves, Galilée en mesure les rapports aussi bien par le temps que par l'espace, de même nous ne considérerons pas les espaces ou les lignes les plus courtes, mais celles qui peuvent être parcourues le plus facilement, le plus commodément et dans le temps le plus court".

Fermat illustre bien le 17ème siècle pétri de classicisme et novateur. S'il innove avec confiance il prouve avec conscience "à la façon des anciens". D'où les deux articles relatifs à la Réfraction : Analyse d'une part, Synthèse de l'autre(1). Dans l'Analyse Fermat est efficace, percutant... et sûr de lui : "L'analyse ci-dessus, dérivée de notre principe, donne donc de ce théorème une démonstration rigoureusement exacte". Pourtant cet article de deux pages est suivi d'une synthèse de cinq pages, fort longue dira Christian Huygens, avec examen des cas de figure et référence à Euclide. S'agit-il d'un souci de contrôle de soi-même ou faut-il juguler des critiques éventuelles ? Il est vrai que Fermat ne s'astreint que tardivement (vers 1661) à mettre en forme ces deux articles ; espère-t-il mettre un point final à la polémique engagée avec Descartes dès 1637(2) et poursuivie avec les Cartésiens après la disparition du Maître ? On lira avec intérêt, au sujet du Principe de Fermat, repris par Leibniz, les critiques de d'Alembert(3) et celles de Huygens qui, dans son Traité de la Lumière, montre que sa propre théorie permet de faire l'économie de ce principe qui devient au contraire une conséquence.

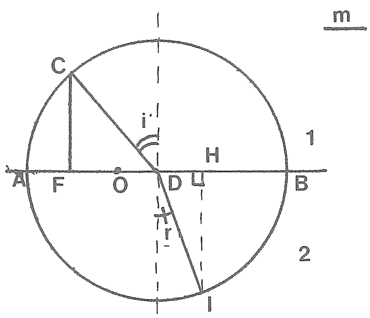
Avant de suivre le raisonnement de Fermat examinons brièvement la méthode qu'il utilise pour déterminer les extrema. L'idée de base est qu'au voisinage d'un extremum la fonction reprend les mêmes valeurs de part et d'autre. Si x_o est l'abscisse d'un extremum il existe, à proximité, des réels x et $x+e$, x inférieur à x_o et $x+e$ supé-

(1) TANNERY, Oeuvres de Fermat.
(2) Correspondance de Mersenne, Lettres 98, 124, 126, 145 et lettre citée par RONCHI ; Histoire de la Lumière, p. 118.
(3) Encyclopédie Méthodique, article "causes finales".

rieur, tels que $f(x) = f(x+e)$. La solution e=o est évidente, Fermat simplifie donc par e autant que nécessaire pour obtenir une équation dont o ne soit pas solution, sauf à introduire une contrainte. Or au passage à l'extremum e=o doit être solution (les deux valeurs x et x+e sont confondues... il y a, dirions-nous, tangente horizontale). Il suffit donc d'annuler le terme indépendant de e pour obtenir l'abscisse de l'extremum. Autrement dit, si pour tout x, e=o est solution d'ordre n, pour les extrema, o sera solution d'ordre supérieur à n. Sans conceptualisation explicite Fermat pense en termes de développement limité.

Soit, par exemple $x \longrightarrow b^2x - x^3$ (le b^2 est une nécessité pour Fermat, sa formule doit être homogène, on ne peut soustraire un "volume" que d'un "volume". Descartes agit autrement(1) en choisissant un segment unité qui peut "cacher" l'homogénéité) $f(x) = f(x+e)$ s'écrit $b^2x - x^3 = b^2 (x+e) - (x+e)^3$ d'où $o = e(b^2 - 3x^2 - 3ex - e^2)$. La solution triviale e=o ne nous intéresse pas, on a donc $o = b^2 - 3x^2 - e(3x + 2)$ qui n'admet e=o pour solution que si $b^2 - 3x^2 = 0$. Les extrema sont donc obtenus pour $x^2 = \frac{b^2}{3}$.

Dans son Analyse Fermat se donne le rayon incident CD, donc le cercle ACB et le point F. Il cherche I, donc H, pour que le trajet CDI soit, conformément au principe, de durée minimale, c'est-à-dire plus bref que tout autre trajet COI.



Notons R(k) la "résistance" du milieu k et V(k) la vitesse de la lumière dans ce milieu. Fermat pose implicitement (mais la comparaison avec la Synthèse ne laisse aucun doute) que $\frac{R(1)}{R(2)} = \frac{V(2)}{V(1)}$. Il fixe alors une longueur m telle que $\frac{m}{DF} = \frac{R(1)}{R(2)}$ et annonce très laconiquement "nous pourrons ainsi représenter comparativement l'ensemble du mouvement sur ces deux droites (il parle du trajet CDI) par la somme des deux produits CD.m + DI.DF". Nous reviendrons plus loin sur ce passage. Fermat impose alors que CD.m + DI.DF soit minimal parmi tous les CO.m + OI.DF et il montre que ceci n'a lieu que si HD = m. Il obtient donc $\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{m}{DF} = \frac{V(2)}{V(1)}$; nous savons aujourd'hui que l'indice n de réfraction est $n = \frac{V(1)}{V(2)}$, d'où notre sini=n sinr. Pour

(1) DESCARTES, La géométrie.

établir son résultat Fermat cherche donc la valeur de HD, c'est-à-dire la position de I, pour que CO.m + OI.DF soit minimal si et seulement si O = D.

Posons comme lui HD = a, OD = e et DF = b et notons r le rayon du cercle (qu'il note n). La relation CO.m + OI.b = CD.m + DI.b est satisfaite pour e=o qui est au moins racine simple, il faut donc éliminer e=o autant de fois qu'il est solution pour aboutir à une équation dans laquelle e=o ne soit solution que si on impose une contrainte à l'inconnue a.

Invoquant Euclide(1) Fermat exprime CO et OI comme côtés des triangles C O D et O D I, la relation étudiée devient :

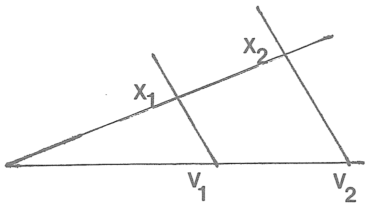
$m\ \sqrt{r^2 + e^2 - 2be} + b\sqrt{r^2 + e^2 + 2ae} = r(m + b)$ et il faut factoriser e. Une première élévation au carré donne $m^2(e^2 - 2be) + b^2(e^2 + 2ae) + 2mb\sqrt{(r^2 + e^2 - 2be)(r^2 + e^2 + 2ae)} = 2r^2mb$ puis, en isolant la racine, une seconde élévation au carré fournit $e((b+m)(a-m) + \text{termes en } e) = 0$, pour que e=o soit solution plus d'une fois il faut donc imposer a=m.

Revenons au point de départ : la durée du trajet est proportionnelle à l'aire CO.m + OI.b ; la lumière étant animée d'un mouvement rectiligne uniforme dans chacun des deux milieux, la durée du trajet est, pour nous, $T(1)+T(2) = \frac{CO}{V(1)} + \frac{OI}{V(2)}$ or $\frac{m}{b} = \frac{V(2)}{V(1)}$ et, par exemple, nous dirions $\frac{1}{V(1)} = km$ et $\frac{1}{V(2)} = kb$ d'où $T(1) + T(2) = k(CO.m + OI.b)$. Fermat ne peut agir ainsi. Tout d'abord, il ne peut pas plus envisager le quotient de deux grandeurs de natures différentes telles que la distance CO et la vitesse V(1) que leur produit ou leur somme. Des grandeurs de natures différentes ne se "mélangent" pas, ne peuvent rien engendrer. Nous n'additionnons pas trois Ampères et deux Francs, cela n'a pas de sens... mais la Relativité nous amène à additionner des vecteurs espace et des vecteurs temps. A la fin du 17è siècle apparaissent des produits d'une masse et d'une vitesse (notre quantité de mouvement), l'un des premiers exemples date de 1686(2) mais Newton reste souvent fort prudent.

Pour essayer de comprendre où sont les difficultés profondes nous devons revenir à l'Antiquité Grecque et à son Logos que nous traduisons par "raison" ou même "rapport" ce qui crée déjà une distorsion : le rapport est, pour nous, un nombre, comme la raison d'une suite arithmétique ou géométrique, le logos grec n'est pas

(1) Il s'agit des propositions 12 et 13 du livre II des Eléments. Nous élèverions au carré la somme des vecteurs OD et DC.
(2) MARIOTTE, Traité du mouvement des eaux.

un nombre(1). On interprèterait mieux, malgré l'anachronisme, en voyant le logos dans un contexte fonctionnel, c'est pratiquemment une "homothètie vectorielle" qui se matérialise, s'incarne, dans des espaces de dimension 1 ; la proportionnalité est plus le théorème de Thalès que notre notion de nombre-rapport, son rôle est de contourner ou prendre en charge la difficile introduction des irrationnels.



Où nous dirions $\frac{X(2)}{X(1)} = \frac{V(2)}{V(1)}$ les Grecs disent que la relation entre X(2) et X(1) est la même que la relation entre V(2) et V(1) : "X(2) est à X(1) comme V(2) à V(1)". (Et pourquoi en géométrie plane refusons-nous les quotients de vecteurs qui ne sont que des nombres complexes...?).

Pour aller plus loin acceptons le rapport au sens du nombre. Il est vrai que si $\frac{3}{2} = \frac{15}{10}$ alors $\frac{10}{2} = \frac{15}{3}$, pouvons-nous pour autant dire que si $\frac{D(2)}{D(1)} = \frac{V(2)}{V(1)}$ alors $\frac{D(2)}{V(2)} = \frac{D(1)}{V(1)}$? Ce serait transgresser la notion de nombre-rapport ! Supposons en effet que $\frac{D(2)}{D(1)} = 3$; cela signifie que $D(2) = D(1) + D(1) + D(1)$, une distance est ainsi une somme de distances. Ecrivons par contre que $\frac{D(2)}{V(2)} = 2$, cela devrait signifier que $D(2) = V(2) + V(2)$, une distance serait égale à une vitesse !

Descartes(2) est peut-être à l'origine du dépassement de cette attitude, pour le moins il synthétise tout un travail obscur de ses prédécesseurs et contemporains. En effet, dans sa Géométrie il définit un segment produit de deux segments et cela grâce au choix d'un segment unité **identifié** au nombre 1 : Soit U le segment unité, A et B deux segments, on peut trouver un segment X (quatrième proportionnelle) tel que X soit à A comme B est à U et je dis (dit Descartes) que X est le produit de A par B, X est une "ligne toute simple", entendons que c'est bien un segment et pas une aire. De $X \longrightarrow A$ et $B \longrightarrow U$ Descartes a fait $\frac{X}{A} = \frac{B}{U}$ puis $X = \frac{AB}{U}$ encore homogène et enfin $X \stackrel{*}{=} A.B$ dont l'homogénéité est "cachée" par l'identification de U avec 1.

(1) EUCLIDE. Eléments, Livre V : "Une raison est une certaine manière d'être de deux grandeurs homogènes entre elles, suivant la quantité".
(2) DESCARTES, La Géométrie, Librairie scientifique Hermann. 1927.

Descartes fait ainsi basculer l'édifice, il le déstabilise et permet l'innovation dans la conception des grandeurs physiques. Tout se joue sur le mot "unité" ou sur un jeu de mot. L'unité selon Euclide(1) est "ce selon quoi chaque chose est dite une", il ne s'agit pas de nombre ou de grandeur de référence mais de "théorie des ensembles", il s'agit de définir les éléments : vais-je compter des grains de blé ou des sacs de grains ? Le nombre euclidien "assemblage d'unités" est davantage une "population" au sens de nos statistiques que le cardinal d'un ensemble. Bien sûr Euclide n'incarne pas plus la mathématique des vingt siècles qui le séparent de Descartes que Bourbaki n'incarne celle du vingtième siècle. Tout un courant numéricien existe en parallèle, toute une pratique différente du nombre se développe à travers Archimède, Diophante, l'Algèbre arabe. Mais Descartes modifie les statuts, il fonde autre chose.

La pratique de Fermat peut être éclairée par celle de Galilée, que Fermat a lu (au moins quand il écrit les deux articles qui nous intéressent). Dans la troisième journée des Discours concernant deux sciences nouvelles(2) Galilée établit, pour un mouvement rectiligne uniforme, que :

Pour une vitesse donnée le rapport des durées est égal à celui des distances (Théorème 1)

Pour une durée donnée le rapport des vitesses de deux mobiles est celui des distances parcourues (Théorème 2)

Pour une distance donnée le rapport des vitesses de deux mobiles est l'inverse de celui des durées (Théorème 3).

Les démonstrations de ces trois théorèmes reposent sur la définition euclidienne de "avoir même raison", nous préférons en venir au cinquième Théorème, directement lié au raisonnement de Fermat.

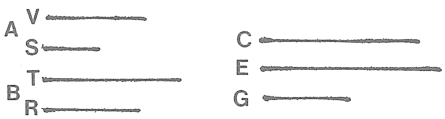
"Théorème V - Proposition V

Si deux mobiles sont mus d'un mouvement uniforme, mais avec des vitesses inégales et sur des espaces inégaux, alors le rapport des temps sera composé du rapport des espaces et du rapport inverse des vitesses.

Soient deux mobiles A et B ; la vitesse de A est à la vitesse

(1) EUCLIDE, Livre VII, Les Oeuvres, Librairie scientifique Blanchard 1966.
(2) GALILEE, Edition Armand Colin.

de B comme V à T, et les espaces parcourus sont comme S à R : je dis que le rapport du temps pendant lequel A se meut au temps pendant lequel B se meut est composé du rapport de la vitesse T à la vitesse V et du rapport de l'espace S à l'espace R. Soit C le temps du mouvement A, et que C soit à E comme la vitesse T est à la vitesse V ; puisque C est le temps durant lequel A franchit avec la vitesse V l'espace S, et puisque la vitesse T du mobile B est à la vitesse V comme le temps C au temps E, - alors E représentera le temps pendant lequel le mobile B franchirait le même espace S.



Posons maintenant entre le temps E et le temps G même rapport qu'entre l'espace S et l'espace R : il en résulte que G est le temps pendant lequel B parcourrait l'espace R. Et parce que le rapport de C à G est composé des rapports de C à E et de E à G ; que, d'une part, le rapport de C à E est identique au rapport inverse des vitesses des mobiles A et B, c'est-à-dire au rapport de T à V ; que, d'autre part, le rapport de E à G est identique au rapport des espaces S et R, la proposition est manifestement établie."

Reprenons la ligne générale en considérant deux mobiles numérotés 1 et 2 et en notant D(i), T(i), V(i) la distance parcourue par le mobile numéro i, la durée du parcours et la vitesse.

Si le mobile 1 parcourt S = D(1) en un Temps T(1), le mobile 2 parcourt la même distance S en un temps t et on a $\frac{T(1)}{t} = \frac{V(2)}{V(1)}$. Le même mobile 2 parcourt alors D(2) en un temps T(2) et on a $\frac{t}{T(2)} = \frac{S}{D(2)}$. Ainsi en multipliant on trouve $\frac{T(1)}{T(2)} = \frac{D(1)}{D(2)} \times \frac{V(2)}{V(1)}$.

Remplaçons alors les mobiles par la lumière dans les milieux 1 et 2, Fermat note D(1) = CO, D(2) = OI et $\frac{V(2)}{V(1)} = \frac{m}{b}$, il a donc $\frac{T(1)}{T(2)} = \frac{CO}{OI} \times \frac{m}{b}$ mais CO, OI, m et b sont des longueurs on peut les multiplier entre elles et obtenir des aires, on a alors $\frac{T(1) + T(2)}{T(2)} = \frac{CO.m + OI.b}{OI.b}$.

De même pour un point O' on a $\frac{T'(1) + T'(2)}{T'(2)} = \frac{CO'.m + O'I.b}{O'I.b}$

or $\frac{T'(2)}{T(2)} = \frac{O'I}{OI}$ donc $\frac{T(1) + T(2)}{T'(1) + T'(2)} = \frac{CO.m + OI.b}{CO'.m+O'I.b}$ ainsi la durée du trajet, T(1) + T(2), est proportionnelle à l'aire CO.m + OI.b. Il est indifférent de minimaliser la durée ou de minimaliser l'aire.

La vision Cartésienne de l'unité peut permettre de passer à notre formulation $T = \frac{D}{V}$, soit en effet D(2) l'unité de longueur, T(2) l'unité de temps et V(2) celle de vitesse, la relation $\frac{T(1)}{T(2)} = \frac{D(1)}{D(2)} \times \frac{V(2)}{V(1)}$ donne, en identifiant le nombre 1 aux unités, $T(1) = \frac{D(1)}{V(1)}$. Cela suppose cependant d'avoir suffisament pris l'habitude de ne plus "voir" l'homogénéité des formules, de faire primer la géométrie algèbrique de Descartes et petit à petit de retrouver l'homogénéité en considérant de nouvelles dimensions physiques telles que le produit d'une longueur par l'inverse d'un temps (c'est-à-dire par une fréquence)...

Peut-être avons-nous un peu abusé de la patience du lecteur, mais il nous a paru intéressant de comparer les pratiques, de scientifiques reconnus, à l'instant où une mutation profonde se prépare.

VIII. La fin du 17ème siècle ou deux théories de la Lumière

La démonstration de Descartes marque un seuil de non retour. La loi des sinus de Snel et Descartes est devenue incontournable pour qui veut parler de la Lumière mais, plus encore, la démonstration controversée incite à prendre position sur la nature de la Lumière. Il n'est guère supportable de voir cette loi établie sur les principes opposés de Descartes et de Fermat. Il est vrai que Fermat ne dit rien de la lumière si on excepte le principe de moindre durée, et que Descartes, qui décide de n'en rien dire, en dit tellement que le lecteur peut comprendre ce qu'il veut.

L'influence de Descartes n'est pas à établir, mais on a parfois tendance à la restreindre au continent et à faire des îles britanniques une terre inviolée. Il n'est pas dans notre propos d'étudier cette simplification ; disons seulement que la lecture de Newton montre sa parfaite connaissance de l'oeuvre de Descartes(1) et l'influence de celui-ci, et qu'à l'inverse la lecture de Gassendi, Roberval, Mariotte et même Mersenne prouve que le continent n'est pas inconditionnellement Cartésien. Le clivage sera sans doute plus net à la génération suivante, celle des disciples, comme il arrive souvent.

S'il est vain de chercher des filiations directes d'un auteur à l'autre tant les influences sont multiples, on peut néanmoins voir dans les oeuvres de Newton et de Christian Huygens deux lectures différentes des travaux de Descartes. Le premier met l'accent sur l'aspect corpusculaire (exemple de la balle) qui est "en phase" avec ses travaux sur l'attraction universelle ; mais, décidément très cartésien, il est conduit à introduire des aspects vibratoires pour expliquer certains phénomènes. Le second, dont le père, Constantin Huygens, fut l'un des correspondants privilégiés de Descartes, accentue l'aspect vibratoire (exemple du bâton), choix en accord avec son intérêt pour les vibrations, oscillations du pendule, étude des chocs... Les troisième et première analogies de Descartes se trouvent ainsi exploitées de façon intensive. La seconde (exemple de la cuve), pivot de la démonstration cartésienne, aurait-elle quelque chose à voir avec Louis de Broglie et le photon guidé par une onde ? Vanitas vanitatis ! on pourrait, aussi bien, faire remonter à Démocrite la théorie de Newton et à Aristote celle de Huygens.

(1) WHITESIDE, <u>The mathematical papers of Issaac Newton</u>, volume I Volume I, 1664-1666, Cambridge University Press - 1967.

Aspects de la théorie corpusculaire de Newton

Les travaux de Newton en optique commencent dès 1666 (pendant la Grande Peste de Londres il a quitté la ville et se consacre à ses recherches). On les trouve dans les Principes Mathématiques de la Philosophie naturelle (1687)(1) et beaucoup plus tard dans l'Optique (1704) si l'on excepte les manuscrits publiés par Whiteside (2).

Les préoccupations de Newton relatives à la pesanteur et au mouvement des planètes, son désir de synthèse et d'unification de la Physique, le poussent à donner la préférence ("à cause de l'analogie qui est entre le mouvement progressif de la lumière et celui des autres projectiles...au reste je ne m'embarasse point de la nature des rayons...je me contente de déterminer les trajectoires des corps qui peuvent être semblables à celles que décrivent les rayons)(3) à l'aspect corpusculaire de la lumière et à faire entrer celle-ci dans le domaine de l'attraction universelle. L'analogie Cartésienne entre lumière et mouvement d'un corpuscule prend ici une tout autre dimension en s'intégrant à une théorie plus vaste ou en ouvrant à celle-ci un plus grand champ d'application.

La lumière est constituée de grains, de "quanta", que Newton nomme rayons (il ne s'agit plus d'une droite) : "Par rayons de Lumière, j'entends ses moindres parties, tant celles qui sont successives dans les mêmes lignes, que celles qui sont contemporaines en différentes lignes"(4) et il précise(5) "car il est évident que la lumière est composée de parties successives et de contemporaines ; puisqu'en un même endroit on peut arrêter celle qui vient dans un certain moment, et laisser passer celle qui vient immédiatement après, comme on peut l'arrêter dans un certain endroit et la laisser passer en même temps dans un autre ; cette partie de la lumière qu'on arrête ne pouvant être la même que celle qu'on laisse passer. Or la moindre partie de lumière qui peut être arrêtée seule sans le reste de la lumière, ou qui peut s'étendre seule, ou faire, ou souffrir toute seule quelque chose, à quoi le reste de la lumière n'a aucune part ; c'est ce que j'appelle un rayon de lumière".

(1) Livre I. Section 14. Edition Blanchard.
(2) op.cit.
(3) NEWTON, Les Principes, Section XIV, Livre I, p. 239-240.
(4) RONCHI, p. 160 et CORTES PLA p. 159 (NEWTON, Opticks, p. 1).
(5) RONCHI, p. 160 (NEWTON Opticks, p. 2).

On sait combien Newton cherche à éviter les a priori (hypotesis non fingo), à ne poser d'hypothèse sans l'avoir mise à l'épreuve de l'expérience. Il est tentant d'introduire l'attraction et les forces dans l'étude de la lumière. Mais Newton trouve, pour ce faire, l'appui d'un phénomène nouvellement mis au jour. En 1665, Le Père Grimaldi publie à Bologne son Physico-mathesis de Lumine, coloribus et iride", dans lequel il mentionne le phénomène de diffraction*, qu'il découvre et nomme et dont il précise qu'il n'a rien de commun avec la propagation rectiligne, ni avec la réflexion ou avec la réfraction. Dans son Optique (1704) Newton cherchera à nier cette différence et à interpréter la diffraction à travers la réflexion et la réfraction, mais dans Les Principia de 1687 on voit comment ce phénomène conforte Newton dans sa conception corpusculaire(1) :

"On peut appliquer ces recherches sur l'attraction à la réflexion de la lumière et à la réfraction qui se fait, comme Snellius l'a découvert, en raison donnée des Sécantes, et par conséquent en raison donnée des sinus, ainsi que Descartes l'a fait voir. Car il est certain, par la découverte des phénomènes des satellites de Jupiter confirmée par les observations de plusieurs Astronomes, que la propagation de la lumière est successive, et qu'elle vient du Soleil à la terre en sept ou huit minutes ; et les rayons en passant près des angles des corps opaques ou transparents tels que l'extrémité d'une lame de couteau, d'une pièce de monnaie, d'un morceau de verre, ou de pierre, etc, s'infléchissent autour de ces corps comme s'ils en étaient attirés : c'est ce qu'a découvert Grimaldi il y a longtemps en faisant entrer un rayon de lumière par un trou dans une chambre obscure, et ce que j'ai vérifié. Ceux de ces rayons qui en passant approchent le plus près des corps se courbent davantage, comme s'ils étaient plus attirés, ainsi que je m'en suis assuré par des expériences exactes. Ceux qui passent à des plus grandes distances s'infléchissent moins ; et ceux qui passent à des distances encore plus grandes s'infléchissent un peu en sens contraire, et forment trois faisceaux de couleurs".

Les grains de lumière ont donc un mouvement très rapide et sont "comme attirés" par les corps ; une modélisation dynamique semble permise. "Les faisceaux de couleurs", signalés à la fin de l'extrait ci-dessus, jouent un rôle. A la suite de Descartes, mais

(1) NEWTON, Principia, Section 14, p. 238-239, Scholie Prop. XCVI Théorème L.

explicitement, Newton prend en charge le problème de la couleur. La réfraction de la lumière solaire provoque des colorations et Newton expérimente avec soin à l'aide de prismes "en série". La lumière blanche, traversant un prisme donne un "spectre" aux couleurs de l'arc-en-ciel, mais si l'on place un diaphragme coupant le faisceau sorti du prisme, de façon à isoler une couleur (lumière monochromatique), ce mini-faisceau traverse un second prisme sans changer de couleur malgré la réfraction. Il existe donc diverses couleurs pures dont le mélange crée la lumière naturelle. En déplaçant le diaphragme on peut étudier l'indice de réfraction pour chaque couleur traversant un même prisme. Le modèle dynamique de la lumière conduit ainsi à doter les grains lumineux de masses différentes, chaque masse étant associée à une lumière monochromatique. La densité des milieux traversés, donc leur masse, intervient aussi, bien sûr, dans la réfraction : il y a lutte d'influence entre eux. Loin de la surface de séparation chaque milieu est maître chez lui, mais la réfraction commence avant le passage de frontière et se prolonge après, puis on retrouve un régime stable et une trajectoire rectiligne. L'hypothèse d'une influence du milieu proportionnelle à la densité de celui-ci est plausible et simple, Descartes l'a rejetée, Newton indique seulement quelques cas d'exception : "Si la lumière est plus rapide dans les corps que dans le vide, selon la proportion des sinus qui mesurent la réfraction des corps, les forces qu'ont les corps de réfléchir et de rompre la lumière sont à fort peu près proportionnelles aux densités de ces mêmes corps, excepté que les corps onctueux et sulfureux produisent des réfractions plus fortes que les autres corps de la même densité"(1). L'exception des corps sulfureux "s'explique" par le principe d'égalité de l'action et de la réaction : la lumière enflamme plus facilement ces corps, donc ceux-ci agissent plus fortement sur la lumière.

Avant d'examiner la démonstration de la loi des sinus donnée par Newton dans les Principes, signalons la célèbre et fructueuse "erreur" de Newton. Le phénomène de dispersion des couleurs est dû à la réfraction, mais seule la masse des grains de lumière entre en jeu puisque les milieux traversés sont les mêmes, par suite il y a proportionnalité entre réfraction et dispersion. La théorie montre donç que dans une lunette (on disait télescope) il est

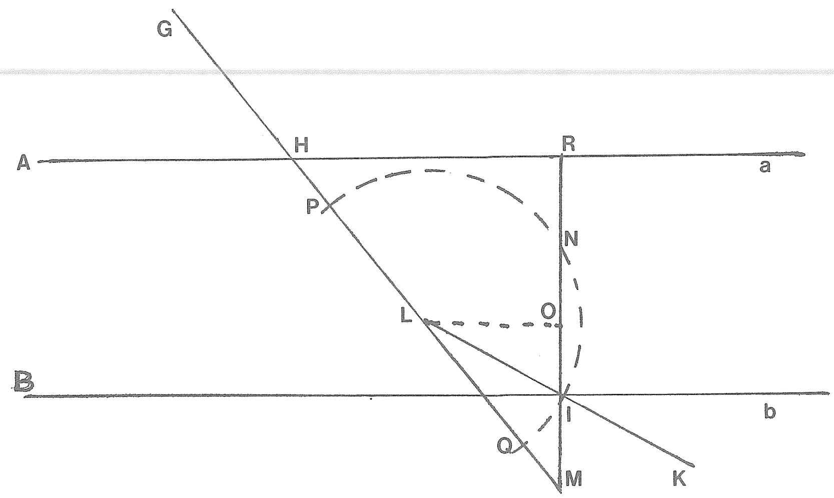
(1) RONCHI, op.cit., p. 169.

impossible de corriger l'aberration chromatique : Newton invente alors le télescope à miroir, notre télescope(1) (si le mot s'est spécialisé, concentré, l'adjectif "télescopique" c'est au contraire étendu largement).

La démonstration contenue dans les Principia est une démonstration de dynamique théorique, appliquée ensuite au cas particulier des grains de lumière en supposant que le modèle convient : "à cause de l'analogie qui est entre le mouvement progressif de la lumière, et celui des autres projectiles, j'ai cru nécessaire d'ajouter les propositions suivantes en faveur des Opticiens. Au reste, je ne m'embarasse point de la nature des rayons, je n'examine point s'ils sont matériels ou non ; mais, je me contente de déterminer les trajectoires des corps qui peuvent être semblables à celles que décrivent les rayons"(2). En d'autres termes, certaines conditions dynamiques déterminent des trajectoires qui correspondent bien au phénomène de réfraction, cela ne signifie pas que la lumière soit corpusculaire mais permet cette hypothèse. Il n'est pas interdit de penser que c'est l'hypothèse corpusculaire qui a provoqué la rédaction de cette quatorzième section qui clôt le livre I des Principia.

Pour comprendre le raisonnement de la première proposition de cette section (Proposition XCIV, Théorème XLVIII) il faut, comme il arrive souvent (en science en particulier) en faire une lecture circulaire et relire le début à la lumière de la dernière partie. En effet, dans la première partie Newton introduit en cours de route une hypothèse ("en supposant l'attraction uniforme") qui n'apparaît pas dans l'énoncé de la proposition ("que l'attraction soit toujours la même partout à des distances égales de l'un et l'autre plan prises du même côté de ces plans"). On peut en fait considérer cette première partie, que Newton intitule "cas 1", comme un lemme utilisé dans la seconde partie ("cas 2") dans laquelle on envisage des plans parallèles infiniment voisins ce qui autorise l'emploi de l'hypothèse du premier cas : en première approximation l'attraction est constante entre les deux plans, ce que Newton indique en invoquant une loi de continuité ("en sorte que l'action de l'attraction devienne continue selon une loi quelconque donnée").

(1) RONCHI, op.cit., p. 169.
(2) NEWTON, op.cit., fin du Scholie cité.



"PROPOSITION XCIV. THEOREME XLVIII

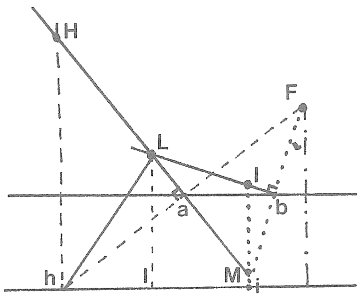
Si deux milieux, dont chacun est homogène, sont séparés par un espace terminé de part et d'autre par des plans parallèles, et qu'un corps en passant par cet espace soit attiré ou poussé perpendiculairement vers l'un ou l'autre de ces milieux, que de plus il n'éprouve aucune autre force qui le retarde ou l'accélère : et que l'attraction soit toujours la même partout à des distances égales de l'un et de l'autre plan prises du même côté de ces plans : le sinus d'incidence sur l'un ou l'autre plan sera en raison donnée au sinus d'émergence par l'autre plan.

Cas I. Aa, Bb, étant deux plans parallèles, supposez qu'un corps tombe sur le premier plan Aa suivant la ligne G H, et que pendant tout le temps de son passage par l'espace intermédiaire il soit attiré ou poussé vers le milieu où s'est fait l'incidence, en sorte que par cette attraction il décrive la courbe H I, et qu'il sorte suivant la ligne I K. Elevez ensuite sur le plan d'émergence Bb la perpendiculaire I M qui rencontre en M la ligne d'incidence G H prolongée, et en R le plan d'incidence Aa. Du centre L où la ligne d'émergence prolongée rencontre H M, et du rayon L I décrivez un cercle qui coupe la ligne H M en P et en Q, et en N la ligne M I R. Cela fait, en supposant l'attraction ou l'impulsion uniforme, la courbe H I sera, suivant les démonstrations de Galilée, une parabole, et aura par conséquent cette propriété, que le rectangle sous le paramètre donné et sous la ligne I M est égal au quarré de H M ; mais à cause que la ligne H M est coupée en deux parties égales au point L, il est clair, en abaissant la perpendiculaire L O sur M I, que M O est égale à O R, ainsi que M N à I R. Or comme I R est donnée, M N le sera aussi ; donc le rectangle N M x M I sera au rectangle sous le paramètre et sous I M, c'est-à-dire, à H M, en raison donnée. De plus, le rectangle N M x M I est égal au rectangle P M x M Q, c'est-à-dire, à la différence des quarrés M L et P L, ou L I ; et H M à une raison donnée à M L puisqu'il en est quadruple : donc la raison de M L -L I à M L est donnée, et par conséquent la raison de L I à M L, et celle de L I à L M sont aussi données. Maintenant dans tout triangle L M I, les sinus des angles sont proportionnels aux côtés opposés, donc la raison du sinus de l'angle d'incidence L M R au sinus de l'angle d'émergence L I R est donnée. C.Q.F.D.".

Arrêtons-nous un instant sur ce premier cas. Notre pratique mathématique nous a permis d'oublier beaucoup de connaissances familières au mathématicien du dix-septième siècle ; qu'il s'agisse des coniques ou des proportions nous sommes devenus malhabiles dans la "manipulation" et nous manquons de bases (cf. Baudelaire : L'Albatros).

L'attraction étant supposée uniforme et orthogonale aux plans d'incidence et d'émergence le vecteur accélération a pour coordonnées $x'' = 0$ et $y'' = a$; ainsi x est du premier degré en t et y du second. Par suite y est du second degré en x, d'où la parabole. Mais on lira avec intérêt le début de la quatrième journée des Discorsi de Galilée si l'on veut se familiariser avec le dix-septième siècle.

Si nous définissons la parabole comme ensemble des points équidistants de la directrice et du foyer, soient h et i les projetés orthogonaux de H et I sur la directrice, la tangente en H est la médiatrice Ha de Fh et la tangente en I la médiatrice Ib de Fi.



On a donc Lh=LF=Li qui donne L pour milieu de H M. Par ailleurs les triangles (L I M) et (h L H) sont semblables, en effet, d'une part l'angle L M I est égal à L H h, d'autre part les points I a b F sont cocycliques donc les angles b L F et b a F sont égaux, c'est-à-dire que i L b et l L Msont égaux, en retranchant i L M on a donc

1 L i = M L I or 1 L i = H h L donc H h L = M L I. De la similitude on tire $\frac{H\,h}{L\,M} = \frac{L\,H}{I\,M}$ soit I M.H h = L M.L H puis, L étant le milieu de M H, 4 I M.H h = H M^2. Le paramètre en question dans le texte de Newton est 4 H h.

La seconde partie du raisonnement utilise la notion de puissance d'un point par rapport à un cercle, que nos élèves peuvent "récupérer" par le produit scolaire, et la proportion demeurée classique entre les côtés d'un triangle et le sinus des angles opposés.

"Cas II. Que le corps passe à présent successivement par plusieurs espaces terminés par des plans parallèles A a b B, B b c C, etc. et qu'il soit pressé par une force uniforme dans chaque espace, mais différente dans des espaces différents ; il est clair, par ce qui vient d'être démontré, que le sinus d'incidence sur le premier plan A a, sera au sinus d'émergence du second plan B b, en raison donnée, et que ce dernier sinus, qui devient le sinus d'incidence sur le second plan B b, sera au sinus d'émergence du troisième plan C c, en raison donnée ; ensuite, que ce nouveau sinus sera au sinus d'émergence du quatrième plan D d, en raison donnée ; et ainsi à l'infini, en sorte qu'il en résultera, que le sinus d'incidence sur le premier plan est au sinus d'émergence du dernier plan en raison donnée. Imaginons à présent que les intervalles des plans diminuent à l'infini, et que le nombre de ces plans augmente de même, en sorte que l'action de l'attraction ou de l'impulsion devienne continue selon une loi quelconque donnée ; alors la raison du sinus d'incidence sur le premier plan au sinus d'émergence du dernier plan, sera aussi donnée. C.Q.F.D.

PROPOSITION XCV. THEOREME XLIX.

Les mêmes choses étant posées, la vitesse du corps avant l'incidence est à sa vitesse après l'émergence, comme le sinus d'émergence au sinus d'incidence.

Soient prises égales les lignes A H, I d, et soient élevées les perpendiculaires A G, d K qui rencontrent les lignes d'incidence et d'émergence G H, I K, en G et K. Soit prise ensuit sur G H, T H = I K, et soit abaissée la perpendiculaire T v sur le plan A a. Si l'on décompose, par le Corol.2. des lois, le mouvement du corps en deux mouvements, l'un perpendiculaire aux plans A a, B b, C c, etc. et l'autre parallèle à ces mêmes plans, la force de l'attraction ou de l'impulsion agissant suivant des lignes perpendiculaires, ne changera rien aux mouvements suivant des lignes parallèles, et par conséquent le corps par ce mouvement parcourera en temps égaux dans la direction parallèle aux plans les espaces égaux qui sont entre la ligne A G et le point H, et entre le point I et la ligne d K ; c'est-à-dire, qu'en temps égaux il parcourera les lignes G H, I K ; et par conséquent la vitesse avant l'incidence sera à la vitesse après l'émergence comme G H à I K ou T H, ou, ce qui revient au même, comme A H ou I d à v H, ou enfin, à cause de l'égalité des rayons T H, ou I K, comme le sinus d'émergence au sinus d'incidence. C.Q.F.D.".

Dans son Optique, Newton met sa théorie à l'épreuve de tous les phénomènes connus, réfraction et loi des sinus évidemment, mais aussi la dispersion des couleurs, la biréfringence* du spath d'Islande étudiée par Huygens, la diffraction inventée par Grimaldi, la coloration des lames minces*, mise en évidence par Hooke. Et tout ne s'explique pas facilement. Newton est poussé vers une conception plus vibratoire : "Tout rayon de lumière acquiert en passant à travers une surface réfringente quelconque, une certaine constitution ou disposition transitoire, qui dans le progrès du rayon revient à intervalles égaux, et fait que le rayon, à chaque retour de cette disposition, est transmis aisément à travers la surface réfringente qui vient immédiatement après, et qu'à chaque intermission de cet état, il est aisément réfléchi par cette même surface... De savoir ce que c'est que cette action ou disposition, si elle consiste en un mouvement de circulation ou de vibration dans le rayon, ou dans le milieu, ou en quelque autre chose, c'est ce que je n'examine point ici..."(1). Mais Newton enchaîne en autorisant le lecteur à des comparaisons avec les ondulations provoquées par une pierre jetée dans l'eau ou avec la propagation du son. La théorie corpusculaire de la lumière, portée par la dynamique newtonienne, triomphera pendant un siècle, mais il est temps pour nous d'examiner la conception vibratoire de Christian Huygens.

Les Ondes de Christian Huygens

"Les démonstrations qui concernent l'Optique, ainsi qu'il arrive dans toutes les sciences où la géométrie est appliquée à la matière, sont fondées sur des vérités tirées de l'expérience ;

(1) RONCHI, Histoire de la Lumière, p. 178-181, qui cite l'Optique livre II. IIIè partie.

telles sont que les rayons de lumière s'étendent en droite ligne ; que les angles de réflexion et d'incidence sont égaux, et que dans les réfractions le rayon est rompu suivant la règle des sinus, désormais si connue et qui n'est pas moins certaine que les précédentes.

La plupart de ceux qui ont écrit touchant les différentes parties de l'Optique se sont contentés de présupposer ces vérités. Mais quelques-uns plus curieux en ont voulu rechercher l'origine et les causes, les considérant elles-mêmes comme des effets admirables de la Nature. En quoi ayant avancé des choses ingénieuses, mais non pas telles pourtant que les plus intelligents ne souhaitent des explications qui leur satisfassent davantage, je veux proposer ici ce que j'ai médité sur ce sujet, pour contribuer autant que je puis à l'éclaircissement de cette partie de la sciences naturelle, qui non sans raison en est réputée une des plus difficiles. Je reconnais être beaucoup redevable à ceux qui ont commencé les premiers à dissiper l'obscurité étrange où ces choses étaient enveloppées et à donner espérance qu'elles se pouvaient expliquer par des raisons intelligibles. Mais je m'étonne aussi d'un autre côté comment ceux-là même, bien souvent, ont voulu faire passer des raisonnements peu évidents comme très certains et démonstratifs : ne trouvant pas que personne ait encore expliqué probablement ces premiers et notables phénomènes de la lumière, savoir pourquoi elle ne s'étend que suivant des lignes droites, et comment les rayons visuels, venant d'une infinité de divers endroits, se croisent sans s'empêcher en rien les uns les autres.

J'essaierai donc dans ce livre, par des principes reçus dans la Philosophie d'aujourd'hui, de donner des raisons plus claires et plus vraisemblables, premièrement de ces propriétés de la lumière directement étendue, secondement de celle qui se réfléchit par la rencontre d'autres corps. Puis j'expliquerai les symptômes des rayons qui sont dits souffrir réfraction en passant par des corps diaphanes de différentes espèces, où je traiterai aussi des effets de la réfraction de l'air par les différentes densités de l'atmosphère.

Ensuite j'examinerai les causes de l'étrange réfraction de certain cristal qu'on apporte d'Islande. Et en dernier lieu je traiterai des différentes figures des corps transparents et réfléchissants, par lesquelles les rayons sont assemblés en un point, ou détournés en différentes manières. Où l'on verra avec quelle facilité se trouvent, suivant notre théorie nouvelle, non seulement les ellipses, hyperboles et autres lignes courbes que M. Descartes a subtilement inventées pour cet effet, mais encore celles qui doivent former la surface d'un verre lorsque l'autre surface est donnée sphérique, plate, ou de quelque figure que ce puisse être.

L'on ne saurait douter que la lumière ne consiste dans le mouvement de certaine matière. Car soit qu'on regarde sa production, on trouve qu'ici sur la Terre, c'est principalement le feu et la flamme qui l'engendrent, lesquels contiennent sans doute des corps qui sont dans un mouvement rapide, puisqu'ils dissolvent et fondent plusieurs autres corps des plus solides ; soit qu'on regarde ses effets, on voit que quand la lumière est ramassée, comme par des miroirs concaves, elle a la vertu de brûler comme le feu, c'est-à-dire qu'elle désunit les parties des corps ; ce qui marque assurément du mouvement, au moins dans la vraie philosophie, dans laquelle on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons mécaniques. Ce qu'il faut faire à mon avis, ou bien renoncer à toute espérance de ne jamais rien comprendre dans la physique.

Et comme, suivant cette philosophie, l'on tient pour certain que la sensation de la vue n'est excitée que par l'impression de quelque mouvement d'une matière qui agit sur les nerfs au fond de nos yeux, c'est encore une raison de croire que la lumière consiste dans un mouvement de la matière qui se trouve entre nous et le corps lumineux"(1).

Si les idées scientifiques de Huygens dérivent en partie de celles de Descartes, elles ont aussi d'autres sources. Dès 1663 Huygens travaille avec la Royal Society et est en contact avec le courant de la Philosophie Naturelle, mais il devient aussi membre de l'Académie Royale des Sciences qu'il oubliera de rejoindre après la révocation de l'Edit de Nantes ; de ce fait il est familiarisé avec le courant des non-cartésiens français, positivistes en ce sens que l'expérimentation seule peut valider la théorie (cf. par exemple, le débat sur la pesanteur soutenu par Huygens contre Roberval(2)).

Dans son Traité de la Lumière (publié en 1690 mais déjà, en grande partie, exposé à l'Académie des Sciences en 1678) Huygens ne manque pas de faire l'éloge de Descartes, mais il avoue que la

(1) HUYGENS, op.cit. Début du premier chapitre.
(2) Mémoires de l'Académie des Sciences. 1669.

théorie de celui-ci n'est pas satisfaisante. Sa propre conception est permise et/ou suggérée par la lecture de Descartes mais est dirigée par l'intérêt de Huygens pour les vibrations, oscillations du pendule, etc... Il cite d'ailleurs ses précurseurs(1) : Hooke et sa micrographie (1665), le Père Pardies et son manuscrit de 1673(2).

Le Traité de la Lumière commence par des considérations sur la nature de la lumière, ce qui tranche sur la prudence de l'époque. "On ne saurait douter que la lumière ne consiste dans le mouvement d'une certaine matière". A l'appui de cette assertion Huygens invoque tant la façon dont, sur terre, on produit la lumière, que les effets de celle-ci. "Dans la vraie Philosophie... on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mécanique. Ce qu'il faut faire, à mon avis, ou bien renoncer à toute espérance de ne jamais rien comprendre dans la physique". Descartes n'est pas loin et la tardive, mais écrasante, suprématie de la dynamique Newtonienne non plus.

Il y a mouvement donc, mais les rayons lumineux se croisent sans altération : il ne saurait y avoir transport de matière, il s'agit de transfert d'une vibration à travers une matière fort subtile, tout comme le son résulte de la propagation d'un ébranlement de l'air. On ne trouve cette analogie son-lumière ni chez Descartes ni chez Newton mais on peut penser au Père Mersenne et à ses études sur les réflexions et réfractions du son(3).

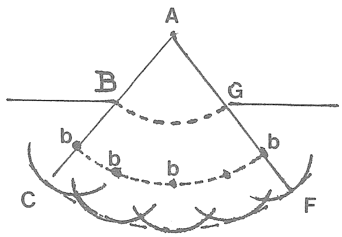
Que peut-on dire de cette matière très subtile ? Huygens, en accord avec Galilée, Grimaldi, Fermat..., refuse la transmission instantanée de la lumière, s'opposant ainsi aux idées de Descartes dont-il interroge l'un des arguments forts (celui de l'éclipse de lune). Il est vrai que Roemer (dont Huygens explique l'argumentation) a pu estimer la vitesse de la lumière en 1676 et que Descartes est mort en 1650 ; Huygens montre donc "seulement" où est la faiblesse d'un argument déjà démenti par les faits.

Si la lumière se propage comme le son en ondes sphériques, mais très rapidement, le milieu support ne peut pas être l'air car les expériences sur le vide (Pascal, Roberval, Boyle...) ont établi que, au contraire du son, la lumière se propage dans le vide(4).

(1) HUYGENS, op.cit. p. 23.
(2) Publié par le Père Ango en 1682 : L'optique divisée en troislLivres
(3) Article ci-inclus de Christiane LIZE.
(4) HUYGENS, Traité de la Lumière, p. 11 et suivantes.

Huygens, qui dès 1669 a étudié les lois du choc des corps, fait alors une analogie entre propagation de la lumière et propagation du choc sur une rangée, puis un tas, de boules dures. Celles-ci font ressort et, sans déplacement apparent, transmettent très vite le choc à la dernière boule. La matière très subtile, l'éther, sera donc constituée de particules presque parfaitement dures et élastiques, très petites et remplissant tous les pores de la matière. Cette matière est si subtile, dit Huygens, que si l'on fait mouvoir une boule de verre, creuse et traversée par la lumière, l'éther ne reste pas à l'intérieur mais traverse "fort aisément" la boule de part en part "puisque" l'inertie EST la même que celle de la masse de verre seule(1). Huygens élude ainsi la question de la masse des particules d'éther.

Chaque point, par exemple du soleil, émet une onde (cette ponctualisation est dans la lignée d'Alhazen) mais cette onde, se propageant au loin perd de la "force" et ne devrait pas provoquer la vision. Cela a interdit à Pardies et Hooke d'aboutir, dit Huygens(2). Mais l'onde se propageant chaque point rencontré devient source lui-même, ce qui explique une propagation à longue distance sans déperdition trop rapide : l'onde qui provoque la vision est en fait une enveloppe d'ondes très faibles, il y a "sommation" d'énergies infinitésimales. Huygens montre que sa conception explique la propagation rectiligne de la lumière : soit en effet un diaphragme BG, une onde sphérique issue de A parviendra en CF comme enveloppe d'ondes centrées en b, seule l'accumulation de celles-ci procure une perception. Ce qui se passe au-delà des droites ABC et AGF existe mais est infime et ne provoque donc aucune perception.



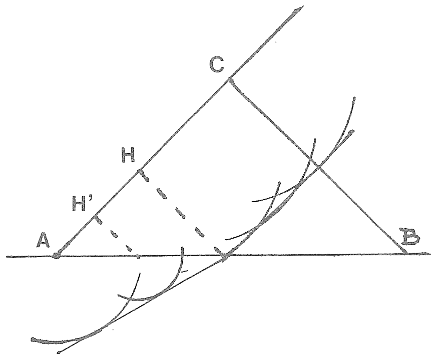
Huygens passe à côté du phénomène de diffraction, connu depuis Grimaldi(3) ; son souci est de montrer que sa théorie respecte ce qu'elle pourrait sembler rejeter : si on rapproche B et G l'un de l'autre on finira par percevoir un rayon rectiligne. Les corpuscules de Newton ne pouvaient expliquer la diffraction, Huygens n'examine même pas le phénomène alors que ses ondes contenaient en germe une explication.

(1) op.cit. Chap. III, p. 34 à 41.
(2) op.cit. Chap. I, p. 23.
(3) GRIMALDI, Physico-mathesis de Lumine, coloribus et iride 1665.

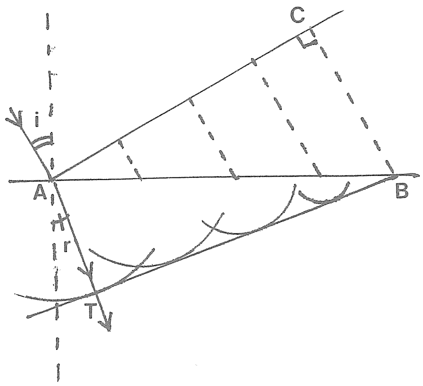
<u>Le Traité de la Lumière</u> comprend six chapitres, le premier (Des rayons directement étendus) fixe la conception de Huygens, le second traite de la réflexion, le troisième nous retiendra un peu puisqu'il aborde le problème de la réfraction, le quatrième étudie la réfraction de l'air, le cinquième la double réfraction (spath d'Islande) et le dernier s'intéresse à la forme des verres.

Dans son chapitre sur la réfraction Huygens envisage d'abord comment la lumière peut pénétrer les milieux transparents : on peut, dit-il, envisager que l'éther les pénètre, et transmette elle-même la vibration lumineuse, ou que leurs particules entrent en vibration, ou que les deux phénomènes interviennent. Huygens pose alors pour seule hypothèse que la vitesse de propagation est moindre dans les milieux les plus réfringents, s'opposant ainsi à la thèse, nécessaire, de Descartes et évitant le principe de Fermat qu'il déduit, au contraire, en fin de chapitre.

Soit AB le plan de séparation des deux milieux, le plus réfringent étant sous AB et le rapport des vitesses étant de 2/3. Considérons une onde AC de centre très éloigné et, de ce fait, plane. Lorsque A heurte AB il émet une onde sphérique de centre A alors que C et les points entre A et C émettent des ondes dont l'enveloppe, onde visible, est une parallèle à AC. Supposons qu'au bout d'un temps t l'onde émise par C ou H soit un cercle de rayon 3, la partie HC de l'onde AC sera devenue la droite KKK. Le milieu H' de AH sera venu en K' milieu de AK et aura émis une onde sphérique de rayon $\frac{3}{2} \times \frac{2}{3}$, soit 1. L'onde sphérique émise par A aura un rayon 2 (c'est-à-dire $3 \times \frac{2}{3}$). La droite KN est tangente commune (homothètie) aux ondes issues des points compris entre A et K' et l'onde plane initiale AH sera devenue la ligne brisée NN'KKK.

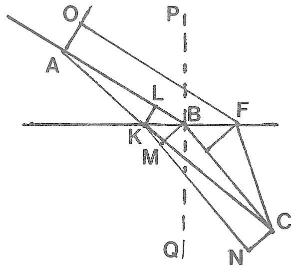


Le même raisonnement fait lorsque C parvient en B donne pour pour "image" de l'onde plane AC, l'onde plane BT. Mais le rayon lumineux est la direction de propagation de l'onde, il est donc initialement orthogonal à AC et finalement à BT. Or sin i = sin (B A C) et sin r = sin (A B T), et, avec l'hypothèse, 3 AT = 2 BC donc sin i = 1,5 sin r.



"Je finirai cette théorie de la réfraction en démontrant une proposition remarquable qui en dépend ; savoir qu'un rayon de lumière pour aller d'un point à un autre, quand ces points sont dans des diaphanes différents, se rompt en sorte à la surface plane qui joint ces deux milieux, qu'il emploie le moindre temps possible, tout de même qu'il arrive dans la réflexion contre une surface plane. M. Fermat a proposé le premier cette propriété des réfractions, tenant comme nous, et directement contre l'opinion de M. Descartes, que la lumière passe plus lentement à travers le verre et l'eau qu'à travers l'air. Mais il supposait outre cela la proportion constante des sinus, que nous venons de prouver par ces seuls divers degrés de vitesse ; ou bien, ce qui vaut autant, il supposait outre ces diverses vitesses, que la lumière employait en ce passage le moindre temps possible, pour en conclure la proportion constante des sinus. Sa démonstration, qui se voit dans ses ouvrages imprimés et dans le livre des lettres de M. Descartes, est fort longue ; c'est pourquoi je donne ici cette autre plus simple et plus facile.

Soit la surface plane KF (voir Fig. p.246); le point A dans le diaphane que la lumière traverse plus facilement comme l'air ; le point C dans un autre plus difficile à pénétrer, comme l'eau ; et qu'un rayon soit venu de A, par B en C, ayant été rompu en B suivant la loi peu auparavant démontrée ; c'est-à-dire qu'ayant mené P B Q, qui coupe le plan à angles droits, le sinus de l'angle A B P au sinus de l'angle C B Q ait la même raison que la vitesse de la lumière dans le diaphane, où est A, à sa vitesse où est C. Il faut démontrer que les temps du passage de la lumière par A B et B C, pris ensemble, sont les plus courts qu'ils peuvent être. Prenons qu'elle soit venue par d'autres lignes, et premièrement par AF, FG, en sorte que le point de réfraction F soit plus distant que B du point a, et soit



AO perpendiculaire sur AB, FO parallèle à AB ; BH perpendiculaire sur FO, et FG sur BC.

Puisque donc l'angle H B F est égal à P B A, et l'angle B F G égal à Q B C, il s'ensuit que le sinus de l'angle H B F aura aussi au sinus de B F G la même raison que la vitesse de la lumière dans le diaphane A, à sa vitesse dans le diaphane C. Mais ces sinus sont les droites HF, BG, en prenant BF pour demi-diamètre d'un cercle. Donc ces lignes, HF, BG ont entre elles ladite raison des vitesses. Et partant le temps de la lumière par HF, supposé que le rayon fut OF, serait égal au temps par BG au dedans du diaphane C. Mais le temps par AB est égal au temps par OH, donc le temps par OF est égal au temps par AB, BG. Derechef le temps par FC est plus long que par GC, donc le temps par OFC sera plus long que par ABC. Mais AF est plus grande que OF, donc le temps par AFC excédera d'autant plus le temps par ABC.

Prenons maintenant que le rayon soit venu de A en C par AK, KC, le point de réfraction AK étant plus près de A que n'est le point B ; et soit CN perpendiculaire sur BC, KN parallèle à BC, BM perpendiculaire sur KN, et KL sur BA.

Ici BL et KM sont les sinus des angles BKL, KBM, c'est-à-dire des angles PBA, QBC ; et partant elles sont entre elles comme la vitesse de la lumière dans le diaphane A, à la vitesse dans le diaphane C. Donc le temps par LB est égal au temps par KM ; et puisque le temps par BC est égal au temps par MN, le temps par LBC sera égal au temps par KMN. Mais le temps par AK est plus long que par AL : donc le temps par AKN est plus long que par ABC. Et KC étant plus long que KN, le temps par AKC surpassera d'autant plus le temps par ABC. Ainsi il paraît que le temps par ABC est le plus court qu'il peut être : ce qu'il fallait démontrer"(1).

Nous voici au terme du voyage, l'histoire s'ouvre sur le dix-huitième siècle et le triomphe des théories newtoniennes jusqu'au jour où l'électro-magnétisme... mais c'est un autre conte pour une autre veillée.

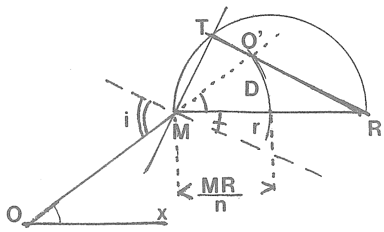
(1) HUYGENS, op.cit., p. 51-53.

A P P E N D I C E :

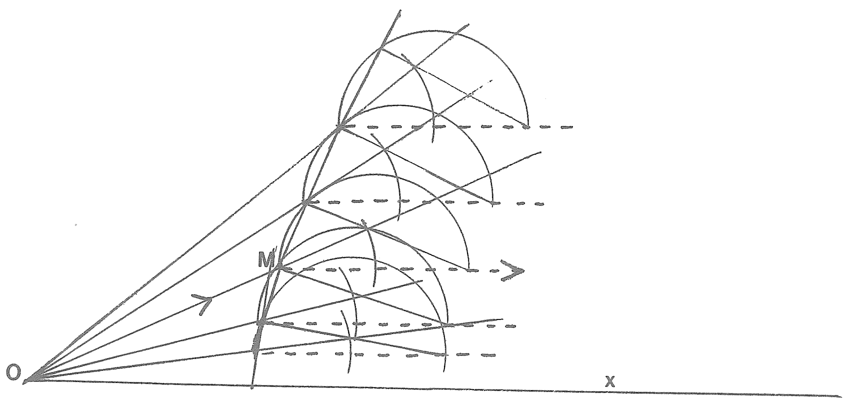
Les coniques et la loi des sinus

Le problème de Képler était de tailler une surface de révolution telle que les rayons issus d'un point donné O émergent après réfraction en un faisceau de rayons parallèles.

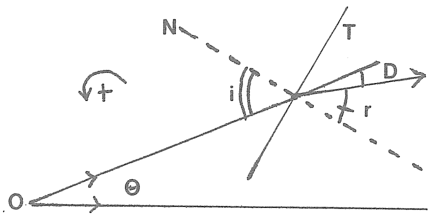
Soit MT la tangente en M à la courbe méridienne. L'expression de la "loi des sinus" est, selon Snellius, $\frac{MO'}{MR} = \frac{1}{n}$. Si, connaissant M et imposant la direction MR du rayon réfracté on veut construire la tangent MT il suffit de tracer le demi-cercle de diamètre MR puis l'arc de cercle de centre M et de rayon $\frac{MR}{n}$. On obtient ainsi O' sur OM puis T sur RO'.



Si l'on considère alors que la courbe est quasi confondue avec sa tangente au voisinage de M on peut réitérer la construction avec un point à gauche de M et un point à droite. On obtient une approximation graphique de la courbe cherchée.



Reprenons la question sous un angle plus théorique. Soit $\vec{i}$ le vecteur de référence, MT la tangente, MN la normale en M et $D = i - r$ la déviation. Posons $\overrightarrow{OM} = \rho\vec{u}$, u unitaire, ρ et $\vec{u}$ fonction de θ, soit enfin $\vec{n}$ le vecteur unitaire dirigé par $\vec{u}' = \frac{d\vec{u}}{d\theta} = \vec{n}$.



Un vecteur directeur de la tangente est $\vec{T} = \rho'\vec{u} + \rho\vec{n}$ et $\vec{N} = \rho\vec{u} - \rho'\vec{n}$ est directeur de la normale. $\overrightarrow{OM} \cdot \vec{N} = \rho^2$ et $\mathrm{Det}(\vec{N}, \overrightarrow{OM}) = -\rho\rho'$, par suite $\mathrm{tg}\, i = \frac{\rho'}{\rho}$ l'orientation n'étant pas ici à considérer. (On aurait pu faire cette mise en place à l'aide des complexes ou des coordonnées cartésiennes). Si nous voulons que les rayons réfractés soient parallèles entre eux nous pouvons poser $D = \theta$, D devenant la variable.

Supposons alors que nous connaissons la loi $\sin i = n \sin r$. Nous avons $\sin r = \sin (i-D)$

d'où $\sin i = n \sin i \cos D - n \cos i \sin D$

puis $\mathrm{tg}\; i = \frac{n \sin D}{n \cos D - 1}$ or $\mathrm{tg}\, i = \frac{\rho'}{\rho}$

par suite $\rho = \frac{k}{n \cos D - 1}$ où k est une constante réelle. Equation d'une conique de foyer O et d'excentricité n que nos élèves "récupére - rons" par $\rho^2 = x^2 + y^2$ et $\cos D = \frac{x}{\rho}$.

Supposons au contraire que nous ayions l'idée (expérimentale, culturelle,...) que la courbe cherchée est une conique de foyer O . Soit n son excentricité, on a $\rho = \frac{k}{n \cos D - 1}$ d'où $\rho' = \frac{k\, n \sin D}{(n \cos D - 1)^2}$ et par suite $\frac{\rho'}{\rho} = \frac{n \sin D}{n \cos D - 1}$; or $\mathrm{tg}\, i = \frac{\rho'}{\rho}$ donc $\frac{\sin i}{\cos i} = \frac{n \sin D}{n \cos D - 1}$ puis $\sin i = n (\sin i \cos D - \cos i \sin D)$ c'est à dire $\sin i = n \sin r$. Le calcul en coordonnées cartésiennes est quelque peu plus pénible mais praticable : en partant de l'équation $(n^2 - 1)x^2 - 2n\, k\, x + k^2 = y^2$ on aboutit à $\rho^2 = (nx - k)^2$ et si l'on prend $\rho = nx - k$, $\rho' = n$, $\cos D = \frac{x}{\rho}$, $\sin D = \frac{nx - \rho}{\rho 2}$ redonne $\frac{\sin i}{\cos i} = \frac{n \sin D}{n \cos D - 1}$.

Bien entendu Képler ne pouvait envisager ces calculs, mais en abordant empiriquement ce problème inverse des tangentes il préfigure les recherches du siècle et pose l'un des problèmes qui conduiront aux fluxions et fluentes, à Newton et Leibniz.

LEXIQUE COMMENTE

-o-o-

Achromatisme ("a" privatif. khrôs : peau, khrôma : carnation, couleur) (18è - 19è siècle)

Il y a achromatisme s'il n'y a pas coloration. Or (cf. Dispersion) l'indice de réfraction varie avec la couleur (arc-en-ciel) de la lumière. Ainsi, en général, la lumière blanche incidente est décomposée lors de la réfraction, les diverses couleurs qui la composent se réfractant de façons différentes. Ce phénomène de coloration est nommé aberration chromatique. On corrige ce défaut des lentilles (occulaires, objectifs, d'appareils optiques) en accolant plusieurs lentilles de pouvoirs dispersifs différents.
Newton, en raison de sa théorie, "savait" qu'il était impossible de réduire l'aberration chromatique, c'était théoriquement impossible. C'est pourquoi il préconisa l'emploi du Télescope basé sur la Réflexion.

Biréfringent voir Réfringent

Coloration (des lames minces)

C'est le phénomène courant de "l'arc-en-ciel" que l'on voit lorsqu'il y a une pellicule d'huile sur la chaussée, ou sur les bulles de savon. On l'explique par les propriétés ondulatoires de la lumière.
La première étude systématique est due à Robert Hooke (1665 : Micrographia, ouvrage important pour l'histoire des instruments d'optique et plus particulièrement du Microscope).

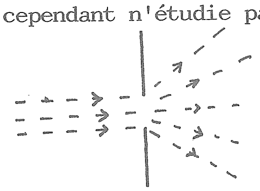
Cosécante voir Sécante

Déviation (angle de) angle compris entre le rayon incident et le rayon réfracté, voir figure à Réfraction.

Diffraction (mise en pièce)

Phénomène identifié et nommé par Grimaldi (17è siècle). Lorsque la lumière franchit un trou très petit (quasi-ponctuel) on pourrait s'attendre (le rayon théorique étant rectiligne) à ce qu'elle poursuive sa course tout droit, sans incident. Or la lumière "éclate", s'éparpille de l'autre côté de l'orifice. Ce phénomène interdit dans la pratique l'espoir d'isoler un rayon lumineux ; Il s'explique par les théories ondulatoires de la lumière, théories défendues par Huygens qui cependant n'étudie pas la diffraction.

lumière



Le phénomène de diffraction n'a rien à voir avec celui de Dispersion ou de Réfraction, Grimaldi l'a découvert vraisemblablement en cherchant à obtenir des sources lumineuses ponctuelles.

Dispersion (grec speiro, semer, répandre : dans épars, asperger)

Ce phénomène est lié à la réfraction. Si un faisceau de lumière blanche traverse un prisme on reçoit sur un écran une image comportant les couleurs de l'arc-en-ciel (on dit "un spectre lumineux). Ceci a permis à Newton de montrer que la lumière blanche est composée des diverses lumières colorées, dites monochromatiques (chroma : coloration). L'indice de réfraction dépend de la couleur de la lumière utilisée ; de ce fait la lumière blanche se trouve dispersée du rouge au violet après réfraction. Certains milieux ont un pouvoir dispersif très faible (l'indice de réfraction varie peu en fonction de la couleur) d'autres sont très dispersifs. La théorie de Newton ne prévoyait pas ces différences de pouvoir dispersif.

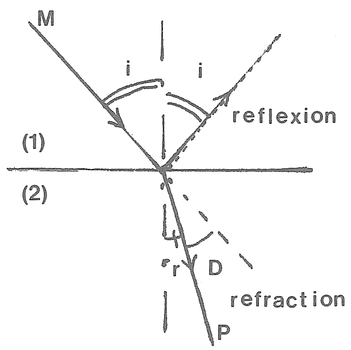
Ether C'est le milieu imaginé par les physiciens dans lequel se propage la lumière (Huygens par exemple). Ce milieu pénètre tous les autres et a des propriétés particulières. Celles-ci ont varié en fonction des théories. La physique a disposé aussi d'Ethers électrique, magnétique,... en plus de l'éther optique. Les théories modernes évitent le recours à ces milieux.

Incidence (angle d') angle formé par la normale à la surface et le rayon lumineux qui atteint cette surface. Voir Réfraction.

Indice voir Réfraction.

Réfraction Ce mot, qui semble apparaître au 16è siècle, indique l'idée de cassure : fraction, fracture, fragile (frag "able"). La même racine apparait dans Diffracter (mettre en pièces) ou Refringent (18ème siècle).

En optique, ce phénomène se manifeste par des effets optiques courants : un bâton plongé en partie dans l'eau semble coudé, un objet placé ssous l'eau semble plus proche de la surface qu'il n'est en réalité. Les mirages ou l'aplatissement du Soleil au coucher relèvent du même phénomène.
En optique géométrique on envisage la notion de rayon lumineux : la lumière se propage en ligne droite tant qu'elle reste dans un milieu homogène et isotrope (qui a les mêmes propriétés optiques en tout point et en chaque point dans toutes les directions : si l'on prend pour principe que la lumière se propage en ligne droite, est homogène et isotrope tout milieu où le principe est acceptable, valide).
Quand la lumière passe d'un milieu à un autre il arrive souvent que le principe de propagation rectiligne soit en échec. Le point d'impact sur la surface qui sépare les deux milieux est un point singulier, le rayon lumineux s'y brise, il est rectiligne avant et après mais avec des directions différentes. C'est le phénomène de réfraction, toujours accompagné d'un phénomène de réflexion, en général très faible, sur la surface.



i : angle d'incidence (in cadere)

r : angle de réfraction

D : angle de déviation

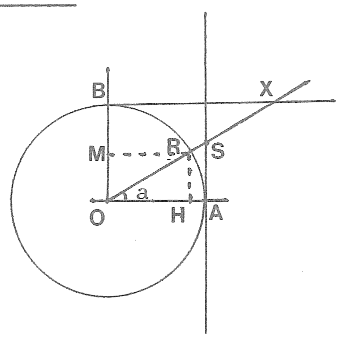
La "Loi des sinus" énonce que sin i = n sin r où n, indice de réfraction, est une constante qui dépend des deux milieux. Cette constante, d'abord "constatée" expérimentalement, est liée (au cours du 19ème siècle) à la vitesse de la lumière dans les deux milieux par $n = \frac{v(1)}{v(2)}$ où v(i) est la vitesse de la lumière dans le milieu (i).

Retour inverse si un rayon lumineux PO atteint la surface en O il se réfracte suivant OM comme OM se réfractait suivant OP.

Réfringent Cet adjectif n'a de sens qu'au comparatif. Un milieu, soit(2), est plus réfringent qu'un autre, soit(1), si le rayon lumineux dans (2) est moins écarté de la normale à la surface que dans (1). Lorsque le milieu (2) est plus réfrigent que le milieu (1) l'indice de réfraction (voir Réfraction) de (2) par rapport à (1) est supérieur à 1. Si l'on introduit l'indice absolu de réfraction des milieux, c'est-à-dire, par définition, l'indice du milieu par rapport au vide on a n = n(2) : n(1) où n(k) est l'indice absolu du milieu (k). Le produit n(k) . v(k) est une constante (voir Réfraction) et la loi des sinus exprime que le produit n(k) . sin i(k) est constant en notant i(k) l'angle entre la normale à la surface et le rayon lumineux dans le milieu (k).
Certains milieux, tel les spath d'Islande Ca CO_3, sont biréfringents c'est-à-dire que la lumière subit deux réfractions simultanées (à travers un tel cristal on voit le texte en double). En général l'une des réfractions suit la loi habituelle, l'autre, dite extraordinaire, s'explique par les propriétés ondulatoires de la lumière et est liée au phénomène de polarisation de la lumière. La biréfringence a été étudiée par Huygens dans son Traité de la lumière.

Sécante

La sécante de l'angle a, sec a, est la longueur OS.
Or OS : OR = OA : OH, ainsi, en prenant OR = OA = 1, on sec a = 1 : cos a.
De même la cosécante de a, cosec a, est la longueur OX et on obtient :
cosec a = 1 : sin a



Simulacre (c'est-à-dire Image)

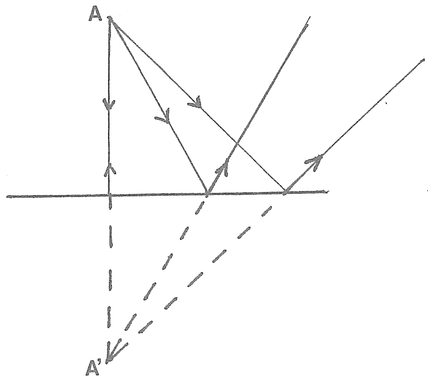
Jusqu'à l'époque d'Alhazen (11ème siècle) ceux qui considèrent que l'objet émet vers l'oeil n'envisagent pas une émission de lumière point par point, l'oeil et le cerveau recomposant l'image de l'objet. Ils considèrent que l'objet émet des formes globales (des fantômes si l'on accepte la caricature), ce sont ces "écorces" que l'on nomme parfois simulacres, eidolon en grec, species en latin.

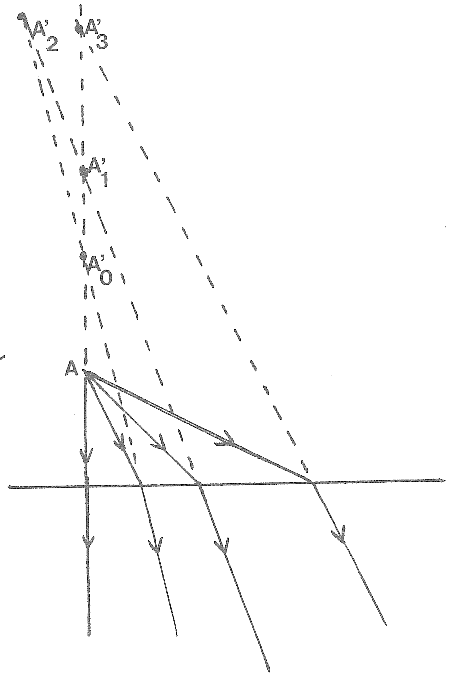
Sinus (loi des) voir Réfraction.

Signalons que le terme sinus n'apparaît qu'au dix-septième siècle. Descartes ne l'utilise pas en 1637, Cavalieri l'emploie dans une lettre, citée dans l'article, en 1644. Le sinus est alors une longueur définie encore par Lamy en 1685 comme demi-corde de l'arc double. L'idée d'utiliser le sinus au lieu de la corde vient de la trigonométrie arabe. Le sinus total est le rayon du cercle. Nous avons préféré depuis faire du sinus un rapport. L'emploi de cercles de grands rayons (10^5 ; 10^7) permettait d'obtenir beaucoup de "décimales" sans utiliser nos nombres décimaux dont l'emploi systématique ne fait que commencer à cette époque sous l'influence, entre autres, de Simon Stevin et de Neper.

Stigmatisme (19è siècle).

Du grec Stigma, piqûre (instigateur, distinguer, stigmate). Il y a stigmatisme en optique lorsque l'image d'un point est un point, c'est-à-dire lorsque les rayons lumineux issus d'un même point convergent vers un même point ou semblent en provenir. Dans le cas de la Réflexion il y stigmatisme, dans celui de la Réfraction il y a astygmatisme (a privatif), cependant lorsque les rayons incidents sont peu inclinés sur la normale il y a approximativement stigmatisme.





Synaugie platonicienne (du grec augé : lumière, rayon). C'est la conception d'une double activité de l'oeil et de l'objet. La rencontre des flux émis par l'objet et par l'oeil rend l'objet vu et l'oeil voyant.

BIBLIOGRAPHIE

Textes et Traductions :

ARCHIMEDE, L'Arénaire, dans Archimède tome II, Les Belles Lettres, Charles Mugler, 1971.

EUCLIDE, L'Optique et la Catoptrique, Librairie Scientifique Blanchard, 1959, Traduction, introduction et notes de Paul VER EECKE.

ALEMBERT d', Dictionnaire de Mathématiques, (Encyclopédie méthodique), 1784.

DESCARTES, Correspondance, Librairie Felix Alcan, 3 Tomes, 1936-41, Adam et Milhaud.

DESCARTES, La Dioptrique, dans Oeuvres de Descartes, La Pléiade, 1952.

FERMAT, Oeuvres, Tome III, Gauthiers Villars, 1896, Traduction Paul Tannery.

GALILEE, Discours concernant deux sciences nouvelles, Armand Colin, 1970, présentation, traduction et notes de M. Clavelin.

HUYGENS, Le Traité de la lumière, Gauthier Villars, "Les Maîtres de la pensée scientifique", 1920.

MERSENNE, Correspondance, Ed. C.N.R.S. Mme Paul Tannery.

NEWTON, Les Principes mathématiques de la Philosophie Naturelle, Librairie Scientifique Blanchard, 1966, Traduction de Mme la Marquise du Chastellet, commentaires de Clairaut.

Livres et articles :

CORTES PLA, El enigma de la luz, Kraft, Buenos Aires, 1949.

ITARD Jean, La réfraction chez Képler, Revue d'Histoire des Sciences, Tome X n° 1 ou 4, 1957, p. 59-67.

RASHED Roshdi, Le discours de la lumière - Alhazen, Revue d'histoire des sciences, Tome XXI, n° 3, 1968.

RONCHI Vasco, Histoire de la lumière, Bibliothèque générale de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, Armand Colin, 1956.

ROSMORDUC, L'idée d'une structure de la lumière dans l'histoire de la physique, Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, n° 2, 1977.

Ouvrages généraux :

Dictionary of Scientific Biography, Ed. Charles Scribner's sons, 1970,
Encyclopédie générale des Sciences, P.U.F.