

Notes de cours Séminaire LOPHISS. Vincent JULLIEN

Troisième partie. Optique

Idées et théories optiques, avant, pendant et après le XVII^e siècle

Bibliographie

- Bachelard, Suzanne, "Maupertuis et le principe de moindre action", in *Thales*, 1958, t.9, p.3-30.
- Biet-Jullien, *Le siècle de la lumière*, ENS éditions, Paris 1997 (avec une bibliographie assez complète).
- Blay, M. La conceptualisation newtoniennes des phénomènes de la couleur, Paris, Vrin, 1983.
- Blay M., *Lumières sur les couleurs*, Paris, Ellipses, 2001.
- Damerov
- D'Alembert, Article "Réflexion», *Encyclopédie méthodique*, rééd. ACL, Paris 1989, T.III
- Descartes, *Œuvres complètes*, Adam-Tannery (A.T.VI, 93-105), CNRS-Vrin, (1982-1991)
- Galilée, *Sidereus Nuncius*, trad. F. Hallyn, Paris, Seuil, 1992.
- Guérout, M. "Note sur le principe de moindre action chez Maupertuis", in *Dynamique et métaphysique leibniziennes*, Paris, Belles lettres, 1934, p.215.
- Hallyn, F., introduction au *Messenger des étoiles*,
- Hamou, Philippe, *La mutation du visible*, septentrion 1999, 2 vol.
- Huygens, C. *Traité de la lumière*, Leyde, 1690, rééd. par M. Blay, Paris, Dunod, 1992.
- Jullien V., *Philosophie naturelle et géométrie au XVII^e*, H. Champion, 2006, cf. 1^{ère} part., chap. 2, 3 et 5
- Koyré, A. "L'hypothèse et l'expérience chez Newton", in *Etudes newtonienne*, Gallimard, 1968.
- Leibniz, "De lineis opticis et alia", *Acta Eruditorum*, 1689, in *Naissance du calcul différentiel*, Paris, Vrin, 1989, p. 144-153. Voir la présentation qu'en fait M.Parmentier aux pages 147-149.
- Leibniz, "Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quæ nec fractas nec irrationales quantitates moratur et singulare pro illis calculi genus", *Acta Eruditorum*, 1684, id.96-117.
- Leibniz, "Pensées sur l'instauration d'une nouvelle physique", *Philosophie*, n°39, sept. 1993, p.7-26.
- Leibniz, "Unicum opticae, catoptricae et dioptricae principium", *Acta Eruditorum*, 1682, traduction de S.Bachelard, in *Thales*, 1958, t.9.
- Leibniz, Couturat, *Leibniz, opuscules et fragments inédits*, Paris, Alcan, 1903.
- Leibniz, *De ipsa natura*, P.S. IV, p.506.
- Leibniz, *Discours de métaphysique*, § XXII
- Leibniz N.E., 1704, Paris, G.F., 1966.
- Leibniz, *œuvres*, édité par Lucy Prenant, Paris, Aubier, 1972, p.125
- Leibniz, *Tentamen anagogicum ou*, 1697, P.S. t.VII, p.270-279.
- Newton, *Opticks*, Les citations que je fais de l'*Opticks* le seront à partir du *Traité d'optique*, traduction française de M. Coste, sur la seconde Edition Anglaise, Seconde édition française, Paris, Montalant, 1722.
- Newton, *Principia*, Edition par Florian Cajori de la trad. anglaise par Andrew Motte, Berkeley, 1960.
- Panza M., *Newton*, Paris, Belles Lettres, 2003.
- Redondi P., *Galilée Hérétique*, trad. Française, Paris Gallimard 1985.
- Ronchi, Vasco, *Histoire de la lumière*, trad. Française de J. Taton, Paris, A. Colin, 1956.
- Sabra, A.I., *Theories of Light from Descartes to Newton* (1967), Cambridge University Press, 1981.
- Schrecker, P. "Notes sur l'évolution du principe de moindre action", *Isis*, n°89, sept. 1941, p. 329-330.

Siguret, F. *L'œil surpris*, Paris, Klincksieck, 1993.

Simon, G., *Le regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'antiquité*, Paris Seuil, 1988.

Trouessart J., *Recherches sur quelques phénomènes de la vision*, 1854, Thèse Physique, Brest. (disponible en ligne)

Villain C., "Le modèle mécaniste de la réfraction", *Revue d'Histoire des Sciences*, t. XL-1987 (311-323)

Conceptions antiques

Dans l'antiquité, on a deux grandes conceptions de la vision (*cf.* détails mon livre, p.127 et les pages 247-250 de l'*HGS*, t. 1, par Ch. Mugler):

1. L'émission, à partir de l'œil, d'un cône de rayons visuels allant, si l'on peut dire, « palper » les objets (Archytas, Euclide, Ptolémée) ; le cône visuel.

Selon les théories *extromissionistes*, c'est de l'œil que part un flux ou rayon visuel qui vient rencontrer les choses vues ; cette conception a été proposée par des pythagoriciens (on cite souvent Archytas de Tarente) et aussi reprise par certains des plus grands noms de la Grèce alexandrine, Euclide, Hipparque et Ptolémée et, à la renaissance, Bramante. C'est une théorie parfois appelée des *effluves*.

2. La réception dans l'œil des rayons lumineux provoquant la sensation. (Les atomistes Démocrite, jusqu'à Lucrèce).

Les *Eidola* (idoles). Si nous voyons les choses, c'est –selon les théories *intromissionistes*- parce que, d'elles, émanent des flux, des images, des copies (selon les atomistes, ce sont des particules, des grains), qui viennent jusqu'à nos yeux. Sans tenir compte des variantes on reconnaîtra ici l'enseignement des atomistes de l'antiquité et des débuts de notre ère : de Leucippe, Epicure, Démocrite et Lucrèce. Le vocabulaire traditionnel : *ombres, simulacres, écorces*

3. Il y a aussi des théories mixtes (Chez Platon ou Aristote).

La doctrine du double flux, l'un provenant de la chose vue et l'autre de l'œil, est attribuée à Platon. On la rencontre aussi chez Empédocle pour lequel la sensation visuelle s'explique par la rencontre des effluves émanant à la fois des objets et de l'œil, ces effluves constituant la lumière¹.

Platon pour lequel ce sont des tétraèdres *cf Timée 67c-68^e* ; *cf* aussi 45b sq et 64d). Platon décrit le phénomène de *synaugie* ou fusion des deux émanations de sens contraire en un seul corps, le " corps de la vision ". « Les particules qui proviennent des autres corps entrent en collision avec le rayon visuel »(*Timée, 67e.* trad. Brisson) Pas d'études des phénomènes optiques.

Timée, 45c

« Quand donc la lumière du jour entoure le flux issu des yeux, alors, le feu intérieur qui s'échappe, le semblable allant vers le semblable, après s'être combiné avec la lumière du jour se constitue en un seul corps ayant les mêmes propriétés tout le long de la droite issue des yeux, quel que soit l'endroit où le feu qui jaillit de l'intérieur entre en contact avec le feu qui provient des objets extérieurs. Il se forme ainsi un tout qui a des propriétés uniforme en raison de son homogénéité ; si ce tout vient à entrer en contact avec quoi que se soit ou si quoi que se soit d'autre entre en contact avec lui, il en transmet les mouvements à travers tout le corps jusqu'à l'âme et nous procure cette sensation grâce à laquelle précisément, nous disons que « nous voyons » (trad. Brisson, GF)

On appelle ceci la *synaugie platonicienne*.

Pour Aristote le texte d'exposition est *De l'âme*, livre II, chap. 7 (418a- 419b).

¹ Léon Robin, (1923), p. 131-132.

« L'objet de la vue, c'est le visible. Or le visible est, en premier lieu, la couleur [...] Toute couleur a en elle le pouvoir de mettre en mouvement le diaphane en acte, et ce pouvoir constitue sa nature. » (remarque, ceci fait dire à Tricot que « la lumière est elle-même le diaphane en acte », n.2, p.106 ; il y aurait une lumière-substance, ce qui n'est pas l'interprétation dominante)

La lumière, comme diaphane actualisé, (« entéléchie du diaphane », (419 a10)) est bien une condition nécessaire à la vision, mais elle n'est pas visible par soi et, n'est donc pas, au propre, objet de la vision ; on ne voit pas la lumière. (cf. détails mon livre, p.128).

Pour rendre compte de la vision, Aristote pose clairement la question de la nature de la lumière : « ainsi est-ce la lumière dont il faut d'abord expliquer la nature » (*De anima*, II, 7, 418 b2). On apprendra ainsi qu'elle est une forme actualisant le diaphane, elle est le contraire de la forme privative correspondante, à savoir l'obscurité. Il en découle qu'elle n'est ni une substance, ni un corps, ni un effluve, mais la présence d'une certaine disposition à laquelle aspire le diaphane. C'est la thèse de la lumière *accident*.

Il y a donc du diaphane. Et par Diaphane ce qui, bien que visible, n'est pas visible par soi (un substrat). La lumière est l'acte de cette substance, du diaphane en tant que diaphane.

La lumière est une forme, celle du diaphane coloré (*en entéléchie*).

La lumière n'est ni feu, ni en général un corps, ni un effluve d'aucun corps, mais elle est, en réalité, la présence du feu ou de quelque chose de ce genre, dans le diaphane.

La lumière est donc une modification qualitative du milieu commun à l'émetteur (le foyer générateur) et au sujet percevant.

“ La lumière est l'action du milieu transparent quand il a reçu une impulsion par le feu ou par un élément tel que celui de la région supérieure ” (De l'âme, 418 b 9).

Elle se propage instantanément.

On retrouve une application de la doctrine de la sensation d'Aristote où des objets externes envoient dans les sens des *espèces impresses*, matérielles et sensibles qui leur ressemblent et l'intellect agent les transforme en *espèce intelligibles*. Ce sont les fameuses 'espèces intentionnelles' qui travaillent tant l'imagination des philosophes comme l'écrivait Descartes.

Aristote prend en compte la réflexion (*météorologiques* 373b, 16 et 375b 34 sq. (Arc en ciel) dont l'explication est résumée in *HGS I*, p.248)

Pour les tenants de l'une ou l'autre doctrine, l'objet de l'optique est la sensation, la vision (ou pour Aristote la théorie des couleurs) :

A vrai dire, il ne semble pas que les philosophes grecs se soient posé nettement le problème de la lumière. Ils se préoccupaient avant tout de résoudre le problème de la vision².(Ronchi)

La préoccupation majeure, voire unique concerne l'évaluation des rapports entre les objets vus et la perception que nous en avons ; plus précisément, la question générale examinée par les anciens est celle de la confiance que l'on doit faire à la vue.

Dans le second livre du *traité des sensations*, Théophraste, successeur d'Aristote considère principalement encore les couleurs comme objets de la vision, mais aussi, « motion, distance and size are visual objects (of sight) » (cité par Veltman, p.6) ; la liste des objets de la vision s'allonge chez Ptolémée qui indique « body, magnitude, colour, shape, position, movement and the rest » (Veltman,

²Vasco Ronchi (1956), *Histoire de la lumière* (242), p. 3.

p.7), elle atteint vingt et une choses chez Némèse³. Enfin, étudiant Ptolémée, Alhazen y trouve une liste de vingt deux objets de la vision, « light, colour, distance, position, body, figure, magnitude, continuity, discreteness, separateness, number, motion, rest, roughness, lightness, transparency, thickness, shadow, obscurity, beauty, ugliness, similarity » (Valtman, p.8)

Toutefois, la connaissance de la vision a aussi embrassé des savoirs concernant la science démonstrative et la philosophie naturelle au travers l'astronomie et la géométrie. Ce sont d'ailleurs ces parties « saines » comme dirait Duhem, qui ont « traversé les siècles », même si elles n'étaient pas au cœur des conceptions principales lors de leur élaboration.

Les débuts de l'Optique géométrique.

(voir *Histoire Générale des Sciences*, I, 349, par Jean Itard).

Traité connus :

L'Optique d'Euclide (connu par Théon d'Alexandrie, puis par le commentaire d'Al Kindi au IXe siècle, *La Catoptrique* de Héron d'Alexandrie, *l'Optique* de Ptolémée.

Euclide (IV av. J.C.): théorie des rayons visuels. Ce sera la base de toutes les études géométriques de la vision jusqu'au Xe siècle. Le cône ayant son sommet dans l'œil (postulat II : *La figure circonscrite par les rayons visuels est un cône qui a son sommet dans l'œil et sa base aux limites de ce qui est vu*).

La théorie euclidienne du *feu visuel* ou, si l'on préfère, de *l'extromission*, comme théorie de la perception, a toutefois une place modeste dans son traité d'optique qui ne s'en ressent pour ainsi dire pas. Sur les 57 théorèmes du traité euclidien, seulement quatre concernent la perception visuelle et ils sont traités à part ; ce qui occupe l'essentiel est le traitement géométrique des « rayons visuels ». (cf détails in Blay, RHS., p.121)

Sa façon de traiter géométriquement des rayons visuels correspond particulièrement bien à la définition que donne Héron d'Alexandrie :

Optics does not deal with physical questions and does not study whether given rays flowing out from the eyes go forth to the boundaries of objects or whether images that are detached go from corporal objects [and] enter the eye along a rectilinear path or whether the intervening air is stretched or contracted by the ray-like pneuma from the eye. It is only concerned whether, at each reception (of an image) the right direction of movement or tension is maintained as well as the requirement that the convergence to a point occurs at an angle when objects are seen that are larger or smaller than the eye. (Cité in Valtman, p.3)

Ptolémée (II ap. J.C.). Traité traduit en arabe, puis en latin au XIIe par Eugène, Emir de Sicile, en français en 1956 (détail Blay, p.122). La forme sans doute la plus accomplie de l'optique géométrique, fondée sur la théorie de l'extromission. On a cependant la thèse qui « explique comment le feu visuel et la lumière s'associent et sont assimilés l'un à l'autre... » (premier livre). On y traite des objets visibles, puis des réflexions, des miroirs convexes et concaves, des réfractions. Un domaine visé par l'optique de Ptolémée est évidemment l'astronomie.

Prise en compte de la réfraction atmosphérique et des corrections qu'elle nécessite. Il donne des tableaux empiriques des déviations : air-eau ; air-verre ; eau-verre.

Ptolémée fait de l'optique un moyen valide pour rendre compte des phénomènes célestes. On le sait, c'est surtout une *optique angulaire* dans la mesure où le cosmos et les mouvements planétaires sont exposés « à une homothétie près » (cf détails in Blay, RHS., p.122-123)

³ Vision operates along straight lines and in the first place perceives colours. Along with colour, it recognizes the body so coloured, its size, its shape, relative position and distance away, together with the number of its parts, whether it is in motion or still, whether it is rough or smooth, even or uneven, sharp or blunt; as well as its constitution, whether say, it is watery or earthy, moist or dry" (Valtman, p.7)

La tâche de l'optique consiste pour une large part à déterminer des critères et des indicateurs permettant de surmonter la défiance qui est de mise envers les données sensibles afin de faire des images perçues et correctement interprétées, des témoins fiables. C'est l'interprétation de ces paramètres qui servira de fondement à la transformation de ce que l'on doit entendre par le terme *Optique* lui-même. K.H. Valtman introduit son second volume sur Léonard de Vinci par ces simples et indéniables formules :

The modern term, optics, closely resembles the Greek optike. However, that is about as far as the resemblance goes. In Antiquity optics was chiefly a study of sight: today it is primarily concerned with the physics of light. In Euclid's time optics was chiefly subjective: today it ranks among the most objective and quantitative of the physical sciences. (Valtman Léonardo, II, Introd.)

CHANGEMENT DE PROGRAMME AU MOYEN-AGE

Le grand tournant vers l'optique comme science de la lumière : deux auteurs sont sans doute décisifs dans la réalisation de cette transformation, c'est Ibn Sahl (seconde moitié X^e siècle) et Ibn al-Haytham (dit Alhazen 965-1040). Les travaux récents de Rosdi Rashed ont apporté des enseignements décisifs sur cet épisode. (cf. Blay, RHS., p.123 sq.)

La prise de conscience de ce changement de programme est nette chez le principal opticien de la scolastique arabe, Alhazen.

Il n'abandonne pas l'étude de la perception, de la question de la vérité associée à la vision. Cette question *qu'est-ce qui est vraiment là, au delà de la tromperie des apparences visuelles ?* est bien présente ; toutefois sa réponse consiste à découvrir et à mettre au point une science rationnelle et expérimentale qui permet de *faire parler vrai les images des choses vues*.

Deux choses vont devoir être analysées pour cela : la lumière et l'œil : dès le livre I, il souligne que l'agent physique de la perception n'est plus le « rayon visuel » mais la lumière, issue d'une source lumineuse, et pénétrant dans l'œil. Cette nouvelle interprétation de la vision (avec nombreuses expériences en chambre noire) commande l'étude de la lumière (les couleurs notamment) et de l'œil.

Avec Alhazen, la controverse de l'intromission et de l'extromission est pratiquement close puisqu'il établit de façon absolument convaincante la supériorité de la réception par l'œil d'informations issues des choses visibles, et assure, par là, la victoire des doctrines de l'intromission.

Un très simple et très remarquable argument est présenté par Alhazen pour la réception par l'œil : un objet éclairé est vu par un œil dans l'obscurité alors qu'un objet dans l'obscurité ne l'est pas par un œil « éclairé ».

Le phénomène de réfraction, qui va être examiné dans la suite est étudié depuis l'antiquité. Présentant l'*Optique* de Claude Ptolémée, l'émir Eugène de Sicile qui l'a traduite écrit :

Au cinquième livre, ...Ptolémée parle des réfractions des rayons visuels qui se produisent toujours à angle inégaux et des images qui en résultent lorsque s'interposent entre l'œil et les objets deux milieux différents dont l'un est plus dense que l'autre. (Cité in Blay, p.123)

Comme tous les spécialistes de l'optique, depuis l'antiquité, il s'intéresse au phénomène de *réfraction* qui a pour effet de détourner un rayon de lumière quand il passe d'un milieu dans un autre, comme de l'air dans l'eau par exemple, ce qui nous fait voir un bâton *brisé* quand on le plonge partiellement dans un seau d'eau. Il confirme qu'il existe un rapport constant qui est en relation avec les angles d'incidence et de réfraction, mais ne parvient pas, cependant à donner la « bonne » loi. A cette occasion, Ibn al-Haytham affirme que « les lumières se propagent dans un mouvement très rapide, inappréciable à cause de sa rapidité », devinant ainsi et contrairement à l'idée générale, que la propagation de la lumière n'est pas instantanée, ce qui sera expérimentalement montré au XVII^e siècle par Römer.

Les expériences. Avec Alhazen, et après lui, une voie essentielle des développements de l'optique sera expérimentale. Chambres noires, sphère transparente, lentilles, miroirs (plans et concaves) etc. La lumière devient non seulement un objet d'école, mais aussi de laboratoire.

L'œil n'est évidemment pas absent des études d'Alhazen, bien au contraire, mais il l'étudie comme un instrument optique, une *camera obscura* extrêmement raffinée. Il a fait progresser considérablement nos connaissances sur l'anatomie de l'œil. Il décrit avec précision de rôle de la cornée, du cristallin et de la rétine.

Un prédécesseur d'Alhazen Ibn Sahl a peut-être découvert la « bonne » loi de la réfraction. Dans son *Livre sur les instruments ardents*, il suppose un rayon entrant dans un cristal (la surface de séparation étant plane) et trouve que la déviation respecte toujours un rapport constant ; surtout, il décrit ce rapport qu'il est possible d'interpréter comme celui des sinus des angles... C'est bel et bien ce qu'établira, au XVII^e siècle la fameuse *loi de Descartes-Snellius*. Mais, Alhazen n'a pas suivi Ibn Sahl sur ce point et son résultat est resté méconnu.

C'est comme "croyance des Anciens" que les doctrines des *species* ou des émanations par rayons visuels sont mentionnées dans le dictionnaire de Furetière.

Les voies par lesquelles l'optique d'Alhazen a déterminé les travaux latins sont plus ou moins bien connues. Le *Kitab al-Manazir*, écrit entre 1028 et 1038, fut traduit en latin vers 1200, l'ouvrage ayant pour titre d'édition *Opticae thesaurus Alhazeni Arabi libri VII* ⁴; l'œuvre est étudiée par Witelo au 13^e siècle, qui, dans son *Opticae* de 1270, en donne un exposé détaillé ; Roger Bacon est un des principaux introducteurs de l'optique d'Alhazen chez les latins, au travers de ses traités, la *perspectiva* et la *Multiplicatio specierum* (vers 1260-1265) ; Grande influence chez Dietrich de Freiberg, Jean de Murs et Jean de Boen, au début XIV^e, avec étude sur l'arc-en-ciel ; Biagio Pelicani da Parma s'en inspire dans son traité de 1390 ; John Pecham publie une *Perspectiva communis* qui est une version abrégée. Leonardo da Vinci doit lui aussi beaucoup au savant arabe, dont le traité est enfin publié en latin par Risner, en 1572, à Bâle, en même temps que le traité de Witelo. La jonction avec l'époque qui nous occupe est réalisée par les traités képlériens, le premier, *Ad Vitellionem Paralipomena* de 1604 à Francfort et le second, *Dioptrice* de 1611.

L'optique de Dietrich de Freiberg

Les savants du moyen-âge latin ont donné une très large place à l'étude de la lumière et l'on commence à savoir comment leur sont parvenus les textes et les commentaires arabes qui constituèrent la base et le point de départ de leurs connaissances. Six siècles avant Newton, deux évêques anglais se sont passionnés pour l'étude de la lumière, le franciscain Robert Grosseteste en 1235, évêque de Lincoln et John Packham, évêque de Cantorbery en 1279 ; celui-ci a diffusé l'œuvre d'Ibn al-Haytham. Un autre franciscain anglais, Roger Bacon (1219-1293), surnommé *Docteur admirable*, s'illustra en cette science. Il n'y eut pas que les anglais et le choix est vaste lorsqu'on souhaite évoquer des scolastiques latins entre les XII et XIV^e siècle qui firent des découvertes d'optique. Le dominicain Dietrich de Freiberg (1250-1320) est sans doute un des meilleurs candidats possibles. La lumière (lumière de Dieu, lumière naturelle) l'intéresse comme théologien, mais aussi comme physicien. Il explique que la lumière traverse les espaces, voyageant des cieux jusqu'à nous ; l'idée semble banale mais elle s'oppose à la séparation fondamentale qu'Aristote a établie entre le monde *supra lunaire* (au-delà de la sphère de la lune) et le monde *sublunaire* (en dessous de la lune). Dietrich était aussi géomètre ; il s'en souvient pour étudier, plus à fond que quiconque avant lui, le phénomène de l'arc-en-ciel. Suivant une idée qu'avait déjà envisagée Alhazen, mais surtout Bacon, il cherche comment se forment ses diverses couleurs. Le très sérieux dominicain multiplie les expériences et soigne ses mesures, par exemple

⁴ L'attribution de cette traduction à Gérard de Crémone n'est en réalité pas établie.

lorsqu'il illumine de nombreux verres d'eau de tailles différentes et disposés à des hauteurs variables. Il parvient à trois conclusions précises :

D'abord, l'arc principal (celui que l'on voit bien) résulte d'une réflexion du rayon dans le *fond* de chaque gouttelette d'eau associée à deux réfractions, une quand la lumière entre dans l'eau, l'autre quand elle sort. Deuxièmement, la formation des couleurs de l'arc-en-ciel dépend de la taille des gouttes : l'intervalle entre les plus petites et les plus grosses correspond au spectre des couleurs. Enfin, l'arc secondaire (celui qu'on voit mal) provient de deux réflexions en plus des deux réfractions (ceci expliquant l'inversion des couleurs).

Faire un schéma (ex . in Serres, p.390)

Certains historiens soutiennent que tous ces éléments autorisent à dire que Freiberg a découvert l'explication de l'arc-en-ciel. C'est possible quoiqu'un élément décisif fasse défaut à la théorie de Freiberg : pas plus lui que ses prédécesseurs ou ses contemporains n'a découvert la loi de la réfraction. Selon quelle *règle* le rayon entrant dans la goutte puis en sortant se *brise-t-il* ? Et pourquoi les couleurs sont-elles stables une fois formées ? Enfin, pourquoi ne se *brisent-elles pas* de la même façon ? Alhazen ne l'a pas découvert, Bacon, Freiberg, Vitellion non plus. L'argument selon lequel on ne saurait dire que l'arc-en-ciel est *découvert* tant que ceci ne sera pas élucidé, est plutôt convaincant.

L'âge classique.

L'optique médiévale et celle de l'âge classique, de Kepler, de Descartes, Huygens, Nicéron, Mersenne, Fermat, Leibniz, Hooke ou Newton, après Alhazen et Ibn Sahl, peut encore se préoccuper des sens et leurs compétences mais elle fait une large place à la connaissance d'un objet physique existant naturellement, même sans sujet percevant, à savoir la lumière.

L'optique « classique » sera donc à la fois une théorie de la perception et une théorie géométrique de la lumière, en tout cas chez Descartes : en plus d'être la science du chemin de la lumière, elle est une théorie de la sensation visuelle et du fonctionnement de l'œil. Le monde des corps matériels nous est donné en ceci qu'il est visible.

Dans son ouvrage *l'œil surpris* Françoise Siguret souligne les modifications de la langue, à propos de la lumière:

*A côté des mots familiers de vue, vision, regard, œil/yeux vont apparaître des mots à la fois savants et barbares de perspective, optique, dioptrique, catoptrique, anamorphose*⁵.

L'œil n'est bientôt plus étudié pour les mêmes fins:

*Lorsque, quelques années après le père Binet, en 1637, Descartes décrira l'œil dans le troisième discours de sa Dioptrique, ce sera, non plus pour servir à l'éloquence (c'est-à-dire comme moyen de situer l'homme face aux autres et aux choses) mais à l'étude scientifique de la réfraction*⁶.

C'est bien ce que vise Descartes en concluant le second discours de sa *Dioptrique*

*Et il est temps que je commence à vous décrire quelle est la structure de l'œil, afin de vous pouvoir faire entendre comment les rayons, qui entrent dedans, s'y disposent pour causer le sentiment de la vue*⁷.

Cette rupture, de la lumière, élément de la perception visuelle vers une lumière objectivée et séparée est délicate: elle se présente aussi bien comme une trame confuse de conceptions mêlées dont Galilée nous offre un bon exemple. Dans sa thèse *Galilée hérétique*, Pietro Redondi rend compte de cet état

⁵ F. Siguret, (1993), p. 15

⁶ F. Siguret, *ibid.*, p. 26

⁷ A.T. VI, p.105

de fait en indiquant que son projet de départ était une étude des idées de Galilée sur la nature de la lumière, projet qu'il dut abandonner étant donné l'*écheveau compact* auquel il s'était heurté.

PARALIPOMENA ET DIOPTRICE DE KEPLER

C'est décidément à Kepler qu'il revient de faire la transition entre les spéculations et les inspirations de la renaissance et le style mathématique de la physique nouvelle.

Voir le chapitre *La dioptrice de Kepler, in Hamou, « la mutation du visible », vol. 1, Septentrion, 1999.* Comme il en tînt en même temps pour une cosmologie quasi révélée (celle des cinq solides, voire peut-être celle de la loi des puissances sesquilatères des périodes planétaires) et une astronomie induite de lois expérimentales, il fut –avec ou après Alhazen- le fondateur de l'optique scientifique moderne, à partir de l'examen de propriétés réputées magiques et illusoire de la vision et des lentilles.

Une pratique opticienne foisonnante, d'expériences communes ou grossières est signalée au cours du XVI^e siècle. Elle concerne notamment les lentilles⁸. Le statut de ces verres taillés est ambigu puisqu'il s'agit d'un jeu favorisant les illusions ou, au mieux d'un instrument correctif utile mais dont la théorie n'est pas faite. Cet objet, d'où viendra un des plus rudes coups portés contre la science traditionnelle est irrationnel. En effet, ces lentilles ont un caractère fallacieux car elles déforment (grossissent, altèrent) la sensation naturelle. Elles trahissent le vrai rapport entre l'être humain et la nature. Elles ne peuvent donc pas être productrices de connaissance assurée et bien fondée en raison⁹. Les tubes grossissant sont en vogue : « ces tubes que l'on voit partout » écrit Kepler dans la *Dissertatio*.

En 1558, Della Porta avait publié sa *Magia naturalis*, qui devait connaître vingt trois éditions et de nombreuses traductions (dont une en arabe). Dans ce livre de jeux, de trucs et d'illusions à partir de la lumière et de l'optique (anamorphoses, stéganographies), un chapitre est consacré aux lentilles¹⁰. De cet outil frivole (la lentille), Kepler va faire un objet de laboratoire.

Les *Paralipomena ad Vitellionem* de 1604 de Kepler sont suivis, sept années plus tard, de la *Dioptrice* (1611, soit immédiatement après le *Sidereus nuncius*).

Le premier traité entame, puis développe la théorie des lentilles, de l'œil et du rayon lumineux, à partir du chapitre sus mentionné de la *Magia naturalis* de Della Porta. De multiples dispositifs y sont systématiquement examinés: les sphères d'eau, les écrans, les chambres noires, les réfractions, les diaphragmes etc. Mais surtout, il fait de l'optique une science naturelle (et plus une branche des mathématiques) : « on dérivera parfois ici de la géométrie vers la physique... » (*Paralipomènes...* in Hamou, p. 204)

On a pu dire que ce traité était la théorie de la *Camera obscura* (instrument notamment astronomique, pour les éclipses par exemple).

L'objectif annoncé de la *Dioptrice* (le mot est inventé par Kepler) est plus purement scientifique : net, court, sans commentaires généraux ni anecdotiques. Petit livre en 141 propositions serrées. Il cherche explicitement à rendre compte de la réfraction.

⁸ « Enfin, les lentilles pour lunettes sont entrées définitivement dans l'usage: les verres convexes, pour la correction de la presbytie, les verres concaves, pour celle de la myopie. Ces petits disques de verre transparents, apprêtés, confectionnés et vendus par de modestes artisans, complètement ignorants de toutes les élucubrations scientifiques et philosophiques, se multipliaient par milliers sous les yeux défiants des mathématiciens silencieux et sceptiques », Vasco Ronchi, (1956), p. 55.

⁹ « La lunette fait voir des figures plus grandes que les objets réels ou plus proches; elle les fait voir colorées et déformées, donc elle trompe et ne fait pas connaître la vérité. Donc elle ne peut être adoptée comme instrument d'observation ». Ainsi Vasco Ronchi décrit-il l'avis dominant des mathématiciens et philosophes au début du XVII^e siècle, in *op. cit.* p. 83.

¹⁰ « La *Magia naturalis* n'est pas un livre sérieux; c'est un recueil de plaisanteries, de jeux, de trucs, de magie. » *Id.* p. 57. Voir les excellentes informations sur la *Magiae naturalis* in Siguret, (1993), p. 180 *sqtes*.

« Puisque Euclide a créé une partie de l'optique, la catoptrique qui traite du rayon réfléchi en empruntant le nom des principaux instruments produisant ce genre d'effet (catoptre, mot latin pour miroir) [...], j'ai baptisé mon petit livre dioptrique puisqu'il traite essentiellement des rayons réfractés dans des milieux denses transparents...l'œil humain comme les verres artificiels [...] »¹¹

Peu de commentaires philosophiques et il ne cherche pas les *causes*, du moins les « vraies causes physiques » et donc « philosophiques ». Il veut toutefois produire une théorie de l'instrument galiléen et emploie même le terme de cause pour des démonstrations géométriques.

« Le télescope s'est ajouté ces dernières années à la grande masse des inventions du siècle, mais on ne doit pas le compter au rang des instruments ordinaires ...Galilée aura célébré le plus beau triomphe en rendant manifeste l'usage de l'instrument pour l'investigation des secrets de l'astronomie [...]Moi-même j'ai, porté par une ambition honorable, ouvert un nouveau champ aux mathématiciens pour l'exercice de leur intelligence en démontrant par des lois géométriques, les causes sur lesquelles reposent ces effets si ardemment désirés, si nombreux et d'une merveilleuse variété »¹².

Commentaires sur la puissance causale de la géométrie chez Kepler (platonisme et renvoi au *Mysterium cosmographicum*).

Des principes ou axiomes physiques sont posés comme compléments de cette géométrisation (aptitude à avancer à l'infini, trajet rectiligne, vitesse infinie...), ce point est évidemment d'importance puisqu'il étend l'optique vers la science physique.

Il renonce à chercher les explications de la réfraction dans l'analyse physique du comportement de la lumière. Pour la réfraction, il choisit une « axiomatique optique » érigée sur des énoncés empiriquement établis :

inclinaison vers la perpendiculaire

existence d'un « indice » dépendant des densités des milieux.

quasi proportion des angles et des densité pour angle d'incidence inférieur à 30°.

Dans la préface, il fait de l'optique une discipline essentielle de la philosophie (cf. Descartes et le *Traité du Monde*).

Un argument précis : depuis l'antiquité, l'astronomie et l'optique firent route ensemble (nombreuses raisons). Or, depuis le XVI^e siècle, les choses n'allèrent plus bien : notamment, le diamètre de la lune était très différent selon qu'il était mesuré directement ou via la *camera obscura* lors des éclipses (détail in Hamou, p.234). D'autres anomalies existaient que la lunette accroissait. Un des buts de Kepler est de rétablir, par une théorie rationnelle de l'optique, l'harmonie entre optique et système du monde.

La mathématisation de la lumière, via son idéalisation géométrique sous la forme du rayon, est poursuivie et menée à un niveau encore jamais atteint dans la *Dioptrique* de 1611. La théorie du télescope, ou de la lunette à oculaire convergent, y est exposée. On peut dire que c'est un traité sur les lentilles ou, si on préfère sur le télescope, ou encore sur les anaclastiques. Kepler donne d'ailleurs les plans d'un télescope (à oculaire convexe et qui s'imposera) différent du galiléen.

Kepler détermine la place du point focal d'une lentille convergente (§34 à 37). Il cherche aussi des applications (télescopes mais aussi correction de la vue). Il approche la compréhension de la presbytie et de la myopie.

¹¹ *Dioptrice*, dédicace.

¹² *Dioptrice*, Dédicace, Trad . Hamou, p.195

On a presque toute la théorie des plans focaux, des grossissements, du rôle de la rétine etc., sauf la loi exacte.

Pour Kepler, l'image agrandie n'est pas objective, l'*image virtuelle*, ou *image géométrique* n'a pas de réalité autre que celle d'un *être de raison*. Son statut est celui d'une fiction (une *deceptio visus*, une tromperie de la vision, une imagination). S'il n'y avait pas d'œil pour la voir, elle n'existerait pas ; ce qui sera renversé par les théories ultérieures (Barrow notamment). On distingue en optique moderne les « images réelles » des « images virtuelles » de façon pratiquement simple : si une image peut apparaître sur un écran mis à la bonne place, elle est « réelle » ou « objective », sinon, elle est virtuelle. Exemple : l'image dans un miroir n'apparaît pas sur un écran, elle est virtuelle. L'image, sortant d'un projecteur est « réelle ». Est-ce à dire que l'image virtuelle n'existe pas ? ou n'est que pure produit psychologique ? Non car elle a des « propriétés physico géométriques » précises : elle est à une place précise (ainsi dans le miroir elle est à distance symétrique etc.), elle a des couleurs etc.

La réfraction est, dit Kepler « une erreur des facultés qui concourent à la vision » (Hamou, p.214)

La nature ultime de la lumière n'est pas établie: "*Le rayon de lumière n'est pas la lumière elle-même qui se propage*", note par exemple Kepler¹³. Cette attitude *en retrait* est conforme à l'ignorance dans laquelle Kepler estime demeurer au sujet du rapport physique lumière-vision :

*Comment cette image ou cette peinture se lie aux esprits visuels qui résident dans la rétine et dans le nerf [...] cela, dis-je, je laisse aux physiciens le soin d'en décider*¹⁴.

Il lui arrive de mobiliser la théorie du double flux pour rendre compte de la perception en quelque sorte visuelle, par l'âme *de la terre* des phénomènes astrologiques ; il l'explique « par la rencontre des rayons psychiques issus de l'âme et des rayons lumineux émanés des corps célestes »¹⁵, mais, c'est pour mieux avouer qu'il erre en ce qui concerne la nature de l'action de la lumière dans le processus visuel:

*J'avoue franchement quant à moi que la vision m'embarrasse plus que la perception [par l'âme de la terre] de l'angle des rayons : car il me semble sur la seconde pouvoir balbutier quelque chose de pas trop inepte, alors que sur la première, je reste tout à fait muet.*¹⁶

Encore une citation sur la lumière képlérienne

*« Même si la lumière est une sorte de réalité intermédiaire (géométrique comme le corps mais sans matière pondérale, vivante et spirituelle comme la flamme primordiale) n'affectant les corps que dans deux dimensions (le rayon ne change pas de plan), elle est conçue comme une réalité physique indépendant produisant des effets sans que le regard d'un voyant n'y soit pour rien »*¹⁷.

La lumière de l'optique képlérienne n'est donc pas une lumière d'Ecole, au sens ou j'ai employé ce mot, bien qu'en un sens elle le soit 'en négatif' puisqu'elle se conforme difficilement avec les anciennes doctrines ; mais elle n'est pas donnée selon sa nature, son ultime vérité philosophique.

Au total, on assiste à la présentation rationnelle des effets et instruments optiques, sans la loi qui rend compte du trajet de la lumière dans les lentilles.

Hamou note ceci :

« Kepler veut montrer que le télescope est un instrument optiquement légitime...La Dioptrice donne déjà une intelligibilité de l'instrument qui est incomparable avec celle que Galilée par exemple était en mesure d'offrir (p.229).

¹³ Kepler (1611), proposition VIII, Livre I

¹⁴ Kepler, (1604), t.II, p.151, cité par G. Simon, *id.* p.109.

¹⁵ G. Simon, *id.* p.111.

¹⁶ Kepler, *Harmonice mundi*, livre IV, 7, G.W. VI, p.274, cité par Simon, *id.* p.111.

¹⁷ G. Simon, *Structure de pensée et objets du savoir chez Kepler*, cité in Hamou, p. 196.

« La Dioptrice prouve géométriquement que deux lentilles jointes ensemble et disposées proprement devant l'œil sont capables de produire une image rétinienne distincte au fond de l'œil exactement au même titre que l'œil lui-même dans l'exercice de la vision naturelle (l'œil est un appareil optique). Quand à l'impression de grossissement, [...] elle est rapportée à des principes euclidiens universellement reçus et trouve donc par là une légitimation suffisante. En ce double sens, l'instrument ne peut plus être tenu pour producteur d'une vision dénaturée ou illusoire, et c'est là l'acquis majeur de l'ouvrage » (p.230)

De l'optique de Galilée, nous retiendrons qu'elle n'est pas non plus une doctrine d'école. Dans une lettre du 23 juin 1640, il reconnaît qu'en ce qui concerne l'essence de la lumière, il a toujours été dans les ténèbres. Une théorie optique - au sens de conception générale de l'essence de la lumière et de la vision - est effectivement repérable chez Galilée, mais elle est floue, ancienne, stérile, contradictoire. Ainsi, dans le *Sidereus Nuncius*, on rencontre des rayons visuels sortant de l'œil et se dirigeant vers l'objet¹⁸. L'antique théorie des espèces visibles, émanant des objets serait-elle un fondement possible pour la lunette astronomique? La raison nous a montré combien ceci était contradictoire mais elle n'a toutefois pas arrêté Galilée, qui défend les mêmes "espèces visibles" dans son *Saggiatore*. En résumé, remarque F. Hallyn,

*"alternant les langages de différentes théories existantes - dont Kepler souligne, dans sa Conversation avec le Messenger des étoiles, qu'aucune ne peut réellement expliquer l'action de la lunette - Galilée semble bien ne pas avoir eu de théorie propre"*¹⁹.

La raison n'est pas tout à fait au rendez-vous et l'auteur ne l'ignore pas puisque, si le *Sidereus Nuncius* annonce "Nous publierons à une autre occasion la théorie complète de cet instrument"²⁰, rien de tel n'est jamais venu.

Il y a plus, ou pire! Non seulement Galilée ne dispose pas de théorie générale de la lumière, mais encore, il néglige les raisons mathématiques et géométriques de l'appareil révolutionnaire qu'il utilise²¹. On peut d'ailleurs penser que c'est la *Magia naturalis* de Della Porta qui a guidé les pas de Galilée dans la mise au point de l'appareil. Cette radicale limitation n'interdit pas à la doctrine galiléenne de porter loin et de réformer en profondeur puisque, grâce à lui, la lumière et ses attributs peuvent être intégrés dans les dispositifs et procédures en vue de la connaissance des lois de la nature.

*Galilée fait bien plus que simplement améliorer la lunette. Il la sort de la réserve des phénomènes merveilleux, des exceptions placées à côté ou au-dessus de la science dite "normale", qui s'occupe du général. Il prétend au moins pouvoir l'expliquer par des lois générales, engageant ainsi sa foi en la possibilité d'une telle explication, et il l'applique effectivement à l'étude de la constitution générale du monde [...] Galilée intègre, en somme, la lunette au mode de la science, de manière à la fois prospective (en tant que problème théorique) et provocante (en tant qu'instrument pratique).*²²

On observera donc que ce n'est pas l'école qui détruit l'école. Cette manière presque fortuite, qu'ont ces instruments optiques d'entrer dans la trousse du philosophe-savant fait écrire à Descartes "qu'à la honte de nos sciences, cette invention n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune"²³.

¹⁸L'éditeur de Galilée, F. Hallyn signale à ce propos, la publication et la défense, en 1604 de *L'optique et catoptrique* d'Euclide, par Jean Pena, œuvre qui pu servir à Galilée. Voir sur ce point l'introduction au *Messenger des étoiles*, Paris, Seuil, 1993, p. 43.

¹⁹F. Hallyn, introduction au *Messenger des étoiles*, op. cit. p. 43.

²⁰Galilée, *Sidereus Nuncius, Opere*, t.III, p. 62, trad. F. Hallyn, Paris, Seuil, 1992.

²¹"Tout en déclarant que l'étude de la réfraction relève des mathématiques, Galilée se garde bien d'étudier la question à fond sous cet aspect-là...Tout indique donc que la prétention du *Messenger des étoiles* est, en somme, un acte rhétorique qui dissimule un manque", F. Hallyn, op. cit., p. 44.

²²F. Hallyn, op. cit., p. 45.

²³Descartes, *Dioptrique*, A.T.VI, p. 81-82.

RESISTANCES

On a pu soutenir que c'est du côté des scolastiques que sont avancés les arguments les plus fondés en raison: ils révoquent la lunette astronomique comme instrument qui la trompe. C'est toute la philosophie de la connaissance qui doit être remise en cause pour que la raison change de camp. Les modernes accumulent les succès, en reculant, c'est-à-dire en remettant en cause les raisons générales des anciens, non pas au nom d'une raison générale bien constituée, mais en insistant sur l'efficacité de leurs méthodes nouvelles (géométriques et expérimentales) plus que sur leur rationalité : ainsi, grâce à la lunette, est-il possible de prévoir mieux les mouvements dans le ciel, de proposer une organisation du cosmos plus conforme aux phénomènes.

Nous avons vu qu'au sein même des œuvres qui renouvellent la science de la lumière, les écoles anciennes peuvent persister ou même dominer. Quel genre de résistance offrent-elles? Une résistance ontologique en soutenant d'abord que la lumière ne peut pas échapper à l'alternative aristotélicienne des modes de l'être. Est-elle substance, comme semblent le penser des modernes, est-elle accident, modification qualitative? Il y a plus qu'une nuance entre la doctrine de la lumière, forme du substrat diaphane du *De anima* et la lumière accidentelle et c'est bien plutôt cette dernière conception qui est de mise dans les traités médiévaux. Vitellion, par exemple rapporte la lumière à une qualité de la substance illuminée, qui se comprend dans l'analyse de la vision lorsqu'il écrit :

*La faculté sensorielle ultime, qui est dans le nerf commun, comprend la lumière à partir de l'illumination de cette matière du nerf, et la couleur à partir de sa coloration, puisque leurs formes se propagent et viennent se fixer en lui.*²⁴

Ce cadre ontologique fournira en fait la meilleure position de résistance de la scolastique. Les arguments "de laboratoire" viendront longtemps s'échouer en vain contre ce barrage. Si on accepte cette alternative, il faut bien avouer que la substantialité est difficile à accorder à la lumière car il faut l'entendre comme une substance très particulière, dotée d'attributs tous plus difficilement concevables les uns que les autres: subtilité, divisibilité, perméabilité, vitesse quasi infinies.

La lumière accidentelle est certes bien difficile à tenir, mais au fond, puisque la solution alternative est si peu concevable, il faut bien qu'il en soit ainsi. D'autant plus que la tradition aristotélicienne pèse de ce côté. Bref, accepter la division ontologique de l'être, c'est accepter la grande probabilité de la thèse qualitative et accidentelle.

Francesco Sizi de Pise est un représentant dogmatique de la tradition. En ce sens que sa conviction de la validité des thèses scolastiques est telle que les arguments issus du laboratoire sont sans force à ses yeux.

Lorsque Sizi publie, en 1610 la *Dianoia astronomica, ottica e fisica*, il s'agit de réfuter l'apparition des satellites de Jupiter qui constituent un argument-massue contre la perfection du monde supra-lunaire. Ces satellites sont "apparus" et sont "visibles" dans la lunette. L'optique traditionnelle lui fournit maints arguments pour faire de ces observations, de ces faits de laboratoire, des illusions, des erreurs, des images mal interprétées (reflets de tâches dues à l'ombre portée du soleil etc.) et produites par le télescope. Certes, des arguments "irrationnels" relevant de la mystique cosmico-numérologique sont aussi avancés par Sizi, mais il démontre *en toute rigueur*, et en se référant aux principales autorités en matière d'optique (Alhazen, Bacon, Vitellion, Kepler) que ces prétendus satellites sont des apparences semblables aux parhélies²⁵. Ainsi, résume Ronchi:

²⁴ *Opticae Thesaurus, Vitellionis thuringopoloni Opticae libri decem*, livre III, §20,p.94. Cité par G. Simon, (1997), p.110.

²⁵On doit prendre au sérieux toutes ces objections: la mystique cosmico-numérologique a aussi alimenté la pensée képlérienne et on a vu, un peu plus tard, Galilée opposer à Kepler un refus a priori du même type de faits d'observation: « Si, en un premier temps, certains essayent de réduire les satellites de Jupiter à l'état d'illusions produites par le télescope, il vaut la peine de rappeler que Galilée aura recours à une tentative semblable quelques années plus tard, en 1618, à propos de l'apparition des comètes ». Fernand Hallyn, (1992), p. 78.

...il y avait bien peu à objecter contre tant d'arguments. Il n'y avait qu'une manière de répondre à tant de science: le raisonnement est parfait, les conclusions sont parfaites; mais la vérité, c'est que la lunette a raison²⁶.

L'Œuvre admirable du père Grimaldi (1618-1663) est une illustration intelligente et lucide de l'examen des raisons en présence. Son traité *Physico-mathesis de lumine, coloribus et irride* paraît tardivement (en 1665) à Bologne²⁷. Le premier livre rassemble bien des arguments en faveur de la substantialité de la lumière. Le second, plus court, examine ce qui prêche pour l'accidentalisme. Chez lui, la lumière est de laboratoire et la difficulté à conclure est une question d'école. Les succès des travaux expérimentaux ne gommant pas la légitimité du problème de la nature de la lumière, bien qu'ils ne permettent pas de la résoudre. L'existence de la lumière est connue de tous ceux qui ne sont pas aveugles mais sa nature et sa consistance "*naturam et quiditatem*" restent un grand mystère.

Le ton, polémique, est rugueux contre les philosophes qui ne font que de grands discours :

Nous somme sincères, nous ne savons pas quelle est la nature de la lumière, et s'en tirer avec de grands mots vides de sens est une imposture [...] Toutefois, je ne crois pas que l'on doive qualifier de téméraire celui qui tente de telles études ²⁸.

Les travaux de Grimaldi sont considérables:

il produit, répète et étudie le phénomène de la diffraction et observe ainsi les franges de diffraction appelées depuis "franges de Grimaldi".

il mène des études poussées sur les rapports des couleurs et de la lumière blanche, renouvelant totalement le problème et créant le cadre de la réflexion newtonienne sur la question. Pour lui, la couleur est un fait intrinsèque à la lumière et non pas une qualité séparée.

il soumet à l'expérimentation des faits reliant lumière et chaleur.

Bref, la lumière sort transformée du laboratoire de Grimaldi.

On ne peut méconnaître que Grimaldi laisse un concept de la lumière beaucoup mieux défini que celui qu'il avait trouvé. Il ne s'agit plus d'un quid incolore, se propageant en ligne droite et capable de se refléter, de se réfracter et de stimuler la vision des objets illuminés, mais d'un fluide substantiel, animé d'une vitesse très grande mais non infinie, qui se propage par des rayons rectilignes, lesquels ne sont pas seulement définis par leur direction, bien que dotés d'une ondulation à très haute fréquence qui les rend aptes à stimuler la sensation de couleur; la lumière se reflète suivant les lois d'Euclide, mais avec des modifications [...] elle se réfracte de même, elle se diffracte en passant autour des objets fins [...] elle réchauffe les corps lorsqu'elle est absorbée [...] elle a d'étroites analogies avec le flux magnétique²⁹.

Cependant, il ne saurait avoir de certitudes métaphysiques sur l'essence du phénomène et s'il est davantage séduit, convaincu, par le substantialisme (sans doute de type ondulatoire, avec évocation d'un pur Ether), il demeure incertain et la seconde partie du livre reconnaît qu'aucun argument absolument décisif n'a été fourni contre l'accidentalisme.

Je dis qu'il n'est pas au dessus des forces de l'omnipissance qu'il existe une substance corporelle, poreuse avec continuité...et que d'autre part, il existe une substance purement corporelle, subtile, fluide et diffusée par un mouvement rapide et intense, comme il a été dit de la lumière ³⁰.

Ayant réfléchi au problème de la réflexion d'une lumière matérielle, puis accidentelle, il avoue:

²⁶Vasco Ronchi, (1962), p. 210.

²⁷ Grimaldi, F.M., (1665)

²⁸ Grimaldi, (1665), préface, cité in Ronchi, (1956), p. 124.

²⁹ Grimaldi, *id.*, p. 148-9.

³⁰ Grimaldi, *id.*, p. 137.

Celui qui arrivera à concilier ces deux choses aura éliminé toutes ces importantes difficultés, et, ajoutant la lumière à la lumière, aura bien droit à sa clarté, alors qu'elle est maintenant pour la plupart des gens, enveloppée dans les ténèbres de l'erreur³¹.

Descartes

Les textes concernant l'optique et la lumière en général en général sont nombreux chez Descartes.

Dans la *Géométrie de 1637*. Au second livre de *l'Essai* (AT VI, 424-430)

Explication de quatre nouveaux genres d'ovales qui servent à l'optique (p.424)

Descartes présente une famille de courbes rendues connaissables par construction. Les ovales de Descartes rattachent en outre le troisième essai au précédent, *La Dioptrique*.

Claude Rabuel présente fort bien la question en écrivant

“M. Descartes explique en premier lieu la nature et les effets de quatre genres d'ovales qu'il a inventées; en second lieu il vient à la figure qu'il faut donner aux verres qui réunissent à un point donné les rayons qui viennent d'un autre point. Les choses qu'il nous faut expliquer sont celles-ci. 1) la réflexion et la réfraction de la lumière en peu de mots. 2) la description des quatre sortes d'ovales 3) leurs propriétés par rapport à la réflexion et à la réfraction de la lumière et la démonstration de ces propriétés 4) Quelles propriétés, le cercle, la parabole, l'ellipse et l'hyperbole ont par rapport à la réflexion et à la réfraction de la lumière 5) La figure qu'il faut donner aux verres, afin qu'ils réunissent en un point donné les rayons qui viennent d'un autre point donné”³².

Descartes cherche donc la forme que doivent avoir des courbes pour faire converger des rayons issus d'un point. Il montre que, si un rayon vient de A et doit converger vers B, alors la courbe doit être telle que le rapport entre la différence AG - AS à la différence entre BS - BG soit précisément le rapport des sinus des angles d'incidence et de réflexion. De telles courbes décrivent des ovales d'espèces distinctes selon la position du sommet S par rapport au segment AB. L'auteur considère quatre espèces d'ovales dont il donne d'abord la construction.

Les propriétés optiques sont examinées par Descartes dans un grand nombre de cas: si les rayons viennent de l'extérieur des ovales, s'ils viennent de l'intérieur, s'ils sont issus d'un des foyers etc. L'étude est poursuivie pour chacun des quatre genres et, à chaque fois, le calcul algébrique est exploité, à partir d'une propriété caractéristique de la courbe et de la loi des sinus en ce qui concerne la réfraction et la loi d'égalité des angles en ce qui concerne la réflexion.

De belles propriétés des coniques sont ainsi rencontrées, comme la réflexion de foyer à foyer pour une ellipse, la réflexion vers le foyer 'intérieur', d'un rayon dirigé vers le foyer 'extérieur' d'une hyperbole...

Le Monde ou Traité de la lumière.

Il est terminé en 1632 et mis de côté. Il contient une théorie générale de la lumière.

Les *Principia*, §52, 55 de la troisième partie dite *Du Monde visible*.

Il rappelle, dans la *Préface des Principes* ce qu'il a voulu faire dans la *Dioptrique*. « aller fort loin avant en la philosophie... » en expliquant l'invention de la lunette d'approche. Reprise du thème d'introduction de la *Dioptrique*

« Toute la conduite de notre vie dépend de nos sens entre lesquels celui de la vue étant le plus universel et le plus noble, il n'y a pas de doute que les inventions qui servent à en augmenter la puissance, ne soient les plus

³¹ Grimaldi, *id.*, p. 139.

³²Rabuel, p.337

utiles qui puissent être ... Les merveilleuses lunettes...nous ont déjà découvert de nouveaux astres dans le ciel...elles semblent nous avoir ouvert le chemin, pour parvenir à une connaissance beaucoup plus grande et plus parfaite... mais, à la honte de nos sciences, cette invention si utile et si admirable n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune » (AT VI, 81-82)

Le texte central est la *Dioptrique*. Objectif limité : pas un traité sur la nature de la lumière, mais une exposition rationnelle des lunettes et de leur théorie.

« Personne que je sache [n'a]suffisamment déterminé les figures que ces verres doivent avoir... » (p.82)

Or, n'ayant ici autre occasion de parler de la lumière, que pour expliquer comment ses rayons entrent dans l'œil, et comment ils peuvent être détournés par les divers corps qu'ils rencontrent, il n'est pas besoin que j'entreprenne de dire au vrai quelle est sa nature, et je crois qu'il suffira que je me serve de deux ou trois comparaisons, qui aident à la concevoir en la façon qui me semble la plus commode, pour expliquer toutes celles de ses propriétés que l'expérience nous fait connaître, et pour déduire ensuite toutes les autres qui ne peuvent pas si aisément être remarquées; imitant en ceci les astronomes, qui, bien que leurs suppositions soient presque toutes fausses ou incertaines, toutefois, à cause qu'elles se rapportent à diverses observations qu'ils ont faites, ne laissent pas d'en tirer plusieurs conséquences très vraies et très assurées.(VI, p.83)

Donc : ces comparaisons, éventuellement fausses, sont valides par les conséquences qu'on en tire.

1. On expérimente la vision, par exemple.
2. On imagine des causes « ici des analogies », de façon à expliquer (déduire) ces effets connus.
3. On peut en « tirer » de nouvelles conséquences très vraies et très assurées. (le prisme, les courbes anaclostiques, les lentilles en général...)

Première analogie : le bâton de l'aveugle

« Je désire dit, Descartes, que vous pensiez que la lumière n'est autre chose, dans les corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux, par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que le mouvement ou la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main, par l'entremise de son bâton. » (AT VI, 84)

On en infère que la transmission de la lumière est instantanée, « du soleil jusqu'à nous » ; et sans transport de matière : « il n'est pas besoin de supposer qu'il passe quelque chose de matériel depuis les objets jusqu'à nos yeux ».

Seconde analogie : la cuve à vin.

(p.86) Pour résoudre la question de la transmission rectiligne. Dans une cuve à vin pleine de grappes et percée au fond pour l'écoulement du jus de raisin : si on presse d'un côté ou de l'autre, le vin coule à l'autre bout, directement (en fait, c'est comme une pression, au sens de la pression dans les liquides incompressibles). L'action est transmise « au travers » des grappes. De même, la matière subtile transmet, à travers les corps grossiers de l'air et des corps transparents, l'action de la lumière. La lumière n'est pas mouvement, elle est « inclination à se mouvoir » et les rayons lumineux « ne sont autre chose que des lignes suivant lesquelles tend cette action » (celle des corps lumineux). C'est assez comme une transmission d'information.

On ne sait donc pas le pourquoi de la chose, et la cohérence des analogies entre elles, n'est pas une question pertinente (ce n'est pas un système explicatif) ; on sera bien aise, grâce aux analogies de penser que la lumière est donc en ligne droite.

Les analogies sont des supports de l'imagination ; elles permettent de « ne pas trouver étrange telle ou telle propriété de la lumière » (84, l.20)

On est frappé par la ressemblance de la construction cartésienne des analogies avec la notion contemporaine (très récente) de *modèle* : « Dans ce cas (le modèle de l'atome de Bohr étudié par

Barberousse et Ludwig, cité RHS p.267), le modèle ne vise pas à reproduire des descriptions vraies du monde mais est destiné plutôt à susciter une phénoménologie de l'imagination qui a sa cohérence ».

Le « créateur » John Von Neumann :

«To begin, we must emphasize a statement...which must be repeated again and again. It is that sciences do not try to explain, they hardly try to interpret, they mainly make models. By a model is meant a mathematical construct which, with the addition of certain verbal interpretations, describe observed phenomena. The justification of such a mathematical construct is solely and precisely that it is expected to work.» (Quoted in RHS, p.256)

Dans toutes les théories contemporaines des modèles, ces derniers n'ont que peu de chose, voire rien à voir avec la réalité des phénomènes.

Il y a comme une sorte de « nouvel empirisme », mais au niveau formel lui-même : on découvre, ou choisit le meilleur « modèle » formel par essais et approximations.

Un exemple, Maxwell

L'évolution de la pensée de Maxwell s'étendit de 1855 jusqu'à la publication de son *Treatise on Electricity and Magnetism* qui devint la *Bible des électriciens*. Il a cherché à donner une explication mécaniste de tous ces faits et, pour cela, a imaginé un fluide partout présent, constitué de cellules en rotation capables de propager, de proche en proche les propriétés des champs. Que fallait-il penser de cet *Ether électromagnétique* et de cette théorie des *tourbillons cellulaires* ? Maxwell s'en expliquait en défendant « l'existence d'un milieu éthéré pénétrant tous les corps », mais en ajoutant presque immédiatement qu'il avait « surtout pour but d'orienter l'esprit du lecteur vers des phénomènes mécaniques qui lui serviront à comprendre les phénomènes électriques » ; ces constructions « ont valeur d'illustration et non d'explication » insiste-t-il. Comme l'écrivait Poincaré à la fin du siècle, « Maxwell ne donne pas une explication mécanique, mais se borne à démontrer que cette explication est possible ». Nous avons là un des plus beaux exemples d'une théorie de grande puissance et de grande généralité dont on ne sait pas –au fond- quelle est la véritable nature des objets dont elle parle.

Troisième analogie : la balle, première version

Les rayons sont cependant détournés en changeant de milieu. Nouvelle *aide à l'imagination*. « Ils sont sujets à être détournés ou amortis, en même façon que l'est le mouvement d'une balle ou d'une pierre jetée dans l'air, par ceux qu'elle rencontre » (p.88-89)

Vient ici le plus important : « car il est bien aisé de croire que l'action ou l'inclinaison à se mouvoir, que j'ai dit devoir être prise pour la lumière, doit suivre en ceci les mêmes lois que le mouvement » (p.89)

Très précis : l'analyse du comportement de la lumière dans la réfraction pourra être menée grâce aux principes de cinématique (nous verrons lesquels), sans que l'optique ne soit analogue à la cinématique (« en ceci », qui signifie qu'en « autre chose », les lois ne sont pas analogues : ainsi de la vitesse ou de la percussion ou des chocs, qui ne concernent pas la lumière, mais concernent la balle ou la pierre).

Les conséquences annoncées de cette analogie sont géométriques : rebond, surface de séparation concave, convexe, balle liftée, etc.

Acquis nouveau : la lumière se comprendra selon les « lois du mouvement », quoiqu'elle n'en soit pas un.

DE LA REFRACTION. LIVRE SECOND

Pour comprendre la réfraction, il faut avoir d'abord l'intelligence de la réflexion. Le texte qui suit commande les deux. Il est peut être le plus important.

Pensons donc qu'une balle, étant poussée d'A vers B, rencontre, au point B, la superficie de la terre CBE, qui, l'empêchant de passer outre, est cause qu'elle se détourne; et voyons vers quel côté. Mais afin de ne nous embarrasser point en de nouvelles difficultés, supposons que la terre est parfaitement plate et dure, et que la balle va toujours d'égale vitesse, tant en descendant qu'en remontant, sans nous enquérir en aucune façon de la puissance qui continue de la mouvoir, après qu'elle n'est plus touchée de la raquette, ni considérer aucun

effet de sa pesanteur, ni de sa grosseur, ni de sa figure. Car il n'est pas ici question d'y regarder de si près, et il n'y a aucune de ces choses qui aient lieu en l'action de la lumière à laquelle ceci se doit rapporter. Seulement faut il remarquer, que la puissance, telle qu'elle soit, qui fait continuer le mouvement de cette balle, est différente de celle qui la détermine à se mouvoir plutôt vers un côté que vers un autre, ainsi qu'il est très aisé à connaître de ce que c'est la force dont elle a été poussée par la raquette, de qui dépend son mouvement, et que cette même force l'aurait pu faire mouvoir vers tout autre côté, aussi facilement que vers B, au lieu que c'est la situation de cette raquette qui la détermine à tendre vers B, et qui aurait pu l'y déterminer en même façon, encore qu'une autre force l'aurait mue. Ce qui montre déjà qu'il n'est pas impossible que cette balle soit détournée par la rencontre de la terre, et ainsi, que la détermination qu'elle avait à tendre vers B soit changée, sans qu'il y ait rien pour cela de changé en la force de son mouvement, puisque ce sont deux choses diverses, et par conséquent qu'on ne doit pas imaginer qu'il soit nécessaire qu'elle s'arrête quelque moment au point B avant que de retourner vers F, ainsi que font plusieurs de nos philosophes; car, si son mouvement était une fois interrompu par cet arrêt, il ne se trouverait aucune cause, qui le fît par après recommencer. De plus, il faut remarquer que la détermination à se mouvoir vers quelque côté peut, aussi bien que le mouvement et généralement que toute autre sorte de quantité, être divisée entre 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 AC vers la droite FE, en sorte que ces deux, jointes ensemble, la conduisent jusqu'à B suivant la ligne droite AB. Et ensuite il est aisé à entendre, que la rencontre de la terre ne peut empêcher que l'une de ces deux détermimations, et non point l'autre en aucune façon. Car elle doit bien empêcher celle qui faisait descendre la balle d'AF vers CE, à cause qu'elle occupe tout l'espace qui est au-dessous de CE; mais pourquoi empêcherait-elle l'autre, qui la faisait avancer vers la main droite, vu qu'elle ne lui est aucunement opposée en ce sens là? (ATVI, 93-95)

Texte fondamental :

Il y a idéalisation (ou abstraction) de la situation : terre plate, dure, vitesse constante.

Dans la même phrase, on abandonne le régime explicatif : « la cause du mouvement, la pesanteur, la grosseur, la figure » sont exclues de l'étude : à savoir les principes du mouvement et du mécanisme. Dès lors, examine-t-on vraiment des causes efficientes ?

C'est un pur modèle géométrique qui va être avancé. Ce modèle réclame quelques règles :

Il faut distinguer la puissance qui conserve le mouvement (quelle qu'elle soit), de sa direction ou détermination. Elles s'étudient séparément ; donc, une modification de direction (rebond ou réfraction) ne saurait entamer la puissance de l'action de la lumière. En conséquence, la « vitesse » ou la quantité qui en joue le rôle dans l'analogie est constante si le milieu ne change pas.

la décomposition de la direction de l'action lumineuse, de la « tendance ou détermination à se mouvoir » : elle se décompose comme les vitesses ou les mouvements, selon le parallélogramme.

La conséquence, pour la réflexion est immédiate : selon la composante horizontale, il ne « se passe rien », la surface n'affecte pas le phénomène (improprement appelé mouvement). C'est seulement selon la composante normale que la surface de séparation affecte le phénomène. Cette idée est essentielle : comme si le milieu séparant agissait exclusivement dans la direction normale à la surface : ce sera le pilier du raisonnement newtonien ; ça fait penser à un « champ ».

Descartes –comme par provocation- emploie le mot vitesse ; il ne s'agit pas de vitesse : c'est le terme analogiquement transposé dans le modèle. Bref, la loi de la réflexion s'en suit :

Pas de changement de milieu, donc, pas de modification de la puissance totale, donc de la « vitesse » ou de ce qui en tient lieu : vitesse constante pour aller « horizontalement », soit, $CB = BD$. C'est en D que se rencontrent le cercle (première exigence : même temps) et la droite (CD) (seconde exigence : vitesse horizontale constante).

Troisième analogie : la balle, seconde version (une toile)

Venons maintenant à la Réfraction. Et premièrement supposons qu'une balle, poussée d'A vers B, rencontre au point B, non plus la superficie de la terre, mais une toile CBE, qui soit si faible et déliée que cette balle ait la force de la rompre et de passer tout au travers, en perdant seulement une partie de sa vitesse, à savoir, par exemple, la moitié.(97)

Si la traversée divise la « vitesse » par deux.

Globalement, pour rejoindre le cercle, après B, il faudra un temps double que pour venir de A en B.

Or, composante horizontale non affectée donc, en un temps double, déplacement horizontal double.

Donc, on fait HF double de AH et on en déduit le point I.

La généralisation va suivre :

D'abord l'idée que le second milieu, non modélisé par une toile qui crève, mais qui « occupe tout l'espace » est isotrope et donc qu'une fois entrée dedans la balle-lumière n'est plus affectée du point de vue directionnel. Soulignons que le phénomène prend naissance à *la surface de séparation*. Ces deux points seront des arguments décisifs chez Newton.

Ensuite que l'on peut faire le même raisonnement pour toute multiplication de la difficulté. Si le milieu divise la facilité par k , alors, $BE = k \cdot BC$

Or on peut prendre aussi le revers de cette conclusion et dire que, puisque la balle qui vient d'A en ligne droite jusqu'à B, se détourne étant au point B, et prend son cours de là vers I, cela signifie que la force ou facilité, dont elle entre dans le corps CBEI, est à celle dont elle sort du corps ACBE, comme la distance qui est entre AC et HB, à celle qui est entre HB et FI, c'est-à-dire comme la ligne CB est à BE.(p.100)

Or, $CB = \sin i$ et $BE = \sin r$;

La facilité dans r est à la facilité dans i comme $\sin i$ est à $\sin r$.

facilité r /facilité $i = CB/BE = \sin i/\sin r$

Descartes explique longuement que ce n'est pas le rapport des angles qui compte (Kepler) mais celui des sinus, constant quelque soit l'angle i .

Quatrième analogie : la balle, troisième version (l'eau)

La balle ne rencontre plus seulement une toile, mais un autre milieu, comme de l'eau. La modification d'image (de la toile à l'eau) a la fonction suivante : ce qui s'est passé avec la toile n'est pas modifié si « derrière la toile », on a un autre milieu. Le milieu est isotrope. L'argument de Descartes consistera à montrer que « en passant dans l'eau », c'est la même chose que « en traversant une toile ». Pourquoi y avoir recours ? Parce que la réfraction a lieu, non pas en traversant une frontière, mais en passant dans un autre milieu : il s'agit donc de rapprocher l'image de la réalité.

Les raisons de cette similitude d'effet sont dues au caractère isotrope du milieu.

Le problème des différences de comportement lumière/balle.

Mais peut-être vous étonneriez-vous, en faisant ces expériences, de trouver que les rayons de la lumière s'inclinent plus dans l'air que dans l'eau, sur les superficies où se fait leur réfraction, et encore plus dans l'eau que dans le verre, tout au contraire d'une balle qui s'incline davantage dans l'eau que dans l'air, et ne peut aucunement passer dans le verre.

La balle s'écarte de la normale dans l'eau ou dans le verre, le rayon s'en approche.

Donc –si l'analogie fonctionne- la facilité de l'action qui produit le rayon lumineux est plus grande dans l'eau ou dans le verre que dans l'air. Cette facilité est analogue à la vitesse, ceci explique cela :

La balle a une moindre rapidité dans l'eau, elle s'écarte de la normale

Le rayon a une facilité plus grande, elle s'approche.

Reste à savoir pourquoi cette facilité est supérieure dans les corps plus denses ? Ce qui est bizarre. (analogie 5 : la balle roule moins bien sur le tapis pelucheux, p.103) :

Car, par exemple, si c'est une balle qui, étant poussée dans l'air d'A vers B, rencontre au point B la superficie de l'eau CBE, elle se détournera de B vers V; et si c'est un rayon, il ira, tout au contraire, de B vers I. Ce que vous cesserez toutefois de trouver étrange, si vous vous souvenez de la nature que j'ai attribuée à la lumière, quand j'ai dit qu'elle n'était autre chose, qu'un certain mouvement ou une action reçue en une matière très subtile, qui remplit les pores des autres corps; et que vous considériez que, comme une balle perd davantage de son agitation, en donnant contre un corps mou, que contre un qui est dur, et qu'elle roule moins aisément sur un tapis, que sur une table toute nue, ainsi l'action de cette matière subtile peut beaucoup plus être empêchée par les parties de l'air, qui, étant comme molles et mal jointes, ne lui font pas beaucoup de résistance, que par celles de l'eau, qui lui en font davantage; et encore plus par celles de l'eau, que par celles du verre, ou du cristal. En sorte que, d'autant que les petites parties d'un corps transparent sont plus dures et plus fermes, d'autant laissent-elles passer la lumière plus aisément: car cette lumière n'en doit pas chasser aucunes hors de leurs places, ainsi qu'une balle en doit chasser de celles de l'eau, pour trouver passage parmi elles.

Enfin reste à ne pas mésinterpréter : la facilité n'est pas la vitesse ; il n'y a pas de vitesse de la lumière chez Descartes et donc, il est faux de soutenir que « Descartes pense que la lumière va plus vite dans l'eau que dans l'air » et que Fermat le corrige sur ce point.

Remarques de vocabulaire

L'aisance est en proportion inverse des inclinaisons et les inclinaisons sont données par les sinus

aisance i /aisance $r = \sin r/\sin i$

Or la lumière

« s'incline plus dans l'air que dans l'eau » et la balle « s'incline plus dans l'eau que dans l'air »

Pour la lumière, Inclinaison air/inclinaison eau = aisance eau/aisance air = $\sin \text{air}/\sin \text{eau} > 1$

Pour la balle, Inclinaison eau/inclinaison air = aisance eau/aisance air = $\sin \text{air}/\sin \text{eau} < 1$

Explication : pour la lumière, l'aisance est supérieure dans les milieux plus denses à l'inverse de la balle ; car la lumière n'a pas à « chasser » les particules qu'elle rencontre alors que la balle doit le faire.

Questions générales :

Dans la *Dioptrique*, Descartes a-t-il expliqué la réfraction ? En a-t-il donné les causes ? Quel genre de causes ? Formelles (la géométrisation du rayon, la formule, la loi des sinus), matérielles (les catégories de matière subtile qui interagissent), efficientes (les relations qui se créent entre les mélanges de matière subtile au passage d'un milieu à un autre), mais pas de cause finale.

Peut-être n'y a-t-il pas de cause efficiente satisfaisante, mais le fait est qu'il n'y a pas de finales.

LE CHEMIN DE LA LUMIERE CHEZ NEWTON ET LEIBNIZ

Un bâton plongé dans l'eau semble brisé, parce que les rayons lumineux changent de direction en arrivant dans l'eau. Pourquoi en est-il ainsi et quelle est la loi quantitative du phénomène ? Newton et

Leibniz apportent chacun une réponse à ces questions, réponse que je vais examiner en risquant une double réduction. Réduction des problèmes de vision et d'optique à la réfraction. La réflexion, la diffraction, la recherche des foyers, l'étude des courbes anacastiques, l'analyse des couleurs etc. sont aussi considérables, mais c'est un fait que le mystère du bâton brisé eût une place centrale, particulière dans les débats d'optique qui agitaient le XVII^{ème} et le début du XVIII^{ème}. La seconde réduction est moins facilement excusable puisqu'elle attribue les premiers rôles de la pièce à ces deux auteurs; or telle n'est pas la réalité. Descartes, Huyghens, Snellius, Fermat, Roberval, Halley, Mersenne, Hooke, Pardies et bien d'autres contribuèrent tout autant à la discussion. Aussi notre propos n'est-il pas de faire un exposé d'histoire de l'optique de cette période, mais de comparer les manières de faire de deux des plus grands savants philosophes de la fin du siècle, sur une troublante énigme de la vision, parce qu'elles nous révèlent -à cette occasion- des trames épistémologiques assez nettes et bien distinctes.

LA LOI DE DESCARTES

La relation à la base de la description de la réfraction de la lumière est la suivante : un rayon lumineux passant d'un premier milieu à un second milieu voit sa trajectoire modifiée conformément à l'égalité : $\sin i / \sin r = n_r / n_i$ dans laquelle, i désigne l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction, n_i l'indice de réfraction du premier milieu et n_r l'indice de réfraction du second milieu.

Nous savons aujourd'hui que ces indices de réfraction sont inversement proportionnels à la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. La loi de Descartes peut donc être exprimée ainsi : $\sin i / \sin r = v_i / v_r$.

Ceci est une interprétation moderne du problème qui ne correspond que de loin à la façon qu'avait Descartes de la considérer. D'abord parce que Descartes penchait en faveur d'une transmission instantanée de la lumière. La considération des vitesses respectives est donc sans objet, et c'est d'ailleurs ce qui a donné lieu à bien des interprétations mal fondées des principes de Descartes. Ce dernier a son langage qui n'est en l'occurrence ni celui de la plus ou moins grande densité des milieux mais de leur dureté ou mollesse respective; de même qu'il n'est pas question des vitesses des rayons mais de leurs plus ou moins grands empêchements.

Descartes a donc le privilège d'avoir donné son nom à ce principe qu'il expose au livre II de sa *Dioptrique*. Des auteurs hostiles ont vite mis en place une version selon laquelle il aurait rencontré la loi de réfraction chez le savant hollandais Snellius qui les avait découvertes on ne sait trop comment en 1621. Il n'en serait donc pas l'inventeur. Les études récentes semblent cependant bien établir que Descartes ne doit rien à Snellius. Il reste de toute façon la référence obligée, au XVII^{ème} et au début du XVIII^{ème} pour quiconque veut contribuer aux progrès de l'optique.

LA CONFUSION DES HYPOTHESES GENERALES

Personne alors ne sait ce qu'est la lumière. La tradition dominante grecque -aristotélicienne- transmet une hypothèse ondulatoire ou plutôt vibratoire selon laquelle l'objet lumineux vibre, mettant en mouvement un milieu indéfini qu'Aristote nomme Diaphane, lequel stimule les humeurs qui participent à la composition de l'œil. Descartes développe dans sa physique une théorie de la lumière-pressure qui "n'estoit autre chose qu'un certain mouvement ou une action receuë en une matière tres subtile qui remplit les pores des autres cors"ⁱ. Huygens défend l'analogie ondulatoire avec le son et développe une

théorie d'ondes lumineuses à progression sphérique. Leibniz et Malebranche adoptent ce point de vue, comme Fermat, Roberval et la majorité des savants européens. On comprend donc que le modèle corpusculaire newtonien soit vigoureusement critiqué lors de sa publication. S'il convient de signaler que Newton demeure fort prudent sur la nature de la lumière, la lecture de ses textes publiés comme celle de ses manuscrits confirment qu'il raisonnait dans le cadre d'une conception corpusculaireⁱⁱ.

Cette situation appelle trois remarques:

1) Chacune de ces hypothèses génère ses propres contradictions: la théorie vibratoire, du moins tant que ne sont pas envisagées des vibrations perpendiculaires à la direction de propagation, ne semble pas compatible avec la propagation rectiligne de la lumière et Newton ne manque pas d'en souligner les faiblesses à la fin du livre III de l'*Opticks*ⁱⁱⁱ. Les qualités que doit posséder l'*Ether* nécessaire à la théorie vibratoire lui semblent difficiles à admettre. La théorie corpusculaire suggère une analogie cinématique pour laquelle la réfraction est inversée (le corps ralenti, s'écarte de la normale): l'analogie avec le choc mécanique est impossible. Leibniz ne manque pas, à son tour d'en relever les insuffisances dans son *Unicum opticae, catoptricae et dioptricae principium* (c'est surtout Descartes qui y est mis en cause). En outre, l'explication des aspects périodiques (la diffraction par exemple) est fort compromise par théorie corpusculaire.

2) Bien que, depuis les admirables travaux de Grimaldi^{iv}, les savants se soient largement appuyés sur des mesures, des observations précises et des dispositifs expérimentaux de plus en plus raffinés (phénomènes de diffraction, coloration des lames minces, double réfraction, propagation en un temps fini...), la lumière demeure un difficile 'objet de laboratoire' (on ne peut par exemple mesurer sa plus ou moins grande rapidité selon les milieux, ni mettre en évidence des vibrations). Cette difficulté associée aux phénomènes lumineux va renforcer les explications *a priori* et le recours aux causes finales. "Ici, écrit Huygens dans la préface de son *Traité de la lumière*, les principes se vérifient par les conclusions qu'on en tire; la nature de ces choses ne souffrant pas que cela se fasse autrement"^v. C'est dans cette problématique que s'inscrit -entre autres- la démonstration leibnizienne^{vi}. De ce point de vue la position de principe adoptée par Newton de *ne pas faire d'hypothèse* est un leurre et les observations en ce sens que faisait déjà A. Koyré il y a quarante ans dans *L'hypothèse et l'expérience chez Newton*^{vii} me semblent convaincantes.

3) Les formidables succès newtoniens dans la description de la mécanique des corps par attraction vont se répercuter dans sa conception de l'optique et bientôt masquer les points faibles de ses suppositions. C'est ainsi qu'est rendu nécessaire l'aller-retour de l'*Opticks* aux *Principia* dans l'examen de la réfraction. Tel est donc le cadre général dans lequel prennent place les démonstrations de la loi de la réfraction au XVII^e. L'accord est général sur son expression minimale: les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont dans un rapport constant, indépendant de l'angle d'incidence et aussi sur le fait que l'angle de réfraction est inférieur si le second milieu est plus dense (le rayon allant de l'air dans le verre par exemple). Mais c'est tout.

En fait, deux milieux étant considérés, trois facteurs leurs sont respectivement attachés : les densités des milieux, les résistances qu'offrent ces milieux à la lumière et les vitesses de la lumière dans ces milieux. Ces notions étant elles-mêmes fort différentes selon les auteurs. On peut réclamer de la loi de la réfraction qu'elle se prononce sur les questions suivantes: les sinus sont-ils en raison des densités ou en raison inverse? les sinus sont-ils en raison des vitesses ou en raison inverse? les sinus sont-ils en raison des résistances ou en raison inverse? Lorsqu'ils s'engagent sur cette voie, les auteurs nous offrent un vaste choix de réponses divergentes. C'est dire la confusion de la situation admirablement exprimée par la surprise de Fermat qui, rendant compte de sa démonstration, conclut :

...et voilà que tout-à-coup, à la fin de mon opération, tout se débrouille et il me vient une équation très simple qui me donne justement la même proportion que M.Descartes. Je crus sur l'heure avoir équivoqué, car je ne pouvais me figurer qu'on aboutit à une même conclusion par des routes tout-à-fait opposées, M.Descartes supposant, pour un des moyens de sa démonstration que le mouvement de la lumière trouve plus de résistance dans l'air que dans l'eau, et moi supposant tout le contraire....Je refis donc pour lors la question à diverses reprises, en changeant les positions, et je trouvais toujours la même conclusion, ce qui me confirma deux choses; l'une que l'opinion de M.Descartes sur la proportion des réfractions est très véritable; et l'autre que sa démonstration est très fautive et pleine de paralogisme^{viii}.

Martial Guérout exprime bien cette situation polémique en évoquant la thèse leibnizienne:

Comme Fermat, et contre Descartes, il jugeait la résistance proportionnelle à la densité du milieu. Comme Descartes et contre Fermat, il affirmait que la vitesse croît avec la densité, mais c'est parce qu'il pensait, contre Descartes que la vitesse s'accroît avec la résistance^{ix}.

Il aurait pu poursuivre: Comme Newton et contre Huygens, il pensait que les sinus sont comme les vitesses etc.

Si tous s'accordaient sur l'expression simplifiée de la loi, tous divergeaient sur le moyen de l'établir et c'est un exemple de cette divergence que je voudrais suivre de près dans cet article en comparant la procédure leibnizienne et la newtonienne.

LA REFRACTION CHEZ NEWTON ET LEIBNIZ

Leurs partisans n'ont pas ménagé leurs efforts pour opposer les deux philosophes; un terrain particulièrement tumultueux de cette confrontation étant l'analyse infinitésimale dont chacun peut revendiquer la paternité. Il m'a paru utile de les interroger, de les confronter sur le problème de la réfraction qui -par l'importance qu'il prit au XVII^{ème}- ne pouvait leur avoir échappé. Leurs réponses sont encore quasiment concomitantes et mobilisent d'ailleurs leur propre conception du calcul infinitésimal. Newton examine le problème de la réfraction dans ses deux principaux ouvrages: la XIV^{ème} section du livre I des *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (rédigée entre 1684 et 1686) lui est presque entièrement consacrée de même que la partie I du livre I de l'*Opticks* (écrite, en substance, en 1672) ainsi qu'une partie non négligeable des questions qui concluent le livre III (rédigées pour partie en 1706, pour le reste en 1717). Leibniz le fait dans de brefs mais importants articles des *Acta Eruditorum* de Leipzig : *Unicum opticae, catoptricae et dioptricae principium* de 1682 et le célèbre *Nova methodus pro maximis et minimis* de 1684 ainsi que dans quelques passages du *Discours de métaphysique* et enfin dans le tardif *Tentamen anagogicum* de 1697.

L'optique, en général n'a pas du tout la même importance chez les deux auteurs. Elle couvre dans l'œuvre de Newton un champ de réflexion et d'expérimentation considérable; le plus important avec la

mécanique céleste et la dynamique. Il est juste de signaler que le problème de la réfraction n'est pas -et de loin- celui des problèmes optiques qui préoccupe le plus Newton: on lui doit d'abord et surtout des pensées et expériences nouvelles et décisives en ce qui concerne la décomposition de la lumière blanche. Cette science de la lumière est, pour lui, un domaine particulièrement favorable à la mise en œuvre de méthodes inductives et expérimentales, censées faire l'économie des 'hypothèses'. On songera à l'importance donnée à la mise en scène de l'expérience cruciale du prisme, supposée démontrer -sans hypothèse essentielle- l'hétérogénéité de la lumière blanche. Dans l'œuvre de Leibniz, l'optique joue un rôle quantitativement modeste et quasiment sans application ou découverte nouvelle. C'est par contre une branche de la physique où l'on peut montrer que la bonne physique peut aussi être *a priori*, c'est-à-dire selon les causes finales.

NEWTON

Mon objectif n'est pas de faire un exposé de la théorie newtonienne de la lumière^x. Il s'agit, bien plus étroitement, de suivre de près la forme des énoncés et de l'argumentation de la loi des sinus, en les considérant comme partie prenante révélatrice des stratégies philosophiques de ce savant, stratégies de découverte et d'exposition des lois naturelles.

Une version "simplifiée" de la loi des sinus est donnée par Newton dans son *Opticks* : elle constitue le cinquième axiome du livre I, c'est-à-dire une proposition non démontrée. Cette thèse est réaffirmée à deux reprises dans les deux premiers livres de l'*Opticks*: à la proposition VI-Théorème V du premier livre, première partie, puis à la dixième proposition du livre II, troisième partie.

Ce n'est pas dans l'*Opticks* qu'il faut chercher la démonstration mathématique du chemin de la lumière mais bien dans les *Principia*.^{xi} La section XIV du Livre I qui traite de cette question s'intitule *Du mouvement des corpuscules attirés par toutes les parties d'un corps quelconque* (trad.? : Le mouvement de très petits corps mus par des forces centripètes dirigées vers les parties diverses d'un très grand corps) et rien n'indique (sauf à la fin) qu'il doive y être question de la lumière. Il nous faut donc examiner les propositions XCIV à XCVIII pour saisir la démarche.

Enfin, sur le tard pourrait-on dire, un troisième moment newtonien relatif à la réfraction est constitué par sept des questions finales de l'*Opticks* qui furent ajoutées en 1706 (n°XXV à XXXI) et 1717 (n° XVII à XXIV).

PREMIER MOMENT, PHYSIQUE ET OPTIQUE

La première édition de l'*Opticks* date de 1704, mais dit l'auteur : "*Une partie de ce traité sur la lumière et les couleurs fut écrite en 1675... Afin de rendre la théorie plus complète, j'ajoutai le reste, environ 12 ans après, excepté le 3^{ème} livre et la dernière proposition du 2^d livre*"^{xii}. Concernant la réfraction, le problème principal de Newton est quelque peu différent de celui de ses prédécesseurs puisqu'il centre son enquête sur la plus ou moins grande réfrangibilité de la lumière, selon la couleur, le milieu étant donné alors que les autres posaient la question de la réfrangibilité selon le milieu, le rayon étant supposé blanc. C'est pourquoi, les énoncés relatifs à cette question sont insérés dans des considérations plus générales.

La réfraction est d'abord examinée aux définitions II, IV, V, VI et VII et axiomes I à V du livre I, première partie.

La définition II de la réfrangibilité (p.38) est l'occasion de se démarquer des autres géomètres qui considèrent la réfraction comme la rupture de direction en un point; ce qui ne s'entend que sous l'hypothèse de transmission instantannée. Or, *elle emploie environ sept minutes dans son trajet du Soleil à la Terre*. Mais, ajoute-t-il, "je me suis attaché à donner des définitions si générales des rayons et de leurs réfractions, qu'elles peuvent également convenir dans les deux cas". Cette neutralité affichée impliquerait que la considération de la vitesse soit exclue du résultat, ce qui ne sera pas respecté dans la suite, sinon dans les plus élémentaires des définitions. Dès la définition suivante, la discontinuité du phénomène (rupture en un point) est délaissée pour une inclinaison progressive. Les définitions IV, V, VI et VII suivantes, désignent simplement les éléments de la configuration: angles d'incidence, de réfraction et simplifie la donne en considérant une lumière homogène, c'est-à-dire de même réfrangibilité.

La loi des sinus fait l'objet des axiomes I à V. Le premier rappelle que les phénomènes étudiés sont coplanaires, le second que les angles d'incidence et de réflexion sont égaux. Le troisième est plus important qui assure la symétrie de la réfraction: "Si un rayon rompu est renvoyé directement au point d'incidence, il sera rompu dans la ligne déjà décrite par le rayon incident". Ceci idéalise la réfraction puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie : comme un pendule idéal qui remonterait réellement à la hauteur d'où il a été lâché. L'axiome quatre est en quelque sorte qualitatif :

"Quand un rayon passe d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, la réfraction se fait en approchant de la perpendiculaire, de sorte que l'angle de réfraction se trouve moindre que l'angle d'incidence".

Rappelons que l'analogie corpusculaire se heurte ici à une sérieuse difficulté puisqu'un corps, entrant dans un milieu plus dense est ralenti et s'écarte en conséquence de la perpendiculaire. Ceci va donc précisément à l'encontre d'un modèle cinématique et mécaniste et il est remarquable que tous les auteurs, Descartes, Fermat, Huygens, Leibniz tombent d'accord sur ce point. Il faut dire qu'il est celui qui peut être le plus facilement vérifié par l'expérience : chacun s'arrange donc pour le faire coïncider avec sa propre théorie. Il faut donc ici défendre l'idée prêtée improprement à Descartes d'une vitesse supérieure de la lumière dans les corps plus denses.

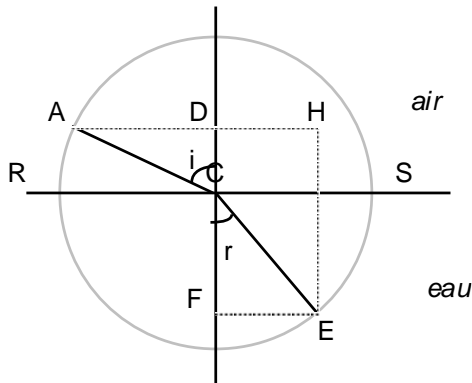
Enfin le cinquième axiome (p.40) énonce la loi des sinus dans une version on ne peut plus sobre: "Le sinus d'incidence est, ou exactement, ou fort approchant, en raison donnée au sinus de réfraction". Prudence newtonienne! Il s'agit d'une proposition non démontrée et la raison des sinus n'est pas explicitée (densités? vitesses?). Newton estime cependant détenir l'essentiel :

Voilà pourquoi, cette proportion, une fois connue dans une inclinaison particulière du rayon incident, peut l'être dans toutes les autres inclinaisons. Il est donc possible de déterminer la réfraction des rayons quelle que soit leur incidence sur le même corps réfringent...

Suivent plusieurs exemples et de mode d'emploi de ce résultat, pour les prismes et les lentilles. Newton se conforme à son paragraphe introductif (p.37) en vertu duquel, il n'a pas pour dessein "d'expliquer les

propriétés de la lumière par des hypothèses” “Je me borne -dit-il- à les énoncer, pour les prouver ensuite par le raisonnement appuyé sur l'expérience”. La relation $\sin_i/\sin_r = k$ est ainsi utilisable : si l'on connaît k pour une inclinaison particulière, alors on pourra déduire les angles pour tant d'autres inclinaisons qu'on voudra.

Newton donne une application de cette règle, les milieux respectifs étant l'air et l'eau. Le rayon , issu de A atteint la surface en C: où va-t-il ensuite?



On trace le "sinus_i", soit AD puis, connaissant k (en l'occurrence 3/4) on trace $DH = k \cdot \sin_i$. On projette alors H sur le cercle et on obtient le point E. Tout ceci est très proche de la dioptrique de Descartes. Cette partie de l'*Opticks* donne en quelque sorte le mode d'emploi de la loi de Descartes et en confirme la validité. Sa démonstration n'est pas abordée ici, pas plus que l'examen des causes dont elle est un effet.

Nous retrouvons la loi de la réfraction comme sixième proposition fondamentale -Théorème V (p.91). Elle arrive après l'exposé de la thèse fondamentale concernant l'hétérogénéité de la lumière blanche et la mise en évidence des lumières chromatiques dont il veut assurer la stabilité. C'est ce qui est visé dans cet énoncé:

Le sinus d'incidence de chaque rayon hétérogène, pris à part, est à son sinus de réfraction en raison donnée.

Il se démarque à nouveau des contemporains qui ne se sont attachés qu'aux rayons de moyenne réfrangibilité. Les proportions ont été *vérifiées* par des mesures et des expériences et c'est une nouvelle expérience qui va préciser la propriété. Le moyen de la preuve est -en réalité- double: expérimental et rationnel

"...cette expérience donne [...] les proportions des sinus égales, autant que j'ai pu en juger à l'inspection des figures et par un certain raisonnement mathématique; car je ne suis pas entré là-dessus dans un calcul bien exact. [que la propriété] soit rigoureusement vraie, c'est ce qu'on peut démontrer par cette hypothèse: *Que les corps réfractent la lumière, en agissant sur les rayons suivants des lignes perpendiculaires à leur surface.*"

Un calcul va s'en suivre; mais avant de l'examiner, je souhaite relever ici une question relative à cette dernière phrase. Son objectif est celui-ci: sans faire d'hypothèses sur la nature des rayons ("Cette démonstration générale étant faite sans déterminer la nature de la lumière ni la force qui la réfracte" p.95), je puis en faire sur leurs accidents puisque ceux-ci relèvent de l'expérience et de la mesure. Or

l'hypothèse proposée est en réalité très forte car pour être exploitée telle qu'elle va l'être, il faut -non seulement- que les corps agissent sur les rayons comme le dit Newton- mais encore que cette action soit en fait comme une accélération, comme une force instantanée. Cette action des corps doit modifier la composante perpendiculaire de la vitesse et ne pas modifier la composante parallèle aux plans. Cette action est une modification de la vitesse, associée à la distance. Une telle analogie implicite revient, je crois, à assumer que nous sommes en présence d'une hypothèse d'attraction telle qu'elle est à l'œuvre dans la dynamique. Cette manière de taire des aspects implicites essentiels de certaines hypothèses rappelle fortement l'interprétation de l'expérience du prisme et de l'hétérogénéité de la lumière blanche qui n'est rigoureusement valide que sous l'hypothèse implicite d'une conception corpusculaire de la lumière^{xiii}. La grande *Experimentum crucis* l'a convaincu que la lumière est corpusculaire et, même s'il maintient à grand peine la fiction d'une certitude moindre quant à cette nature du rayon par rapport à celle qu'induit la 'raison et l'expérience', sa préférence va toujours à l'hypothèse corpusculaire^{xiv}. L'analogie entre rayons et corpuscules n'en est plus une. L'hypothèse qui caractérise cette action est avancée parce que -dit Sabra- "ceci doit être supposé si les rayons se comportent conformément aux lois de la dynamique. Ce sur quoi Newton fait fond, tout au long, c'est l'interprétation dynamique de la réfraction" (p.313). Comment confirmer plus nettement la stratégie newtonienne d'unification des deux grands domaines de sa physique!

Il convient, en outre de souligner l'importance de la thèse selon laquelle la modification de direction n'est pas ponctuelle mais, comme l'écrit Newton

La force du plan réfringent commence à agir sur les rayons dans ce plan même, ou à une certaine distance d'un côté, finissant à certaine distance de l'autre côté; et si, dans tous les endroits placés entre ces deux lignes elle agit [...] (p.94)

Tous les passages newtoniens sur la réfraction insistent sur ce point qui est évidemment essentiel à deux choses: associer la réfraction aux phénomènes généraux de diffraction et renforcer l'analogie avec l'attraction mécanique qui s'exerce dans toute une zone d'influence d'un *très grand corps* sur un *très petit*.. Cet aspect de la question me paraît de première importance. Newton est le seul à donner une pareille place à la progressivité du phénomène. Elle n'est pourtant pas donnée par l'observation, l'expérience ou la mesure. Chaque fois qu'il laisse les énoncés explicatifs ou probatoires dans lesquels cette progressivité est nécessaire et qu'il présente des usages ou exploitations optiques de la loi, Newton revient à la ponctualité de la brisure du rayon. cette thèse omniprésente est bien le signe d'une stratégie permanente devant permettre l'identification aux phénomènes dynamiques. Ceci est parfaitement net dans le passage des propositions XCIV -XCVI à la proposition XCVII.

La démonstration mathématique présente quelques difficultés. D'abord parce qu'elle semble être laissée aux "mathématiciens [qui la] trouveront sans peine" (p.94), ensuite parce qu'elle exploite un cas particulier (celui où la composante perpendiculaire de la vitesse est nulle au point de départ) où la réfraction devrait laisser place à une réflexion totale. Newton semble toutefois déjà en possession de la démonstration qu'il donnera dans les *Principia*^{xv}.

Je voudrais aussi attirer l'attention sur une déficience de la traduction que J.P. Marat donne de la conclusion de cette proposition:

Donc, si la raison des sinus d'incidence et de réfraction d'une espèce quelconque de rayon est trouvée dans un cas quelconque, elle sera facilement trouvée dans tous les autres cas.

Ceci est proprement incompréhensible puisqu'il faudrait en déduire que le calcul de Newton permet de découvrir la raison des sinus dans des cas divers, or, précisément, cette raison est constante -pour une couleur et des milieux donnés. La traduction de M. Coste est bien plus juste qui affirme:

Ainsi donc, si la raison des sinus d'incidence et de réfraction d'une espèce quelconque de rayons est trouvée en quelque cas, elle est par là donnée dans tous les autres cas^{xvi}.

Il s'agit bien de la possibilité de tracer le rayon émergent pour un incident donné, une fois connu le rayon émergent d'un premier incident.

Dans l'*Opticks*, encore et enfin, on retrouve la loi des sinus évoquée à la 10^{ème} proposition de la 3^{ème} partie du livre II. Il s'agit de mettre en rapport les forces réfléchissantes et réfringentes des différents corps avec leur densité et de faire apparaître que celles-là augmentent quand celles-ci diminuent. Je ne commente pas le tableau de résultats proposé mais simplement l'argument mathématique préalable qui reconduit l'analogie (pour ne pas dire l'assimilation) de la réfraction à l'attraction mécanique des corps et réutilise la situation-limite déjà invoquée dans la *Proposition VI* précédemment examinée dans laquelle "un corps, ou quoi que ce soit" (par exemple, évidemment, un rayon) arrive vers une zone attractive selon un angle infiniment petit. Newton passe encore la main "aux mathématiciens [qui] comprendront aisément" (p.318, Coste) que "le mouvement engendré par les forces sera en proportion sous doublée des forces".

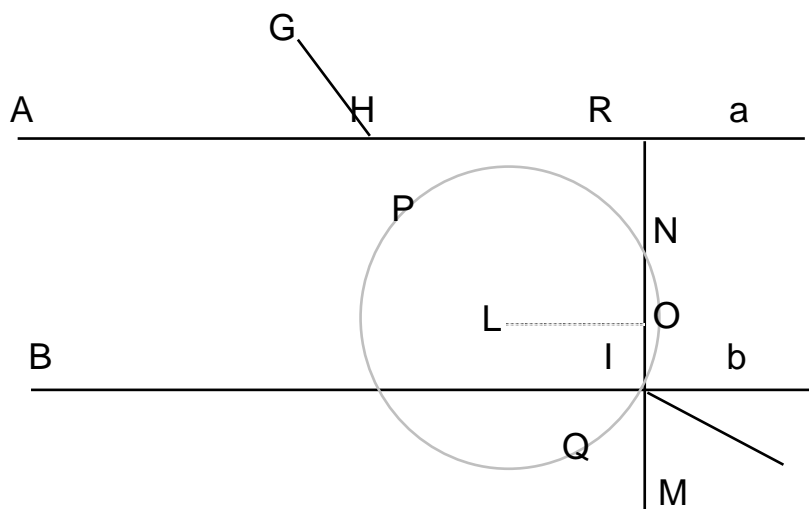
SECOND MOMENT; LE MOMENT DEMONSTRATIF OU MATHEMATIQUE.

Selon la proposition XCIV. Théorème XLVIII du livre I des *Principia*.

Si deux milieux identiques sont séparés par un espace délimité par deux plans parallèles. Soit un corps, attiré ou repoussé lors de son passage à travers cet espace selon une direction perpendiculaire aux plans et ni mû, ni perturbé par aucune autre force. Que l'attraction soit la même aux mêmes distances de chacun des plans considérées d'un même côté du plan. Je dis qu'alors le sinus d'incidence sur chaque plan sera dans une raison donnée au sinus d'émergence de l'autre plan.

Le cas général concerne donc un champ non uniforme, mais variant régulièrement. La démonstration, en deux temps, considère d'abord le cas du champ uniforme (Cas 1). On a donc en substance ceci : deux milieux homogènes sont séparés par l'espace E, entre deux plans parallèles (Aa) et (Bb)^{xvii} (E est donc un interface entre les milieux). Un corps est attiré ou poussé perpendiculairement vers l'un ou l'autre de ces milieux (on a un champ gravitationnel constant perpendiculaire aux plans). Si un corps entre dans ce champ selon une certaine direction, le traverse en subissant son effet attractif (ou répulsif) et le quitte pour entrer dans le second milieu, alors, le sinus d'incidence sur l'un ou l'autre plan sera en raison donnée du sinus d'émergence sur l'autre plan.

Figure 1.



La démonstration fait appel à des outils qui sont en principe de géométrie ordinaire et à un important résultat galiléen. Il s'agit du premier théorème de la 4^{ème} journée des *Discours sur deux sciences nouvelles*

selon lequel *Un projectile qu'entraîne un mouvement composé d'un mouvement uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas, décrit au cours de son déplacement une trajectoire semi-parabolique*^{xviii}. On pourra souligner que ce résultat sur la nature de la trajectoire d'un corps soumis à une attraction constante est sans doute l'un des plus représentatifs des succès galiléens en matière de mathématisation des lois de la nature.

Voici la démonstration de Newton:

HI étant un arc de parabole, IM est l'abscisse du point M et HM son ordonnée. Si l'on nomme l le *latus rectus* de cette parabole^{xix}, on a bien $IM.l = HM^2$

La construction du point L (milieu de [H,M]), puis de O, I et N donne immédiatement $HL = LM$ puis $MO = OR$ et $ON = OI$, soit $MN = IR$, qui est donné (c'est l'épaisseur du champ d'attraction).

MN est donné et l aussi; leur rapport l'est donc: soit $MN/l = k$. On a alors:

$$MN.MI / l.MI = k \quad \text{soit} \quad MN.MI / HM^2 = k$$

Par ailleurs, d'après la propriété de la puissance d'un point par rapport à un cercle, on a: $MN.MI = MP.MQ = ML^2 - PL^2 = ML^2 - LI^2$

$$\text{d'où l'on déduit: } ML^2 - LI^2 / HM^2 = k$$

$$\text{or, } HM^2 = 4.LM^2 \quad \text{d'où: } ML^2 - LI^2 / LM^2 = 4k$$

$$\text{soit: } LI^2 / ML^2 = (1-4k) \text{ d'où l'on tire que } LI / ML \text{ est donné.}$$

Comme dans le triangle LMI, on a: $\sin M / LI = \sin I / LM$

on obtient: $\sin M / \sin I = LI / ML$ qui est donné. cqfd.

Newton a donc raison de dire que le rapport des sinus est donné dès lors que les caractéristiques du champ, la vitesse initiale et l'épaisseur le sont.

En effet, soit un champ d'accélération donnée a ; une particule de vitesse donnée v_0 , une épaisseur donnée e ; alors pour tout angle d'incidence (compatible avec la ressortie de la trajectoire) on obtient :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \sqrt{1 + \frac{4ae}{v_0^2}}$$

On observera que rien n'est dit quand à la nature de la constante donnant le rapport des sinus, sinon qu'elle ne dépend que du champ gravitationnel et pas de l'angle d'incidence.

La suite de la proposition consiste en une généralisation: le champ uniforme peut être découpé en tranches parallèles, en une multiplicité de champs superposés ayant chacun une constante caractéristique. Alors le rapport des sinus reste déterminé, comme produit des rapports correspondants aux multiples passages. Au moyen d'une brève remarque, Newton passe de cette situation discrète à une variation continue et affirme que le produit infini des rapports reste déterminé.

Soit le corps traversant successivement plusieurs espaces limités par des plans parallèles AabB, BbcC, &c. et mû par une force uniforme en chacun d'eux, pris séparément, mais différente dans les divers espaces; d'après ce qui vient d'être démontré, le sinus de l'angle d'incidence sur le premier plan Aa est au sinus d'émergence du second plan Bb en raison donnée; et ce sinus de l'angle d'incidence sur le second plan Bb est au sinus d'émergence du troisième plan Cc en raison donnée; et ce sinus est au sinus d'émergence du quatrième plan Dd en raison donnée; et ainsi à l'infini; et par multiplication d'égaux, le sinus d'incidence sur le premier plan est au sinus d'émergence du dernier plan en raison donnée. Soit maintenant diminués les intervalles entre les plans et leur nombre augmenté à l'infini, de telle façon que l'action de l'attraction ou l'impulsion, s'exerçant selon une certaine loi déterminée, devienne continue, et la raison du sinus d'incidence sur le premier plan au sinus d'émergence du dernier plan étant donnée tout au long, sera elle aussi donnée Q.E.D.^{xx}.

Il semble que deux étapes doivent être franchies pour passer du cas discret et fini au cas continu: du discret fini au discret infini: le nombre des 'tranches' est multiplié *ad infinitum*; ensuite, on passe du discret infini au continu par réduction des intervalles; dès lors -estime Newton- on dispose d'une variation continue donnée en chaque instant, ou en chaque point.

Si l'épaisseur des champs tend vers zéro et leur nombre vers l'infini, alors, la loi d'attraction devient une variation continue, une fonction et la raison des sinus reste donnée. On a ici quitté le terrain de la géométrie ordinaire pour ce qui devrait être celui de la généralisation par les algorithmes infinitésimaux. La démonstration reste toutefois à niveau de formalisation quasi inexistant et le passage à la limite est tout-à-fait intuitif. On peut en effet imaginer la courbe assimilée à un polygone composé d'une infinité de côtés. Si r_p désigne l'angle de chacun de ces côtés avec la verticale, on a bien $\sin r_n / \sin i$ est donné^{xxi}. Ceci serait conforme au Théorème 1 de la section II du premier livre des *Principia*, selon le Corollaire IV du lemme III.

Ceci est toutefois d'une grande importance car le modèle parabolique avec champ constant s'efface comme trajectoire tout en conservant pour les situations plus complexes qui lui sont substituées l'attribut de permanence du rapport des sinus. Or dans *l'Opticks*, c'est bien à des zones d'attraction continuellement variables que l'on aura affaire.

La proposition 95. Théorème 49 établit que, les mêmes choses étant posées, les vitesses du corps avant et après sont en rapport inverse des sinus: $v_i/v_r = \sin_r / \sin_i$. Il n'est en principe pas question ici de la lumière, mais on ne saurait passer sous silence que le résultat annoncé est précisément contraire pour ce qui est de la réfraction lumineuse, si v_i et v_r sont les vitesses respectives de la lumière dans les deux milieux. Le résultat newtonien oblige l'auteur à défendre une vitesse supérieure de la lumière dans les milieux plus denses puisqu'il ne peut s'opposer au fait empirique reconnu par tous que le rayon incident s'approche alors de la normale. L'expérience ne pouvait pas trancher à l'époque, où il était impossible de mesurer la vitesse de la lumière dans un certain milieu. Ce n'est qu'au XIX^{ème} siècle que Foucault élabore les expériences qui donnent raison à Fermat et Descartes contre Newton et Leibniz. Expérience qui sera interprétée comme une invalidation des théories corpusculaires.

D'autre part, la démonstration s'appuie sur un principe de décomposition, verticale et horizontale de la vitesse, tout à fait "à la manière de" Descartes dans le discours second de sa *Dioptrique*. Descartes avait tenté de parer à l'objection des vitesses en argumentant dans le sens d'une moindre résistance à la lumière dans les corps les plus durs car "*Une bale roule moins aysement sur un tapis que sur une table toute nuë*"^{xxii}.

La démonstration est celle-ci:

IK mesure $\|v_e\|$ et GH mesure $\|v_i\|$

Posant $AH = Id$ puisque la composante horizontale de la vitesse n'est pas affectée par le passage dans le champ attractif, on a :

$$\|v_e\|^2 = Id^2 + dK^2 \quad \text{et} \quad \|v_i\|^2 = AH^2 + GA^2$$

$$Id = IK \cdot \sin e \quad \text{et} \quad AH = GH \cdot \sin i \quad \text{d'où} \quad IK \cdot \sin e = GH \cdot \sin i$$

$$\text{et} \quad \sin e / \sin i = GH / IK = \|v_i\| / \|v_e\| \quad \text{QED}$$

La proposition 96. Théorème 50 affirme qu'il existe une position limite où "*la réfraction n'a pas lieu*" et où le corps ressort dans le premier milieu symétriquement à sa direction d'entrée. Ceci n'a aucune difficulté et correspond à une situation de pure géométrie dans laquelle, le sommet de la trajectoire parabolique est atteint dans le champ de gravitation.

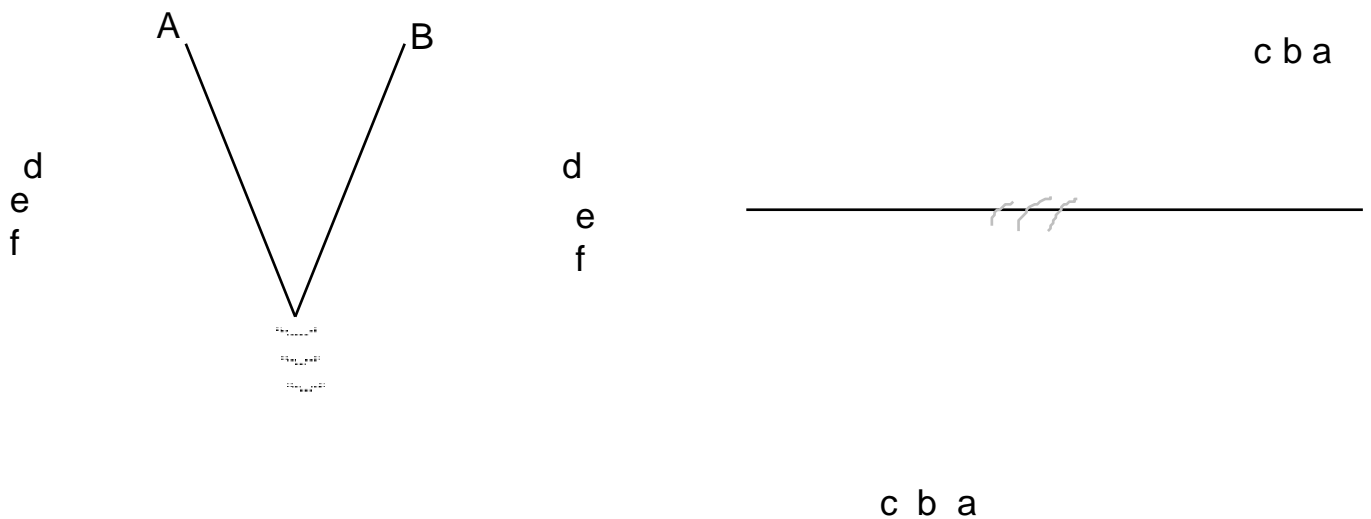
Tout ceci n'aurait aucun rapport avec notre sujet et resterait dans le cadre strict de la mécanique gravitationnelle si un important scholie ne suivait ces propositions.

"Ces attractions présentent une grande ressemblance avec la réflexion et la réfraction de la lumière qui se font en raison donnée des sécantes comme Snellius l'a découvert; et par conséquent en raison donnée des sinus, comme Descartes l'a fait voir".

Nous voici donc en présence d'une analogie au terme de laquelle il est convenable d'étudier la trajectoire de la lumière comme celle des corpuscules solides. J'attire l'attention sur le fait que c'est la coïncidence des résultats mathématiques (la raison des sinus) qui constitue l'argument avancé pour justifier l'analogie. Le problème le plus considérable posé par cette analogie tient à l'apparente impossibilité d'y appliquer la méthode précédente qui suppose l'existence d'un champ, d'une zone d'attraction, donc de déviation. Dans le problème de la réfraction, selon la littérature de l'époque, il n'existe pas de telle zone. On va voir comment Newton tente de surmonter cette difficulté.

"Il est certain...que la propagation de la lumière est successive...et les rayons en passant près des angles des corps. comme une lame de couteau (qu'ils soient transparents ou opaques)..s'infléchissent comme s'ils étaient attirés vers eux ...considérant que cette inflexion des rayons a lieu dans l'air sans le couteau, il s'ensuit que ces rayons tombant vers celui-ci doivent être infléchis avant de l'avoir atteint. Il en est de même des rayons qui tombent sur du verre: ainsi la réfraction ne se fait pas dans le seul point de l'incidence; mais peu à peu, par l'incurvation continuelle des rayons, laquelle se fait en partie dans l'air avant qu'ils n'atteignent le verre et en partie (si je ne me trompe) dans le verre même après qu'ils y sont entrés".

Figures 2 et 3



L'affaire est importante et consiste en deux points. Associer étroitement les phénomènes ici examinés aux phénomènes de diffraction puis assimiler la diffraction à un phénomène attractif. Dès lors, il est possible de soutenir le caractère progressif des modifications de direction des rayons, que se soit sous lors de leur passage près d'un lame effilée ou même lors de leur arrivée sur dans un nouveau milieu; en effet, les forces d'attraction se trouvent modifiées en raison des différences de densité desdits milieux. Il faut donc admettre, que la surface de séparation des milieux génère une sorte de zone frontière, avant et après la séparation. Comme nous le verrons, le gain est considérable puisque la surface de séparation va ainsi recréer cette interface, ce champ d'attraction qui fut au point de départ de la démonstration mathématique. Nous avons déjà vu l'importance de cette thèse de la progressivité de la déviation. Dans l'*Index rerum* de l'édition latine, on trouve deux références à *Lucis refractio explicatur*: "I; 94" qui est bien la démonstration du théorème 48 et "226, 17" qui désigne précisément cette phrase: "Fit igitur refractio, non in puncto solum incientiae".

D'autre part j'attire l'attention sur la parenthèse "(si je ne me trompe)" qui modère cette thèse si fortement et si souvent réaffirmée et qu'on pourrait opposer à une ferme déclaration de l'*Opticks* où il affirme que "cette démonstration est à mes yeux une preuve très convaincante de la vérité absolue de cette proposition"^{xxiii}. L'incurvation continuelle relève en effet des hypothèses (et donc de la moindre certitude) alors que la vérité absolue est associée au caractère mathématique de la démonstration (elle-même dépendante de la supposition de l'action perpendiculaire).

Enfin Newton termine son scholie :

a 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 pour les 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 sont très semblables à celles que décrivent les courbes des rayons.

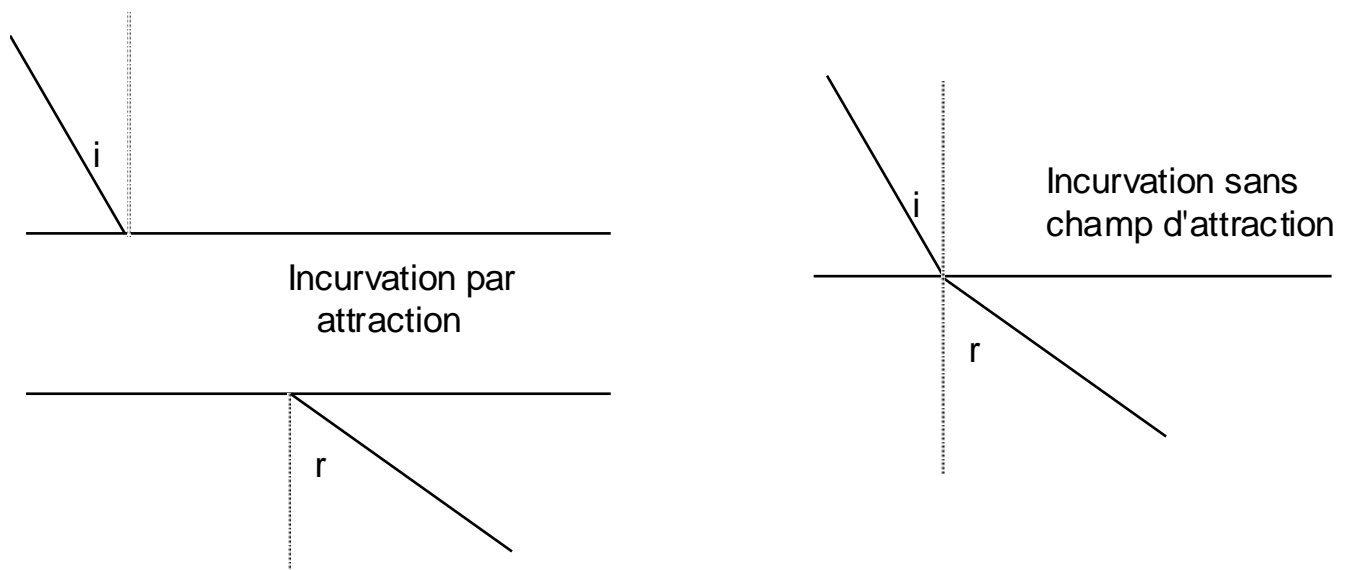
Voici qui n'est pas simple; en effet, si les rayons ne sont pas formés de petits corpuscules, la valeur explicative et démonstrative des propositions précédentes s'évanouit complètement. Demeure une

analogie phénoménale; une ressemblance des effets suffit pour soumettre l'optique à un traitement issu de la mécanique. Comment croire à cette neutralité? N'y a-t-il pas là un exemple de la volonté maintes fois affirmée de *ne pas feindre d'hypothèses*? Une fois encore, Newton ne feint pas d'hypothèse mais ne laisse pas de s'en servir.

Une autre difficulté demeure; celle qui consiste à expliquer que les mêmes causes produisent des effets contraires: là où, en mécanique, l'angle d'émergence croît, il faudra expliquer qu'en optique, il décroît.

La proposition 97, problème 47 confirme et exploite le glissement précédent; la configuration qui a fondé les raisonnements et démonstrations depuis le début va disparaître sans pour autant que les résultats qui en ont été déduits ne soient invalidés. Ceci peut être représenté comme ci-dessous :

Figures 4 et 5



Newton écrit donc en introduction de sa démonstration:

Supposant que le sinus d'incidence sur une surface quelconque soit au sinus d'émergence en raison donnée, et que l'inflexion de la trajectoire des corps près de cette superficie, se fasse dans un espace très petit que l'on puisse considérer comme un point; on demande de déterminer une surface propre à faire converger en un lieu donné tous les corpuscules qui émanent d'un autre lieu donné".

Ce problème était vraisemblablement au cœur des préoccupations optiques : il n'est pas tant question de savoir le pourquoi de la déviation mais de la maîtriser: Descartes avait brillamment abordé la question des surfaces anaclastiques capables de faire converger en un point des rayons divergeant, issus d'une première source. La réponse décidera de la forme des lentilles optiques. Ce fut de même un des soucis de Huygens qui consacre aux "*différentes figures des corps transparents et réfléchissants, par lesquelles les rayons sont rassemblés en un point ou détournés en différentes manière*" le livre VI de son *Traité de la lumière* dont il avait exposé les principaux résultats en 1678 devant l'Académie des Sciences.

Nous n'examinons pas ici le détail de la démonstration mathématique elle-même, remarquable; signalons simplement qu'elle mobilise les découvertes infinitésimales dans la mesure où Newton considère le rapport des variations infinitésimales (*la raison dernière*) du rayon incident et du rayon réfracté et montre qu'il est égal au rapport des sinus, donc donné. La courbe peut alors être construite -mais point par point- sans que l'on en aie une quelconque expression analytique. Sommes nous en mécanique des corps ou en optique? Selon l'énoncé de la proposition, il s'agit du premier cas, mais les corollaires et le dernier scholie traitent d'optique et les schémas font apparaître des angles d'émergence moindres que les incidents. Le fait est que, venant à l'optique et à la réfraction de la

lumière, Newton ôte à la loi des sinus son statut de proposition démontrée pour en faire une... "*Supposition*". La chute est peut-être décevante mais elle est en tout cas conforme avec son statut dans l'*Opticks*

Je remarque donc que la géométrie a servi pour l'administration de la preuve des propositions essentielles de cette section mais que la disposition caractéristique et nécessaire à cette démonstration (l'interface attractive) disparaît au moment de son exploitation physique et optique. Il en ressort qu'à proprement parler, nous n'avons pas -dans cette section- de démonstration de la loi des sinus, puisque celle-ci est externe à son domaine d'application.

La dernière proposition 98, problème 48 introduit en outre, dans le cadre des mêmes suppositions et sans autre forme de procès la notion de *surface attractive*, ce qui confirme notre interprétation précédente du champ de gravitation implicitement généré par une surface de séparation.

Il convient d'insister sur le point suivant: Newton ne dit pas à quoi est égal le rapport des sinus, il s'attache au fait qu'il s'agit d'un rapport constant. Le résultat est donc efficace s'il est couplé à une certaine expérience initiale. Il faut avoir examiné un cas, c'est-à-dire avoir fixé une direction d'incidence et avoir mesuré le rapport des sinus pour, ensuite, être en possession du fameux rapport qui permet de prévoir le chemin de la lumière, quelles que soient désormais les incidences.

TROISIEME MOMENT, LE MOMENT SPECULATIF

Le très bref livre III est suivi de *Questions qui servent de conclusion à tout l'ouvrage*; elles sont rédigées au moins vingt ans après les *Principia*; une partie conséquente des ces questions revient précisément sur le trajet de la lumière sous forme interrogative. "Puisque je n'ai pas fini cette partie de mon dessein, je me contenterai, pour toute conclusion, de proposer quelques Questions qui pourront engager d'autres personnes à pousser plus loin ces sortes de recherches" (Coste, p.503). Il est donc question d'un programme de recherche ouvert pour d'autres; programme qui est singulièrement distinct de ce qui a déjà été fait puisqu'il est orienté dans une direction spéculative et explicative. Programme qui suggérerait donc qu'il est possible d'avancer dans la connaissance de ce qu'est la nature de la lumière. Comme les fameux 'démentis qui confirment', les questions newtoniennes sont de celles qui affirment. D'ailleurs, les réponses explicites à ces questions ouvertes sont -pour certaines- données dans les pages précédentes de l'*Opticks*: ainsi la question IV a-t-elle déjà reçu sa réponse au cours de 5^{eme} proposition fondamentale du livre I (Coste, 88), complétée par la IX^{eme} proposition du livre II, troisième partie (Coste, 316).

Le premier groupe de questions XVII à XX ne constitue pas (même dans une acceptation 'affirmative' de ces interrogations) une théorie de la lumière ni même de sa propagation. Mais -et c'est ce qui m'intéresse ici-, elles proposent une théorie des déviations de la lumière: réflexion, réfraction et diffraction.

Comme une pierre jetée dans un étang excite des ondes à la surface, un rayon de lumière excite des ondes lors de son incidence; c'est ce que suggère la question XVII avant de préciser (en s'interrogeant) un point important, "les rayons font des efforts pour s'éloigner de la partie la plus dense de la vibration". (Coste, 517). Ce n'est pas le milieu atteint par les rayons qui entre en vibration, mais bien le *Milieu Ethérée* (sic) dont l'existence est supposée à partir de la question XVIII:

La chaleur du lieu chaud n'est-elle pas communiquée à travers le vide par les vibrations d'un Milieu beaucoup plus subtil que l'air, lequel Milieu reste dans le vide après qu' on en a pompé l'air? Et ce Milieu n'est-il pas le même que le Milieu qui rompt et réfléchit la lumière et par les vibrations duquel la lumière échauffe les corps et est mise dans les accès de facile Reflexion et de facile Transmission? [...] Et ce Milieu n'est-il pas excessivement plus rare et plus subtil que l'air et excessivement plus élastique et plus actif? Ne pénètre-t-il pas, facilement tous les corps? Et par sa force élastique n'est-il pas répandu dans tous les cieux? (Coste, 518)

Ici comme dans la suite, il est bien clair que l'importance des vibrations et ondulations n'ouvre pas la voie à une conception vibratoire de la lumière; pas plus que l'onde à la surface de l'eau ne confère de caractère vibratoire au caillou qui l'a provoquée. Systématiquement, les éléments sont mis en place qui doivent réaliser deux objectifs: sauver les phénomènes et conforter l'analogie attractive. La question XIX y contribue :

La réfraction de la lumière ne provient-elle pas de l'inégalité des densités de *Milieu éthérée* lesquelles diffèrent selon les différents endroits, la Lumière s'éloignant toujours des parties du milieu qui sont les plus denses? Et sa densité n'est-elle pas plus grande dans les espaces libres et vides d'air^{xxiv} et d'autres corps plus grossiers, que dans les pores de l'eau, du verre, du cristal, des pierres précieuses et d'autres corps compacts?... (Coste 518-519)

Ceci est essentiel: l'inégale densité d'Ether est cause efficiente de la réfraction. Plus elle est grande, plus elle repousse les rayons, or plus dense est le corps lui-même, moins dense est le *Milieu éthérée* qui lui est mêlé. En conséquence, plus dense est le corps atteint, plus fortement attirés sont les rayons. Voilà qui est bien imaginé puisqu'il fallait 'tenir ensemble' plusieurs contraintes assez opposées: ne pas faire vibrer le corps réfringent lui-même; obtenir une déviation supérieure dans les milieux plus denses, et préserver un modèle attractif-répuulsif analogue au modèle dynamique. Une autre caractéristique est nécessaire au bon fonctionnement de cette analogie, la progressivité du phénomène. C'est exactement la fonction de la question XX qui suit:

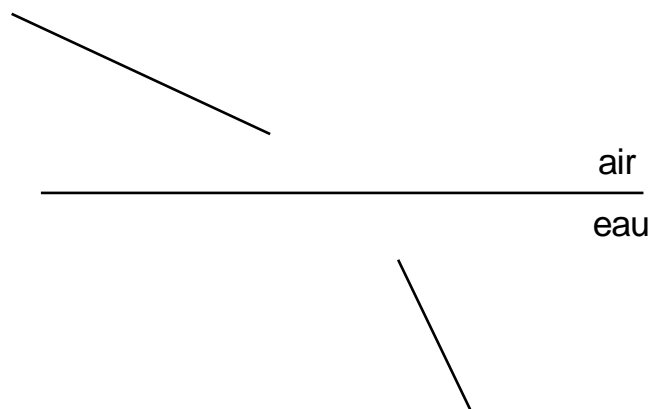
Ce Milieu éthérée passant de l'eau, du verre, du cristal, et d'autres corps denses et compact dans des espaces vides ne devient-il pas toujours plus dense par degrés, et ne rompt-il pas par ce moyen les rayons de lumière, non dans un point, mais en les pliant peu-à-peu en lignes courbes? Et la condensation graduelle de ce milieu ne s'étend-elle pas à quelque distance des corps et ne produit-elle pas par là les inflexions des rayons de lumière, qui, passent près des extrémités des corps denses à quelque distance de ces corps? (Question XX)

Voici donc la clé: autour de la surface de séparation se constitue une interface (un domaine d'activité) où la densité d'Ether est variable et cette variation restitue l'espèce de champ de gravitation que nous avons aperçu dans les *Principia*. La variation de densité est naturellement associée à la distance de la surface de séparation, comme l'exige la modèle de la proposition XCIV des *Principia*. Jusqu'à présent, la démarche Newtonienne a consisté à établir une corrélation entre l'existence d'une interface à densité variable et la modification de la trajectoire lumineuse. Les lieux sont analogues, reste à restituer l'analogie des causes; ce qui n'est fait qu'à la question XXIX. Les questions XXI à XXVII tirent de vastes conséquences possibles de cette hypothèse de l'Ether pour les cieux, puis la vision, pour examiner des phénomènes particuliers et problématiques comme la double réfraction du cristal

d'Islande, pour en déduire des caractéristiques des rayons. La question XXVIII est consacrée à la critique des hypothèses concurrentes, en particulier la théorie ondulatoire de Huygens. L'hypothèse éthérée est donnée comme suffisante pour tous les effets examinés dans son *Optiks*: l'arrêt par un obstacle, la théorie des accès, tous les cas de déviation etc. Newton associe alors étroitement l'hypothèse générale de l'Ether à celle de la gravitation et peut donc avancer, dans la question XXIX, la décisive explication corpusculaire:

Les rayons de lumières, ne sont-ce pas de fort petits corpuscules élançés ou poussés hors des corps lumineux? Car de tels corpuscules passeront bien à travers des milieux uniformes en lignes droites, sans se plier vers l'ombre...Les corps transparents agissent (*ad distans*) en éloignement sur les rayons de lumière en les rompant, les réfléchissant et les pliant: les rayons réciproquement agitent à certaine distance les particules de ces corps pour les échauffer; et cette action et réaction produite à certaine distance ressemble extrêmement à l'attraction réciproque des corps. Si la réfraction est produite par l'attraction des rayons, il faut que les sinus d'incidence soient aux sinus de réfraction en proportion donnée, comme je l'ai fait voir dans les *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*; et cette règle se trouve vérifiée par l'expérience..."

Ainsi, la boucle est bouclée, les rayons obéissent à une loi d'attraction, qui ressemble fort à celle qui préside à la mécanique ordinaire. C'est bien un champ d'attraction qui est reconstitué de part et d'autre de la surface de séparation qui justifie alors son nom de surface attractive. Le modèle mathématique est d'ailleurs disponible: dans les *Principia*. La loi des sinus n'est plus un axiome, mais une nécessité démontrée, ainsi qu'en témoigne l'expression "*Il faut que...*".



Newton répète qu'il n'utilise pas d'hypothèses; prenons donc ses suggestions pour des suppositions judicieusement et rigoureusement organisées qui lui permettent de restituer une théorie multiforme certes, mais somme toute cohérente, depuis sa parabole des *Principia* jusqu'à sa surface attractive de l' *Opticks*. C'est une théorie physique unifiée qui émerge de ces *Questions*.

CONCLUSION NEWTONIENNE:

Les remarques précédentes conduisent -à partir- d'un point très spécifique, à s'interroger sur l'autonomie et l'indépendance des *Principia* et de l'*Opticks*. Pour l'un comme pour l'autre, Newton a affirmé ne pas les faire dépendre d'une hypothèse explicative essentielle. Dans les premiers, ce qu'est essentiellement la gravitation peut rester caché et ignoré comme, dans la seconde, ce qu'est essentiellement la lumière. Ce refus d'une hypothèse explicative générale est sans cesse réaffirmé et

-dans un sens strict- respecté. Cependant, comme l'écrit Cajori, "Newton ne peut pas davantage se dispenser d'hypothèses qu'un aigle ne peut se dispenser de voler"^{xxv}.

Il y a, je crois, un effort en deux directions dans l'établissement de la théorie optique de Newton. La première composante a été largement décrite et étudiée: comment distinguer le degré de certitude des énoncés selon qu'ils sont ou non sous la dépendance du tryptique expériences-raison mathématisante-hypothèse induite et inductrice. Les lois de l'optiques sont supposées être et n'être strictement enfantées qu'ainsi et être démontrées par l'expérience et la raison. La certitude moindre, seulement probable, serait celle que l'on aurait déduit d'hypothèses générales concernant la nature de la chose: ce qu'est la lumière, substance ou accident, onde ou corpuscule. Il répète à l'envi qu'il n'a pas, à leurs sujet, de certitude absolue. mais on a depuis longtemps et souvent montré qu'il est parfois en situation-limite et qu'il est bien proche de contrevenir à ce principe proclamé. l'hypothèse de l'action perpendiculaire dans la réfraction est un quasi équivalent corpusculaire, l'hypothèse de la constitution de la lumière en parties séparées et ultimes (décrite in Sabra, p.288) de même; enfin son rejet lors de chaque examen de l'hypothèse ondulatoire dont il affirme la fausseté donne une valeur de vérité à l'hypothèse concurrence corpusculaire.

Un autre effort me paraît repérable dans l'élaboration de la doctrine optique. Il consiste à penser les lois de la nature comme unifiées, c'est-à-dire valides aussi bien pour les corps de la mécanique que pour les rayons lumineux. Il faut donc établir une analogie étroite, puissante entre ces deux 'choses'. Le principe commun aux termes de cette analogie est l'attraction et elle est si forte que corps et rayons se laissent connaître par les mêmes démonstrations mathématiques. Tout conspire à valider cette analogie à tel point qu'elle devient une identification de nature et qu'il est bien difficile pas lire dans l'*Opticks* une claire affirmation de l'hypothèse corpusculaire. C'est d'ailleurs ce qu'en avaient déjà conclu ses contemporains comme Huygens et Pardies. Sur ce point, A.I. Sabra écrit fort justement:

Si nous sommes prêts à accepter que seuls les énoncés affirmant expressément le caractère corporel (ou ondulatoire) de la lumière peuvent être qualifiés d'hypothèses, alors nous pouvons accepter la revendication newtonienne selon laquelle sa doctrine est vraiment libre d'éléments hypothétiques. Un tel accord ne serait cependant pas utile. Il ferait de nous des victimes de l'illusion qu'en formulant sa théorie en terme de *rayons* au lieu de *corpuscules*, Newton la rend neutre en regard d'une interprétation soit corpusculaire, soit ondulatoire [...] Les rayons furent toujours ceux d'une théorie corpusculaire et explicitement rendus incompréhensibles selon une théorie ondulatoire^{xxvi}.

La théorie ondulatoire et ses succès ultérieurs va structurer durablement la physique toute entière à partir de deux types d'objets fondamentaux: les particules et les ondes. Atomiste, Newton refuse cette dualité des constituants fondamentaux qui nuit à l'unité essentielle de la nature, au delà des variations phénoménales. C'est ce qui est exprimé dans la troisième des *Regulae philosophandi* qui introduisent le livre III des *Principia*:

Certe contra experimentorum tenorem somnia temere consingenda non sunt, nec a naturae analogia recedendum est, cum ea simplex esse soleat et sibi semper consona^{xxvii}.

LEIBNIZ

Il n'existe pas de traité d'optique de Leibniz et ses principaux textes sur le trajet de la lumière sont deux articles des *Acta Eruditorum* de Leipzig, dans l'ordre de parution: "*Unicum opticae, catoptricae et dioptricae principium*" de 1682 et le célèbre "*Nova methodus pro maximis et minimis...*" de 1684. On y ajoutera le *Tentamen anagogicum*, écrit en 1697 et on mentionnera quelques importantes références dans le *Discours de métaphysique* et dans les *Nouveaux Essais*. Il faut aussi signaler un troisième article des *Acta Eruditorum*, *De lineis opticis et alia* publié en 1689 qui traite des courbes optiques et dont les

applications possibles concernent la construction de microscopes et de télescopes. Le sujet sans doute véritable de cet article est cependant de pures mathématiques, les courbes optiques servant de ‘faire valoir’^{xxviii}. Il présente toutefois un intérêt particulier pour cette étude puisque Leibniz indique qu’il l’écrit juste après avoir lu le compte rendu des *Principia*, paru dans les *Acta* de juin 1688 où il a vu que Newton s’était attaqué à *l’explication des courbes catoptriques ou dioptriques* (p. 150).

Il faut mettre en perspective ces textes précis, relativement isolés, avec des considérations bien plus générales de Leibniz à propos de la lumière. S’il n’y a pas de théorie stable et globale de la lumière chez cet auteur, ce n’est pas faute de l’avoir cherchée mais plutôt parce que cet objet s’est imposé comme le modèle de ce qui échappait à l’analyse complète et devait demeurer dans l’ordre de la confuse-clarté.

A l’époque de l’*Hypothesis Physica Nova*^{xxix}, c’est-à-dire en 1687, une théorie de la lumière est avancée, c’est “un mouvement de l’éther, sensiblement rectiligne, très rapide, propagé vers n’importe quel point sensible tout à l’entour” (§30). Comme l’écrit F. Duchesneau, “des arguments à la fois notionnels et empiriques [sont invoqués] pour justifier la propagation à l’infini en toutes directions dans ce milieu fluide et sans résistance”^{xxx}. Sans entrer dans une discussion précise du système imaginé alors par le jeune Leibniz, je signale seulement que la lumière devient la cause générale des effets mécaniques les plus variés de notre monde et -sur ce point essentiel- il est tout proche de Descartes. Le mouvement de l’éther est responsable, à son arrivée sur Terre, de la formation des *bulles* qui ne sont rien moins que

la semence des choses, le tissu des formes, réceptacle de l’éther, la base du corps, cause de la cohésion et fondement de cette si grande variété que nous admirons dans les choses, de ce si grand élan qui nous émerveille dans les mouvements. Si elles faisaient défaut, tout serait sable et chaud, l’éther s’envolerait, expulsé par la rotation des corps denses et notre terre resterait là, morte et maudite.” (§12)

Cette période cosmologique et largement mécaniste de la première physique ne dure pas, comme on le sait. Un second moment de la pensée physique de Leibniz correspond aux travaux de mise en cause des principes cartésiens, de la réforme^{xxxi}. C’est que la connaissance métaphysique générale de la cause mécaniste des phénomènes ne suffit pas et qu’elle a pris -chez Descartes- des formes erronées. La rupture avec le mécanisme n’est cependant pas à l’ordre du jour ainsi que le prouvent les fortes expressions utilisées dans la *Lettre à Hermann Conring* des 19-29 mars 1678:

...je voudrais te faire remarquer seulement que si le monde physique ne pouvait s’expliquer par les lois mécaniques, Dieu même, s’il le voulait, serait impuissant à nous révéler et à nous expliquer la nature. que dira-t-il en effet, je te le demande, au sujet de la vision et de la lumière? Que la lumière est l’acte d’un corps transparent en puissance? rien de plus vrai si seulement cela n’est pas trop vrai. Mais serons-nous par là rendus plus savants? Pourrons-nous expliquer pourquoi la réflexion de la lumière se fait selon les mêmes angles que l’incidence? Pourquoi dans un corps transparent plus dense le rayon est plus infléchi vers la perpendiculaire, ce qui paraissait devoir se passer contrairement? et autre choses de ce genre; quand on en a compris les causes, je trouve que l’on connaît la nature de la lumière. Or qui espérera en expliquer les causes, sinon sous forme mécanique, et par des lois, c’est-à-dire par une mathématique concrète ou géométrie appliquée au mouvement?^{xxxii}

Il faut approcher le *monde physique*, bien plus que ne le permettent les seules considérations et explications métaphysiques et cette approche ne saurait être autre que mécanique et mathématique.

Leibniz travaille effectivement dans ce sens et les manuscrits d'optique réunis et publiés par E. Gerland le montre cherchant les raisons physiques et la mathématique concrète capables d'expliquer la réflexion et la réfraction. Il cherche la *cause prochaine*, la *cause efficiente* qui le rendra plus savant sur la lumière et ses effets. Il faudrait rendre compte des variations de vitesse selon les milieux, des rapport entre les éclaircissements, les résistances, les densités. Cette approche - en ce qui concerne la lumière et ses effets- n'aboutira pas et, de Leibniz, nous ne saurons pas plus sur ces sujets. Les grands travaux de physique d'après la *reformatio*^{xxxiii} ne comportent pas de théorie physique de la lumière. Un texte récemment traduit, annoté et commenté par M. Fichant (daté de 1679 par M.F.) pourra nous renseigner précisément sur la manière dont Leibniz pensait que devait être examinée l'optique, dans le cadre de la *Nouvelle Physique*^{xxxiv}:

Quand on considère le sujet d'un attribut confus, par exemple la lumière, -sa cause ou la façon dont il est produit ou augmenté, -ou le contraire, soit la façon dont il est détruit ou amoindri, - et enfin son effet, on le compare par là même avec l'agrégat de plusieurs autres attributs confus et distincts pris ensemble. Mais on doit considérer avant les autres les attributs distincts, savoir durée, grandeur, figure, mouvement, angle et les autres circonstances, car nous ne pouvons raisonner qu'autant que nous considérons des attributs distincts. L'application de la mathématique à la physique consiste dans cette considération des attributs distincts accompagnant des attributs confus; ainsi, dès lors que nous avons appris que les angles d'incidence et de réflexion des rayons lumineux sont égaux, et que ces angles doivent être pris relativement à la perpendiculaire tombant sur le plan tangent à la surface [de réflexion], nous constituons alors aisément la science catoptrique; semblablement il est besoin de peu d'expérimentations concernant la réfraction pour jeter les bases de la dioptrique. (p.22)

Les textes que je vais examiner ici s'inscrivent donc dans une autre manière de faire de la physique. Ni sous l'égide d'une hypothèse générale totalement explicative, ni grâce aux moyens de l'exploration et de la découverte des réalités intimes et précises, proches et mathématisables qui agissent et interagissent au sein de la matière. Le nouveau programme, celui d'une physique selon les causes finales (qui n'invalident pas la possible recherche et les éventuels succès des efficientes) et selon l'exploitation des connaissances concernant des attributs distincts et annexes est justement annoncé par l'article de 1682, *l'Unicum principium...* A cette même période, précisément, une nouvelle mathématique est née dans son esprit, une mathématique qui s'ajuste si bien au sujet, qu'elle contribue à valider la manière elle-même.

Trois niveaux distincts mais entrecroisés de raisons sont à prendre en considération dans ces textes: celui de la cause finale avec, en particulier, la question assez mal réglée de la détermination; le niveau des mathématiques nouvelles, admirablement adaptées à la description des phénomènes comme des attributs distincts que nous comprenons et aux exigences de la métaphysique; enfin le niveau de la matière et de ses qualités où se cachent les causes secondes et plus proches, si difficiles à connaître qu'il est juste de savoir les congédier lors de certains moments spéculatifs. Je partage aussi en trois l'examen de la question, en insistant sur l'intrication de ces trois niveaux de raisons. En discutant de l'un, on demeure sous l'étroite dépendance des autres. Les textes principaux étudiés présentent respectivement et relativement à ces trois niveaux, une dominante: la *Nova Methodus* est davantage mathématique; le *Tentamen anagogicum* est le plus téléologique et *l'Unicum principium* est le seul où la raison matérielle des choses est explicitement discutée.

LA MATHÉMATIQUE NOUVELLE; LA JUSTIFICATION RECIPROQUE.

La *Nova Methodus...*, est en quelque sorte le manifeste leibnizien du calcul différentiel et le problème de la réfraction y joue le rôle d'exemple probant d'utilisation efficace de cet algorithme nouveau. Le caractère optique de la question y est traité 'comme en passant'. Il s'agit d'employer les règles précédentes (les formules de dérivation) *dans des exemples [...] immédiatement intelligibles*.

Etant donnés deux points C et E et la droite SS dans le même plan nous cherchons quel point F il faut prendre sur SS pour que, une fois tracées CF et EF, la somme du produit de CF par une donnée h, et du produit de EF par la constante r, soit la plus petite possible;

Jusqu'à présent, nous avons à faire à un pur problème de minimum, parfaitement abstrait et sans signification physique; mais, poursuit Leibniz

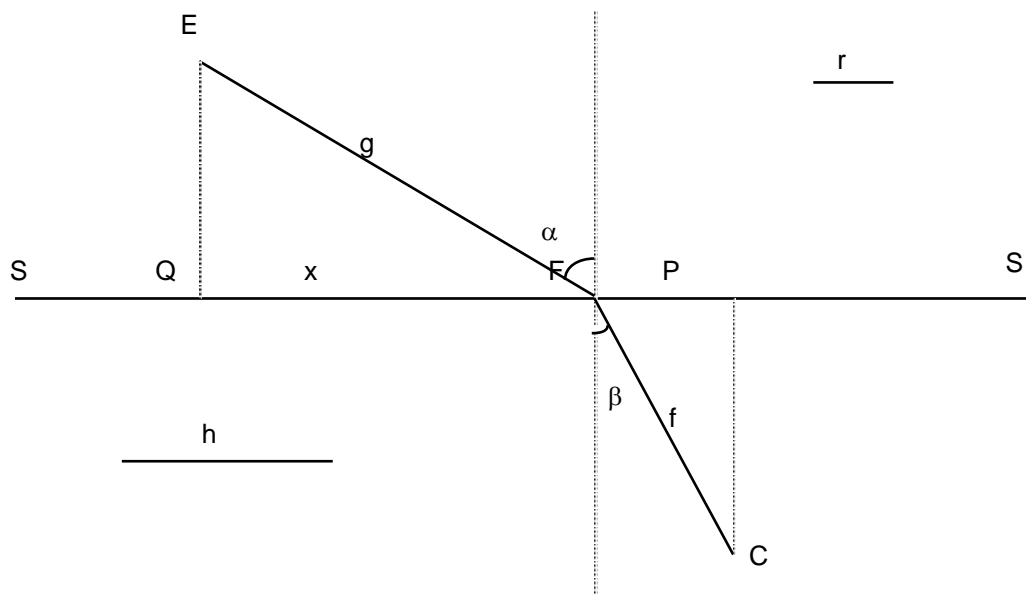
si SS est la frontière entre deux milieux, h représentant la densité du côté de C par exemple de l'eau, et r la densité du côté de E, par exemple de l'air, nous cherchons donc le point F tel que de tous les chemins allant de C à E, celui passant par lui est le plus commode.

On cherche maintenant un certain chemin, le plus commode, qui est justement celui qui correspond à la quantité minimale; il n'est pas encore question ici de lumière et le calcul suivant pourrait tout aussi bien être adapté à la mécanique des projectiles. Le fait est que Leibniz *l'adapte* à la dioptrique où les densités h et r sont *déterminées par la résistance que les milieux opposent aux rayons lumineux*..

Le principe *tiré des causes finales* qui fait l'essentiel de l'*Unicum principium* n'est pas explicite dans cet article de 1684. Il ne s'agit pas d'un article de physique, mais de mathématiques. L'auteur se plaît à souligner combien ses récentes découvertes sont adéquates à la physique convenablement pratiquée, c'est-à-dire aussi bien par les causes finales. La réussite de cette adaptation de l'algorithme aux exigences phénoménales est de grande importance pour Leibniz. Réussir à ériger une démonstration de la loi de la réfraction de cette manière, c'est évidemment et en retour contribuer à valider l'algorithme nouveau. Les applications et généralisations sont d'ailleurs considérables (cf. la remarquable extension donnée par Leibniz dans le *De lineis opticis et alia*, publié en janvier 1689 dans les *Acta*). Lorsqu'il intervient sur la question de la réfraction, Leibniz vient de se doter de l'algorithme de différentiation qui, mathématiquement, permet de découvrir dans toute sa généralité les extrema d'une variation de type fonctionnelle. Si l'efficacité 'pratique' de son algorithme infinitésimal est rendue manifeste, c'est aussi et surtout sa capacité à exprimer, à traduire sa conception métaphysique du monde qui est en jeu. Son nouveau calcul est l'expression symbolique du principe de minimum. Ceci est en parfaite harmonie avec le système général de Leibniz et plus particulièrement avec sa théorie de la création. Les substances venues à l'existence, comme les phénomènes résultent d'un calcul divin. Dieu est en fait le grand calculateur qui optimise le rapport des effets aux causes. Ce calcul ne se fait pas arbitrairement ou de manière contingente. Le monde et ses composants existent d'abord en tant qu'ensemble logique et aussi avec une densité d'être et une harmonie maximales. Il serait contradictoire avec l'infinité de la volonté et de la liberté et de l'entendement divin qu'il en fut autrement. Un phénomène physique doit donc obéir à ce principe d'économie ou de raison suffisante: pas de cause inutile.

Venons-en aux calculs en adoptant le schéma et les notations de la *Nova methodus*...:

Figure 7.



SS est une surface séparant deux milieux de "résistances" différentes notées r et h . Un rayon lumineux va de E en C et coupe la surface en un point F. Le problème revient à connaître l'emplacement de F pour que le chemin soit le plus facile.

Leibniz définit, comme il l'a annoncé une "fonction difficulté":

$$D = EF.r + FC.h.$$

La variable est $x = QF$. Il exprime alors D en fonction des paramètres connus et de x . Les paramètres fixés sont $e = EQ$, $p = QP$, $c = CP$

$$\text{On a donc : } g(x) = (e^2 + x^2)^{1/2} \quad f(x) = ((p-x)^2 + c^2)^{1/2} \quad \text{et} \quad d = g.r + f.h.$$

A ce stade, Leibniz opère la jonction de son principe téléologique et de sa récente découverte du calcul infinitésimal :

Nous en déduisons la démonstration d'un calcul que j'ai déjà donné dans les Acta, en exposant le principe général de l'Optique, de la Catoptrique et de la Dioptrique. Or d'autres très éminents Savants ont dû en passer par de multiples détours pour débusquer des résultats que toute personne accoutumée au présent calcul établira à l'avenir en trois lignes (*Nova Methodus*, p.115)

Il indiquait en effet dans l'*Unicum principium* comment il savait minimiser d en calculant sa différentielle et en l'annulant "Grace à ma méthode de maximis et minimis, qui a l'avantage sur toutes les méthodes connues jusqu'ici de réduire prodigieusement les calculs..."(p.32)

Sans doute songeait-il aux longs et fastidieux calculs de Fermat, qui le rebutèrent lui-même avant qu'il ne vienne à bout de leur difficulté en 1662 (date de la fameuse lettre à Cureau de la Chambre, FO. II, 461-462).

$$d' = f'.h + g'.r$$

$$f'(x) = \left(\sqrt{p^2 + x^2 - 2px + c^2} \right)' = \frac{x-p}{f(x)}$$

$$g'(x) = \left(\sqrt{e^2 + x^2} \right)' = \frac{x}{g(x)} \text{ donc}$$

$$d'(x) = \frac{h \cdot (x-p)}{f(x)} + \frac{r \cdot x}{g(x)} \text{ et } d'(x) = 0 \text{ si et seulement si}$$

$$\frac{h \cdot (p-x)}{f(x)} = \frac{r \cdot x}{g(x)} \text{ or, } \frac{(p-x)}{f(x)} = \sin \beta \text{ et } \frac{x}{g(x)} = \sin \alpha$$

$$\text{On a donc: } r \cdot \sin \alpha = h \cdot \sin \beta \text{ ou } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{h}{r}$$

Le rapport des sinus est donc donné, et en outre égal à l'inverse des résistances des milieux. J'y reviendrai. Si les différences de traitement proprement mathématique sont minimales entre les textes de 1682 et 1684, il n'en va pas de même avec le *Tentamen Anagoricum*. C'est là, en effet que Leibniz réalise une promesse qu'il a faite consistant à généraliser sa démonstration aux surfaces concaves ou convexes. Ceci entraîne la modification des figures et des données mathématiques des articles de 1682 et 1684. Sans doute n'est-il pas nécessaire de suivre tous les calculs dont la plupart ne posent aucun problème particulier; il suffira de commenter les passages où se passe quelque chose de nouveau. Leibniz commence par étudier le cas de la réflexion. C, G et H sont fixés, comme la surface AB (qui n'est pas forcément plane). C est susceptible de variations et c'est justement sa place déterminée qui est cherchée. La clef qui rend possible la généralisation est donnée lorsqu'il écrit que $BP = -y \cdot dy/dx$. Une telle considération n'était pas nécessaire pour une surface plane mais ici, elle est l'expression de la propriété essentielle du fameux triangle caractéristique formé au point de tangence C: que la surface soit plane ou non, le rapport dy/dx est déterminé et égal à BP/BC , soit BP/y (il est négatif car compté *de l'autre côté*). Le traitement de la réfraction est un peu plus complexe mais sans difficulté nouvelle. On a toujours le décisif rapport dy/dx . J'observe cependant que pour conclure son calcul en terme de rapport des sinus d'incidence et de réfraction, Leibniz est amené à considérer le cas où les parcours sont égaux dans les deux milieux (pour des directions d'incidence et de réfraction identiques).

LES CAUSES FINALES OU "CE QUI DOIT ETRE DETERMINE".

Il faut donc se reporter à l'article de 1682 pour trouver, davantage expliquée, la thèse de la moindre difficulté, l'explicitation de la cause finale:

L'hypothèse primaire - écrit Leibniz dans l'*Unicum principium*- commune aux sciences dont nous allons parler, grâce à laquelle toute direction des rayons de la lumière est susceptible d'être déterminée géométriquement, peut être ainsi définie : la lumière émise d'un foyer parvient au point à éclairer par le chemin le plus facile de tous; on doit déterminer ce chemin en ne faisant intervenir d'abord que des surfaces planes, à condition d'ajuster ensuite les résultats au cas des surfaces concaves ou convexes et considérant les plans tangents. Je n'ai pas à tenir compte de certaines irrégularités ayant peut-être leur origine dans la génération des couleurs et dans d'autres phénomènes extraordinaires dont ne s'occupe pas dans la pratique l'opticien (p.31).

Il s'agit bien là d'un problème de physique mais dont la résolution est doublement externe à la physique elle-même: d'abord parce qu'il dépend d'une *hypothèse primaire* qui est au sens propre métaphysique, ensuite parce que la méthode de résolution est géométrique. Les perturbations concrètes sont dans un premier temps écartées pour ne pas gêner l'idéalisation de la situation : ainsi des variations dues aux différences de couleur. On sait qu'à l'inverse, ceci constitue une des principales préoccupations de Newton.

Quant au principe téléologique exploité par Leibniz, il est donc le suivant : *La lumière émise d'un foyer parvient au point à éclairer par le chemin le plus facile de tous.* Cet énoncé est lourd de sens et d'histoire. Dans son acception la plus large, et la plus vague, il peut être considéré comme un héritage de philosophies anciennes. Dieu et de la nature ne font rien inutilement professait Aristote et d'Alembert, après Leibniz, rappelle dans *l'Encyclopédie méthodique* que *Les anciens auteurs d'optique, pour prouver l'égalité des angles d'incidence et de réflexion se sont fondés sur ce principe que la nature agit toujours par les voies les plus courtes*^{xxxv}.

M.Schrecker rappelle cette tradition lorsqu'il affirme qu'

En tant que principe de rationalité de la nature, il (ce principe) se trouve déjà anticipé chez certains présocratiques. Dans le *Timée* de Platon, il se présente sous une forme mythique, comme l'engagement intimé [...] par la téléologie au mécanisme. Et la formule si souvent répétée par Aristote, que Dieu et la nature ne font rien en vain, contient évidemment en germe tout le développement ultérieur. Héron d'Alexandrie, Héliodore de Larisse, Ptolémée et d'autres anciens l'ont déjà appliqué dans l'optique. Les scolastiques -Saint Thomas, Guillaume d'Okham, Suarez- ont adopté la formule aristotélicienne comme point de départ, mais l'ont de plus en plus élaborée, insistant particulièrement sur l'idée que la nature suit toujours les voies les plus simples et les plus aisées et évite la dépense superflue...Les premiers auteurs qui l'ont fait revivre -Leibniz par exemple, et même encore Maupertuis et Euler- avaient nettement conscience de la tradition qu'ils continuaient et que, tout en précisant et en mathématisant la formule qui exprimaient le principe, ils ne le faisaient nullement sortir du cadre dans lequel il était né dans l'antiquité^{xxxvi}.

Quelles sont, précisément les contenus que Leibniz donne à ce trop vague principe?

Dans *l'Unicum principium* c'est l'emprunt, par le rayon, du *chemin le plus facile de tous*. Dans la *Nova methodus*, il recherche le *chemin le plus commode*, celui qui minimise la difficulté. Dans le *Discours de métaphysique*, il se sert du *décret de Dieu de produire toujours son effet par les voyes les plus aisées et les plus déterminées*. (§ XXI), expression exactement reprise en un sens bien distinct (§ XXII): *La voye la plus aisée* est celle des causes finales par laquelle le philosophe parvient à *deviner des vérités importantes*, en l'occurrence à découvrir *la voye la plus aisée ou du moins la plus déterminée pour passer d'un point donné dans un milieu à un point donné dans un autre*. La *voye la plus aisée* est donc un principe méthodologique pour acquérir des connaissances physiques, un principe téléologique absolument général et enfin un effet particulier, à savoir, le chemin déterminé du rayon lumineux. Dans les *Nouveaux essais* (IV-VII-§15), *La nature agit par les plus courtes voyes, ou du moins par les plus déterminées*. Cette dernière formulation signale une évolution, une modification du principe tant il est vrai qu'il ne faut pas prendre l'expression *les plus courtes* à la lettre comme le prouve assez le théorème de la réfraction.

Ces affirmations qui ne sont pas toutes équivalentes ont (en plus de leur justification philosophique) un enjeu historique et polémique puisqu'il s'agit pour Leibniz de se rattacher à une tradition philosophique qui revendique hautement la recherche de la vérité phénoménale par les causes finales. Il cite donc les anciens (Ptolémée, Héliodore de Larisse) mais aussi des modernes (Snellius, Fermat) pour les enrôler dans la critique anti-cartésienne

Nous réduisons donc à la pure géométrie et au calcul, toutes les lois des rayons de la lumière vérifiées par l'expérience, en adoptant un principe unique, tiré de la cause finale, si l'on veut bien considérer correctement les choses: car le rayon issu de C ne délibère pas pour savoir de quelle façon il peut parvenir le plus facilement possible au point E, ou au point D ou au point G et ce n'est pas non plus par soi-même qu'il se dirige vers ces points, mais c'est l'auteur de toutes choses qui a créé la lumière, de telle façon que de sa nature découle ce résultat, le plus beau qui soit. C'est pourquoi ils se trompent gravement, pour ne pas les juger plus sévèrement ceux qui avec Descartes rejettent de la physique les causes finales; alors que cependant, outre l'admiration pour la sagesse divine, elles nous fournissent un très beau principe pour trouver également les propriétés de ces choses dont la nature profonde ne nous est pas encore si clairement connue que nous soyons capables de nous servir des causes efficientes prochaines et d'expliquer les ouvrages que le Créateur a mis en œuvre pour produire ces effets et arriver à ses fins. Nous nous apercevons donc aussi que les réflexions des anciens également sur ces sujets ne doivent pas être méprisées au point où il le paraît aujourd'hui à certains (*Unicum principium*, p.33).

Chasser les causes finales pour n'admettre que les efficientes, un *credo* du mécanisme cartésien revient à restreindre nos domaines de connaissance.

Le principe téléologique général reçoit donc des contenus variés : Fermat, on le sait, a proposé un principe général de minimum de temps qui lui permit d'ailleurs de retrouver, avec surprise, le résultat de Descartes. Sa conviction à le défendre n'est pourtant pas toujours acharnée; ainsi écrit-il à Clerselier

Pour la question principale, il me semble que j'ai souvent dit à M. de La Chambre et à vous que je ne prétends ni n'ai jamais prétendu être de la confidence secrète de la nature. Elle a des voies obscures et cachées que je n'ai jamais entrepris de pénétrer; je lui avais seulement offert un petit secours de géométrie au sujet de la réfraction, si elle en eût besoin^{xxxvii}.

Leibniz construit la quantité qui doit être rendue minimale -ou déterminée- Il ne peut s'agir du seul parcours -ce qui conviendrait bien à la trajectoire sans réfraction mais pas à la réfraction : la lumière ne va pas en effet d'un point à un autre en ligne droite. Le principe de Fermat du temps minimum semble impliquer une vitesse moindre dans les milieux plus denses, point sur lequel Leibniz s'en sépare: ce n'est donc pas la durée du trajet qui doit être minimisée. La considération des vitesses va même être écartée du raisonnement de Leibniz: ce qu'il va minimiser, ce qui donc déterminera le "*Chemin le plus facile*" est ainsi défini :

Les difficultés du chemin dans les différents milieux sont en raison composée et de la longueur des chemins et de la résistance des milieux (*Unicum principium.*, p.32)

On sait que cette proposition a alimenté la vigoureuse discussion sur la paternité du *Principe de moindre action* (l'action étant le produit de la masse des corps, par leur vitesse et par l'espace qu'ils parcourent), énoncé peu après par Maupertuis qui soutient qu'il est aussi valide pour le chemin de la lumière^{xxxviii}. Je n'en dirais pas plus.

Leibniz revient longuement sur le principe de détermination dans le *Tentamen anagogicum*. de 1697 qui pose de ce point de vue quelques problèmes. Préciser la notion de *détermination* (ici elle concerne le chemin) est le second des deux objectifs visés par ce texte; le second consistant à valider les lois de

réflexion et de réfraction lorsque les surfaces de séparation sont courbes (voir supra). La difficulté ne réside pas tant par les explications théoriques qu'en donne Leibniz: il explique tout-à-fait clairement la supériorité de ce concept sur celui de minimum et sa meilleure conformité au nouveau calcul. En effet, l'annulation de la dérivée conduit à la découverte des extrema et pas forcément des minima et, dit Leibniz, les uns et les autres sont équivalents, du point de vue de la détermination.

Aussi est-il remarquable que dans l'Analyse *de maximis et minimis*, c'est une même opération pour le plus grand ou pour le plus petit sans qu'on les distingue que dans l'application aux cas divers, parce qu'on cherche toujours le plus déterminé en grandeur, qui est tantôt le plus grand, tantôt le plus petit dans son ordre ...^{xxxix}

Le problème réside dans la confusion où nous restons à savoir *ce* qui doit être déterminé. Pour la réflexion, la quantité déterminée est donnée par l'expression $m = CF + CG$, c'est à dire ici la seule considération du parcours du rayon, *parce qu'on cherche toujours le plus déterminé en grandeur* (p.99). Je souligne qu'il n'y a aucune spécification de temps. Pour la réfraction la quantité est donnée par $m = f.CF + g.CG$, où f et g sont les résistances des milieu; à ce stade nous ne pouvons que remarquer l'absolue conformité avec les textes de 1682 et 1684. La surprise vient de l'affirmation selon laquelle "le rayon rompu arrive toujours du point d'un milieu, au point de l'autre milieu par le chemin le plus déterminé ou l'unique, qui pour ainsi dire n'a point de frère jumeau, en longueur de temps, ce que je ne me souviens pas d'avoir vu observé ailleurs" (p.100). Il persiste en remarquant que ceci reste valable pour la réflexion (ce qui est évident) et demeure valable "sans qu'on distingue dans cette détermination le temps le plus long ou le plus court. Quoiqu'il est le plus court en effet, à l'égard de ce qui doit servir de règle, c'est-à-dire du plan tangent" (p.102).

Examinant ce passage, Madame S. Bachelard, tout à sa surprise, affirme que

Cette simple précision renverse, en réalité, toute l'explication physique de la réfraction, telle qu'elle était exposée dans les *Acta de Leipzig* et, en particulier l'affirmation que la vitesse de la lumière est *directement proportionnelle* à la résistance des milieux^{xl}.

L'affirmation d'un principe de minimum de temps est assénée *ex nihilo* et ne présente aucun caractère convaincant. Comparons les deux fonctions 'en compétition': celle de 1682 et 84 et celle qui exprime le temps.

la première est $d(x) = r.FE + h.FC$

La seconde se construit naturellement ainsi: on note v_a la vitesse dans l'air et v_e la vitesse dans l'eau.

Le temps de parcours est alors $t(x) = FE/v_a + FC/v_e$.

Il est clair, et l'annulation des dérivées y conduit directement, que les vitesses jouent un rôle strictement inverse à celui des résistances et que de conserver les deux démarches (comme Leibniz le fait dans le *Tentamen* conduit à:

$r/h = v_e/v_a$. Les vitesses sont inversement proportionnelles aux résistances.

Mais, cette fois encore, la vitesse du rayon ne joue aucun rôle dans le calcul, pas plus -justement- que dans les calculs de 1682 et 1684. C'est d'ailleurs une caractéristique de ces raisonnements, qu'ils sont, par eux-mêmes, neutres sur les spécifications physiques et matérielles de cette loi. Quelle conclusion en tirer? la première est que les considérations sur les vitesses dans les milieux plus ou moins denses, plus ou moins résistants sont indépendantes des modes de démonstrations leibniziennes (et ce depuis

le début, soit 1682) la seconde que le principe de la détermination du temps, exposé en 1697 est *gratuit* puisqu'il arrive sans justifications et qu'il reste sans conséquences explicites. Madame Bachelard a certainement raison d'écrire qu' "il semble que Leibniz, une fois sa méthode *finaliste* sanctionnée par le succès, accorde moins d'importance aux spécifications de ce finalisme" (p.30). Mais, ajouterais-je, c'est qu'en réalité Leibniz *n'explique pas* le phénomène de la réfraction.

TROP CACHEES POUR ETRE CERTAINES; LES CAUSES PROCHES.

Il me faut enfin examiner les grandes absentes de la *démonstration* de la loi des sinus, soit les relations existantes entre les divers paramètres en cause dans le problème de la réfraction: la vitesse de la lumière dans les milieux, leur densité, leur résistance aux rayons, leur aptitude à être éclairés. Sur ce point, Leibniz, comme tous ses contemporains restent dans l'ignorance et leurs opinions sont complètement divergentes, ce qui n'a rien d'étonnant puisqu'il faudrait, pour y remédier, connaître les rapports intimes de la lumière à la matière qu'elle traverse. Si elles n'interviennent pas -à proprement parler- dans la phase démonstrative, elles sont mentionnées (et même avec une certaine précision) dans l' *Unicum principium*.

La subtilité des arguments leibniziens ne masque pas, sur cet aspect de la question, les difficultés qu'il rencontre et un certain arbitraire de sa solution. Restituant la thèse leibnizienne sur les rapports des densités, des résistances et des vitesses selon les milieux, telle qu'elle est exposée dans le *Unicum principium*, Euler a trouvé d'heureuses formules critiques

[Son explication semble s'accorder avec celle de Fermat, mais] elle est interprétée avec une subtilité si merveilleuse, qu'elle lui est diamétralement opposée et qu'elle s'accorde avec celle de Descartes. Car, quoique Leibniz ait supposé la résistance du verre plus grande que celle de l'air, il prétend cependant que les rayons se meuvent plus vite dans le verre que dans l'air; et pour cela même que la résistance du verre est plus grande: ce qui, assurément est un insigne paradoxe^{xli}.

Quoiqu'il en soit, il est remarquable que Leibniz, dans les divers lieux où il énonce synthétiquement la loi de la réfraction, évite de mentionner les rapports de vitesse et s'en tient à la formule selon laquelle les sinus sont en raison inverse des résistances.

La question se pose de savoir ce que sont les constantes de réfraction des milieux. Sur ce point, nous l'avons vu, Leibniz se montre assez hésitant et se contredit de fait. En 1682, il les définit comme "*résistances des milieux à la lumière*" et en 1684, ces constantes sont les "*densité des milieux*" l'auteur ajoutant cependant qu' "*il ne faut toutefois pas considérer que cette densité est déterminée à notre guise, mais par la résistance que les milieux opposent aux rayons lumineux*". Ce qui est affirmé dans l'*Unicum principium* est donc ceci: un rayon émis dans l'air et se réfractant dans l'eau (ou le verre ou tout autre milieu plus dense) obéit à la loi $\sin i / \sin r = n/m$, où n et m représentent respectivement les résistances de l'eau et de l'air à la lumière. Il doit tenir ensemble deux affirmations aux conséquences paradoxales. La première est qu'il y a plus grande résistance dans l'eau que dans l'air (ceci est *plus conforme à la raison*). La seconde est que la lumière va plus vite dans l'eau que dans l'air (à cause du rapprochement du rayon réfracté de la perpendiculaire et de l'analogie cinématique de la balle ralentie lorsqu'elle s'en écarte). Il lui faut donc réussir à conclure que la lumière va plus vite dans les milieux qui lui résistent davantage! En outre, il faut que l'accord qui semble se faire sur ce point avec Descartes invalide les raisons cartésiennes (c'est la première des deux propositions qui sépare Leibniz de Descartes). Le milieu le plus résistant empêche la diffusion de la lumière, l'effort est ainsi plus concentré et la rapidité ou l'impulsion croissent en raison inverse des résistances (cqfd!).

On a donc: $\sin i / \sin r$ = résistance de l'eau/résistance de l'air (ceci est démontré, mais sans définition précise de la résistance) et

résistance de l'eau/résistance de l'air = vitesse dans l'eau / vitesse dans l'air. (ceci résulte de propositions non démontrées).

Ce qui importe est de bien observer que ces considérations sont exclues des passages démonstratifs; elles accompagnent celui de 1682 sans interférer avec lui. Quel sort réserver alors au changement de doctrine du *Tentamen*? Il demeure sans effet sur la valeur (et les insuffisances) des démonstrations de la loi des sinus mais il confirme la distance prise avec les considérations sur les relations efficientes entre la lumière et la matière. La preuve en est que l'auteur ne tire aucune conclusion de cette sorte de la modification qu'il a apportée à son principe finaliste.

CONCLUSION SUR LEIBNIZ.

Ce qui m'importe ici est de pouvoir souligner la position du problème de la réfraction dans le dispositif leibnizien. Ce n'est pas un point central de sa physique mais un point de rencontre essentiel entre physique et métaphysique. Son exploitation sert à établir une continuité de l'une à l'autre: celle-ci s'impose comme une nécessité pour celle-la (sans sources métaphysiques, sans principe architectonique, on ne viendrait pas à bout du problème) et en retour, le succès de la résolution donne un argument puissant en faveur des principes *sublimes*.

Est-ce à dire que toute théorie ou conception générale de la lumière a disparu chez Leibniz? Sans doute non mais la preuve est faite qu'une telle hypothèse (ou connaissance) générale n'est pas nécessaire à la connaissance des phénomènes. Quant à dire ce qu'est devenue la lumière leibnizienne dans la doctrine finale, il faudrait d'abord reconnaître qu'elle s'est quelque peu dématérialisée. La thèse du continu actuel et surtout celle de la substance métaphysique ont rendu vaine la recherche de quelque élément ultime de la matière que ce fût, même l'éther. La nature de la lumière, comme objet physique réel dépasse de toute manière nos possibilités d'analyse.

Tous les phénomènes naturels se pourraient expliquer mécaniquement, si nous les entendions assez; mais [...] les principes mêmes de la mécanique ne sauraient être expliqués géométriquement, puisqu'ils dépendent des principes plus sublimes, qui marquent la sagesse de l'auteur dans l'ordre de la perfection de l'ouvrage^{xlii}.

La lumière alimente une réflexion sur les genres de nos connaissances: celles que nous avons des qualités sensibles (comme la lumière et les couleurs) sont à la fois claires et confuses puisque nous les pouvons distinguer certainement d'autres objets, sans pour autant que l'on puisse énumérer les caractères suffisants de cette distinction; *on ne distingue pas ce qu'elles renferment*^{xliii}. Au final, la prééminence donnée dans l'univers à l'infinité continue des substances percevantes et aux perceptions phénoménales semble pouvoir rendre le premier rôle à la lumière. Mais il ne s'agit plus de la lumière substance ou corps extérieur de l'*Hypothesis Physica Nova*; la lumière n'est plus la même, elle est devenue le principe dont résultent les phénomènes, la *matière des images*^{xliiv}.

CONCLUSION

Cette loi de Descartes dont j'ai examiné d'assez près le traitement par Newton et Leibniz fut importante avant eux, et le demeura après. Disons que depuis Kepler, jusqu'à

Maupertuis et Euler, elle ne cesse d'alimenter les avancées et les controverses. Je crois qu'à travers les deux exemples ici traités, il est possible de constater les raisons extrêmement différentes qui peuvent justifier pareil intérêt.

Pour Newton, cette loi est comme une preuve qu'il est possible de concevoir une physique unifiée, une philosophie naturelle ; elle est un cas privilégié où se manifeste cette possible unification. A partir de phénomènes de nature différente (il nous le répète à l'envi, les rayons sont des choses sur la nature desquels il ne se prononce pas dans le traitement mathématique et expérimental qu'il en fait), il souhaite administrer la preuve qu'il est possible d'exploiter des analogies grâce auxquelles le mouvement et la trajectoire de la lumière relèvent des mêmes équations que celles de la balistique (à certaines adaptations près comme la vitesse selon les densités, adaptations qui ne font que respecter les distinctions des différents domaines de la philosophie naturelle).

Cette preuve de la continuité pour ne pas dire de l'unité de la physique newtonienne, preuve que le traitement de la loi des sinus renforce, est manifeste dans le va-et-vient entre les textes, et spectaculairement entre l'*Opticks* première version, les *Principia* et les *questions* rajoutées à l'*Opticks*.

Ce problème est bien entendu aussi l'occasion, pour Newton, d'exposer sa conception des hypothèses à faire ou à ne pas faire en physique. L'idée centrale -mais elle est bien connue- est d'éviter toute hypothèse qui échapperait à l'expérimentation et à la mesure. Que cette caractérisation soit trop vague pour être vraiment discriminante entre les hypothèses acceptables et celles qui ne le sont pas; qu'en outre Newton contrevienne parfois à cette règle en sous estimant l'ampleur -implicite- de certaines hypothèses acceptées (exemple de la prop. 10 de l'*Opticks*), rend plus intéressant encore l'examen de ce point particulier de la physique newtonienne dans la mesure où ces faiblesses y sont particulièrement sensibles.

Enfin, puisque les preuves de cette affaire sont essentiellement mathématiques, il faut en dire un mot pour observer le classicisme extrême de ses démonstrations. Dans leurs parties développées, elles sont euclidiennes et galiléennes et dans leurs parties allusives, elles ne font que signaler les exigences nouvelles de la physique-mathématique de cette deuxième moitié de XVII^e siècle, à savoir les passages à la limite, les situations différentielles et le traitement du continu à partir du discret. J'ai relevé le contraste entre le caractère simplement suggestif et intuitif des manières newtoniennes et les efforts déductifs et algorithmiques des quasi-contemporains sur des questions très proches.

Pour Leibniz, il en va tout autrement et je ne saurais comment placer sa démonstration de la loi des sinus dans ses travaux de physique; je ne vois pas bien quels concepts centraux de celle-ci sont mobilisés ou forgés à cette occasion. Je sais qu'on a beaucoup discuté de la présence du concept d'action en cette affaire, mais à aucun endroit dans les

textes où celui-ci est constitué, mention n'est faite de la *difficulté* du parcours lumineux, ni inversement.

Par contre, cette loi est le prototype leibnizien d'une physique mise sous la juridiction de la métaphysique. C'est l'exemple, *l'échantillon* du dévoilement (plutôt que de l'explication) de secrets de la nature par l'usage des causes finales. Pour cette raison, et bien qu'elle ne s'insère pas dans un véritable traité d'optique, elle n'est certainement pas marginale. On pourrait dire que l'étude de la réfraction par Leibniz n'est d'aucune utilité dans la physique leibnizienne, du moins d'aucune utilité directe puisqu'elle n'a pas de prolongement en mécanique, en dynamique et elle n'est pas l'occasion d'études approfondies sur la lumière comme phénomène physique complexe (couleurs, double réfraction, diffractions...) Mais elle a un rôle méthodologique éminent puisqu'elle contribue à réhabiliter la physique *selon les principes architectoniques*.

On doit ajouter, bien sûr, que contrairement à Newton, Leibniz brandit, à l'occasion de la loi de Descartes, une mathématique de rupture. *L'économie de pensée* ou du moins de papier réalisée par la mise en œuvre de l'algorithme différentiel est saisissante. Bien entendu, il exige de ses lecteurs deux actes de foi : dans sa version du principe de minimum ainsi que dans la légitimité de son usage d'une part, et dans la justesse et le bien fondé de son nouveau calcul d'autre part. C'est beaucoup en effet, mais la récompense n'est pas négligeable quand on réalise l'aisance, l'élégance et la puissance des procédés mathématiques. N'oublions pas que -justement- Leibniz a en tête une évolution inverse: c'est en considérant la qualité et les vertus du résultat que l'on pourra se convaincre de la justesse des méthodes (les causes finales et le fondement du calcul). Au propre, il s'agit bien d'un échantillon puisque les exploitations de cette loi, par des méthodes mathématiques différentielles, et par les émules de Leibniz ne tarderont pas à faire les beaux jours des *Acta*.

Pour Newton, c'est donc assez de savoir comment agit la lumière, selon quelle analogie avec des phénomènes par ailleurs fort précisément décrits; pour Leibniz, c'est assez de savoir pourquoi elle agit, selon des principes métaphysiques par ailleurs fort puissamment argumentés. Pour chacun d'eux, il s'agit de connaître le comment et le pourquoi de cette action en acceptant de rester muet, ou ignorant quant au véritable sujet de cette action. Il est clair que ni Newton, ni Leibniz n'ont élucidé les rapports intimes entre la structure même des milieux et le déplacement de la lumière. Ni l'un, ni l'autre ne disent -à cette occasion- ce qu' elle est. L'un Newton reste en quelque sorte en deçà, dans l'affirmation d'une analogie qui l'autorise à employer une causalité efficiente, l'autre, Leibniz raisonne au delà du sujet, soumettant la lumière à un super *Unicum principium* qui la gouverne sans la faire connaître.

L'importance des causes finales en physique est réaffirmée avec beaucoup d'insistance par Leibniz dans de nombreuses œuvres

Il est évident que la cause finale est utile en physique et qu'elle sert à découvrir des vérités cachées" ^{xlv}.
Même si La voie des causes efficientes...est plus profonde en effet et en quelque façon plus immédiate et à-priori, (elle) est en récompense assez difficile quand on en vient au détail...mais la voies des finales est plus aisée et ne laisse pas de servir souvent à deviner des vérités importantes et utiles qu'on serait bien longtemps à chercher par cette autre route plus physique..."^{xlvi}

Il n'est sans doute pas faux d'opposer à celle-ci la réponse newtonienne devant la faiblesse du mécanisme radical. Tournant le dos à la déduction rationnelle, d'essence strictement mathématique, il s'affirme partisan d'une méthode inductive, elle aussi de nature mathématique. C'est à partir d'observations et d'expériences mesurées que l'on peut

raisonner sur les phénomènes, sans feindre d'hypothèses et déduire les causes des effets jusqu'à ce que nous arrivions à la toute première cause, laquelle certainement, n'est pas mécanique"^{xlvii}.

Grace à la structure mathématique sous-jacente de la philosophie naturelle, nous pouvons savoir quelque chose de la nature quoiqu'en restant ignorant de ses principes premiers.

La mathématisation de la physique est la voie commune des deux savants, mais là où Newton fait des mathématiques pour valider sa physique, Leibniz se fait physicien pour affermir et valider ses mathématiques.

ⁱDescartes, *La Dioptrique, Discours II, A.T. VI*, p.103.

ⁱⁱ Les conceptions newtoniennes de la lumière furent d'abord présentées dans une lettre du 6 février 1672 à Holdenburg, secrétaire de la Royal Academy, publiée dans les *Philosophical Transactions*, le 19 février de la même année. Il publie, en 1704 son *Opticks* qui connaît plusieurs rééditions du vivant de l'auteur (1706 en latin, 1717 seconde édition anglaise). 16 des *Questions* ajoutées à la fin sont dans la première édition anglaise, 23 sont dans l'édition latine et 31 dans celle de 1717. Comme on le verra dans cet article, il convient de prendre en compte une section des *Principia* si l'on veut comprendre sa démonstration de la réfraction.

Les citations que je fais de l'*Opticks* le seront à partir du *Traité d'optique*, traduction française de M. Coste, sur la seconde Edition Anglaise, Seconde édition française, Paris, Montalant, 1722.

Pour une étude détaillée des travaux newtoniens cf.

A.I. Sabra, *Theries of Light from descartes to Newton* (1967), Cambridge University Press, 1981.

A. Koyré, *Etudes newtoniennes*, ed. française, Paris, Gallimard, 1968.

Michel Blay, *La conceptualisation newtoniennes des phénomènes de la couleur*, Paris, Vrin, 1983.

ⁱⁱⁱ Voir, en particulier (infra) la *Question XXVIII* du Livre III les impassaes de la théorie ondulatoire, selon Newton. "D'après Newton, si la lumière était constituée d'ondulation ou de vagues, elle contournerait les angles", Koyré, *Etudes newtoniennes*, note 70, p.81

^{iv} Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), *Physico-Mathesis de lumine, coloribus et Iride*, Bologne, 1665.

^v Huygens, *Traité de la lumière*, Leyde, 1690, rééd. par M. Blay, Paris, Dunod, 1992.

^{vi} Cette façon s'oppose bien entendu à la doctrine cartésienne de la science et on verra ainsi un strict cartésien -Clerselier- refuser la 'paix des braves' que lui proposait Fermat après qu'il ait démontré sa loi de la réfraction, en ces termes: "Le principe que vous prenez pour fondement de votre démonstration, à savoir que la nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus simples, n'est qu'un principe moral et non point physique, qui n'est point et qui ne peut être la cause d'aucun effet de la nature", Clerselier à Fermat, 6 mai 1662, *Œuvres de Fermat*, ed. Henry et tannery, 4 vol., Paris, 1891-1912, (F.O), II.465.

^{vii} A. Koyré, "L'hypothèse et l'expérience chez Newton", in *Etudes newtoniennes*, p.53-84.

^{viii} Fermat, lettre à M^{***}, 1664, F.O. II, p. 485 et p. 487-8.

^{ix} M. Guérout, "Note sur le principe de moindre action chez Maupertuis", in *Dynamique et métaphysique leibniziennes*, Paris, Belles lettres, 1934, p.215.

^x On se reportera pour cela aux excellents travaux de I.E. Sabra et de M. Blay (op. cit.)

^{xi} Alexandre Koyré relève que "l'explication de la réfraction et de la réflexion totale, à partir du concept d'attraction, a été développée par Newton dans les *Principia* (Livre I, sect. XIV)" in *Etudes Newtoniennes*, note 85, p. 83.

^{xii} Newton, *Avertissement à la première édition de l'Optique de 1704*.

^{xiii} C'est ce qu'a montré M. Blay dans son analyse de cette fameuse 'expérience cruciale'.

^{xiv} Le chapitre IX du livre de Sabra donne sur ce point nombre d'arguments et informations concordants.

^{xv} La démonstration est restituée et analysée par Sabra, p. 305-308.

^{xvi} M. Coste, p.89

^{xvii} Voir figure 1.

^{xviii} Galilée, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, Introduction, traduction, notes et index par M. Clavelin, rééd. Paris, PUF, 1995, p.205 sq.

^{xix} Dans son article "La modèle mécaniste de la réfraction", *Revue d'Histoire des Sciences*, tome XL-3/4-1987 (311-323), Christine Vilain mène une analyse précise du problème sous-jacent posé par ce paramètre qui semble singulariser la parabole trajectoire, alors que, les variations de l'angle d'incidence déterminent une famille de paraboles distinctes (ce qui renvoie à un classique problème d'artillerie). Elle montre qu'en fin de compte, le rapport des sinus, et le paramètre en question sont bien constants si le module de la vitesse et l'accélération (la force du champ) sont donnés. La démonstration newtonienne est donc juste et convaincante quoiqu'incomplète observe-t-elle en conclusion.

^{xx} Cas 2. de la proposition XCIV.

^{xxi} Une démonstration analytique rigoureuse du théorème newtonien peut être rédigée ainsi:

Soit m la masse d'un point matériel M , soumis à une force $F(M) = f(OM, j)$.

f est continue; F est sa primitive nulle en 0. Le 'loi de Newton' donne alors:

$$m \cdot \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} = f(\vec{OM}, \dot{\vec{M}})$$

d'après les conditions initiales $(\vec{OM})_0 = \vec{OM}_0$ et $\left(\frac{d\vec{OM}}{dt}\right)_0 = \vec{V}_0$

on alors: sur l'axe des x: $m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = 0$ et $\left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = \|\vec{V}_0\| \cdot \sin r_0$,

qui est la vitesse constante de M sur cet axe.

sur l'axe de y, on a : $m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = f(y)$ avec $y(0) = 0$ et $\left(\frac{dy}{dt}\right)_0 = \|\vec{V}_0\| \cdot \cos r_0$

Par intégration, entre 0 et τ , on obtient:

$$\int_0^\tau m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} \cdot \frac{dy}{dt} = \int_0^\tau f(y) \cdot \frac{dy}{dt} dt \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{2} m \left[\left(\frac{dy}{dt}\right)_\tau^2 - \|\vec{V}_0\|^2 \cdot \cos^2 r_0 \right] = \int_{y(0)}^{y(\tau)} f(y) \cdot dy = F(y(\tau))$$

Si M atteint le plan P_1 en M_1 à l'instant τ_1 avec la vitesse \vec{V}_1 alors on a $y(\tau_1) = e$ et

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\tau_1} = \|\vec{V}_1\| \cdot \cos r_1$$

$\|\vec{V}_1\|^2 \cdot \cos^2 r_1 = \frac{2}{m} F(e) + \|\vec{V}_0\|^2 \cdot \cos^2 r_0$ et en tenant compte de

$$\|\vec{V}_1\| \cdot \sin r_1 = \|\vec{V}_0\| \cdot \sin r_0 \quad \text{on a : } \|\vec{V}_1\|^2 = \frac{2}{m} F(e) + \|\vec{V}_0\|^2$$

et finalement:

$$\frac{\sin r_1}{\sin r_0} = \frac{\|\vec{V}_0\|}{\|\vec{V}_1\|} = \frac{\|\vec{V}_0\|}{\sqrt{\frac{2}{m} F(e) + \|\vec{V}_0\|^2}} \quad \text{qui est bien indépendant de } \|\vec{V}_0\|$$

Je remercie Jacques Gapillard pour les notes synthétiques suggérées après une discussion sur le sujet, à Nantes il y a déjà quelques années.

^{xxii}Descartes, *La Dioptrique, Discours II*, A.T. VI, p.103.

^{xxiii}Proposition VI, Livre I, Coste, p.89.

^{xxiv}Cette traduction est étrange puisqu'elle semble désigner des espaces dont l'air est ôté alors qu'il s'agit très clairement des *espaces libres et vides de l'air* et des autres corps... Marat et Coste l'adoptent cependant tous les deux.

^{xxv}Edition par Florian Cajori de la traduction anglaise des *Principia* par Andrew Motte, Berkeley, 1960, note 55 de l'édition Cajori, p.674.

^{xxvi}Sabra, p.287-288. Je traduis.

^{xxvii}*Principia* ed. latine, p.388. Cajori, p.398-399.

^{xxviii}Les références de ces écrits sont les suivantes:

"Unicum opticae, catoptricae et dioptricae principium", *Acta Eruditorum*, 1682, traduction de S.Bachelard, in *Thales*, 1958, t.9.

"Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quæ nec fractas nec irrationales quantitates moratur et singulare pro illis calculi genus", *Acta Eruditorum*, 1684, in *Naissance du calcul différentiel*, Paris, Vrin, 1989, p. 96-117.

Tentamen anagogicum ou *Essay anagogique dans la recherche des causes*, écrit en 1697, *Die philosophischen Schriften*, éd. Gerhardt, Berlin, 1890, t.VII, p.270-279.

"De lineis opticis et alia", *Acta Eruditorum*, 1689, in *Naissance du calcul différentiel*, Paris, Vrin, 1989, p. 144-153. Voir la présentation qu'en fait M.Parmentier aux pages 147-149.

^{xxix} Ce texte est traduit en français dans "Lettres et opuscules de Physique et de Métaphysique du jeune Leibniz, *Science et Technique en Perspective*, Univ. de Nantes, vol.6, 1984-1985.

^{xxx}F. Duchesneau, *La dynamique de Leibniz*, Paris, Vrin, Mathesis, 1994, p.74.

^{xxxi}Les œuvres de cette *Reformatio*, autour de 1678 vont du *Pacidius Philalethi* (1676), au *De corporum concursu* (1678) elle est prolongée dans la *Brevis demonstratio*.

^{xxxii}A Conring, in *Leibniz, œuvres*, édité par Lucy Prenant, Paris, Aubier, 1972, p.125

^{xxxiii}*Phoronomus* (1689), *De causa gravitate* (1690), *Dynamica de potentia* (1689-90), *Premier Essay de dynamique* (1692), *Animadversiones in partem generalem...*(1692) *Specimen dynamicum* (1695), *Essay de dynamique tardif* (1700)..

^{xxxiv}"Pensées sur l'instauration d'une nouvelle physique", in *Philosophie*, n°39, septembre 1993, p.7-26.

^{xxxv}D' Alembert, Article "Réflexion", *Encyclopédie méthodique*, rééd. ACL, Paris 1989, T.III, p. 737.

^{xxxvi}P. Schrecker, "Notes sur l'évolution du principe de moindre action", *Isis*, n°89, sept. 1941, p. 329-330. P.Boutroux cite l'appréciation délicate portée par Huygens à l'encontre de ce pitoyable axiome, par lequel je n'ai jamais vu qu'on ait démontré aucune vérité, "L'histoire des principes de la dynamique avant Newton", *Revue de métaphysique*, 1921, p.674.

^{xxxvii}A Clerselier, le 21 mai 1662, FO. II, p.483-484.

^{xxxviii}Une vaste littérature s'est développée pour savoir si la version leibnizienne n'était pas déjà l'expression du "Principe de moindre action" de Maupertuis et une retentissante polémique sur cette question mis aux prises ce dernier avec König et Voltaire. Cf. sur ce point l'article de Madame S. Bachelard, "Maupertuis et le principe de moindre action", in *Thales*, 1958, t.9, p.3-30.

^{xxxix}*Tentamen Anagogicum*, p.98.

^{xl} S. Bachelard, p.29.

^{xli} Euler, *Sur le principe de moindre action*, t.VII de l'Académie de Berlin, p.205-206.

^{xlii} *Tentamen Anagoticum*, (1697), p.95-96.

^{xliii} N.E., II, XXIX, §5. On lira avec intérêt l'étude de P. Hamou, *Lumière physique et lumière phénoménale chez Leibniz*, E.N.S. Editions, col. *Theoria*, Paris, 1997.

^{xliv} Couturat, *Leibniz, opuscules et fragments inédits*, Paris, Alcan, 1903, p.561 (1680), cité et traduit par P. Hamou, art. cité.

^{xliv} Leibniz, *De ipsa natura*, P.S. IV, p.506.

^{xlvi} Leibniz, *Discours de métaphysique*, § XXII

^{xlvii} Newton, *Optique*, Livre 3, question XXVIII.