

TOUT PEUT-IL MARCHER ?

Fernand Hallyn

INTRODUCTION

L'importance de la "découverte" de la lunette par Galilée en 1610, rendue publique dans le *Sidereus Nuncius*, réside en premier lieu dans le retentissement que ses observations de la lune, des satellites de Jupiter et des nouvelles étoiles ont eu, et dans leurs effets sur la représentation du monde¹. En optique, la signification initiale de la lunette galiléenne est plutôt de l'ordre de la provocation : si des questions théoriques sont suscitées, Galilée n'y apporte aucune réponse. Dans le premier tiers du XVII^e siècle, la théorie de la réfraction, essentielle pour l'explication scientifique du fonctionnement de la lunette, est développée d'abord par Kepler, qui n'en découvre cependant pas la loi générale, ensuite par Snellius et Descartes.

A première vue, les recherches qui entourent la découverte de la loi de la réfraction offrent une illustration parfaite du slogan lancé par Paul Feyerabend : "Tout peut marcher" ("*Anything goes*")²; aucune démarche, aucune voie ne peut être exclue *a priori* de la science, sous peine d'inhiber son progrès. Il n'existe pas d'"obstacles" épistémologiques en soi. Une illusion peut conduire à la découverte d'une vérité, une vue juste peut en détourner. L'aveuglement peut être source de clairvoyance, et inversement. On ne saurait réduire la formation d'hypothèses ou la découverte de lois à des processus purement logiques. Tout ceci pourrait être illustré abondamment par les épisodes qui ont conduit à la découverte de la loi de la réfraction au début du XVII^e siècle. La thèse dite "anarchiste" de Feyerabend n'est pensable, toutefois, que du point de vue de l'observateur qui se place lui-même en dehors de la recherche telle qu'elle est menée pratiquement. Pour tel homme, muni de telles convictions liées au contexte où il évolue, seuls certains cheminements font sens et certains choix sont seuls possibles. L'univers discursif de la

science est constitué de positions et d'oppositions, de débats, de conflits et de ruptures, où l'on soutient que, justement, tout ne peut pas marcher. L'action concrète, telle qu'une "poétique" de l'invention l'aborde³, implique la négation de "*Anything goes*", mais non la réduction à un logicisme; elle explore des zones restreintes et précises de liberté, les choix qui s'y opèrent ainsi que leurs motivations variées et multiples. C'est ce que je voudrais montrer ici sur les exemples concrets de Kepler et de Snellius à la recherche de la loi de la réfraction.

AVANT DESCARTES

Ptolémée

Dès l'Antiquité, la réfraction a fait l'objet, en particulier chez Ptolémée⁴, d'une étude à la fois empirique et mathématique. Celle-ci s'appuyait sur une théorie, développée déjà par Euclide, selon laquelle la vue est l'effet de rayons⁵ sortant de l'oeil.

Ptolémée admet une analogie entre réflexion et réfraction, considérant les deux comme des espèces d'un même genre de phénomènes. L'analogie est développée en deux sens : qualitatif et quantitatif.

Du point de vue qualitatif ou *physique*, il s'agit de deux cas d'altération du trajet des rayons, mais dans le premier ils "rebondissent" et dans l'autre ils sont "courbés" et traversent le nouveau milieu (fig. 1); en outre, la réfraction semble exiger une certaine "similarité" entre les deux milieux et elle est réversible, puisqu'elle ne se produit pas seulement lors du passage dans un milieu plus dense, mais aussi lors de la pénétration d'un milieu plus subtil".

Du point de vue quantitatif ou *géométrique*, l'image réfléchie ou réfractée apparaît toujours à l'intersection du prolongement du rayon incident (sortant de l'oeil) et de la perpendiculaire tracée depuis l'objet sur la surface qui altère le trajet (voir fig. 1). Reste, bien entendu, la question du rapport entre les angles concernés, qui est d'égalité dans le

cas de la réflexion ($i = r$)⁶. Par inférence analogique, Ptolémée pose dans le cas de la réfraction, l'existence d'"une relation quantitative bien définie", mais ne parvient pas à la préciser⁷. Certes, à l'aide de dispositifs expérimentaux, il établit des tables de mesure pour le passage du rayon visuel de l'air dans l'eau, de l'air dans le verre, et de l'eau dans le verre. Il retouche légèrement les résultats et parvient ainsi à introduire une régularité dans la progression des angles de réfraction⁸, mais n'en tire pas de véritable loi régissant le rapport avec les angles d'incidence. Il retient seulement que, lors du passage du rayon dans un milieu plus dense, si $i > i_1$, alors $i : r > i_1 : r_1$. Des études récentes ont fait apparaître trois raisons principales aux limites de cette approche grecque de la réfraction — raisons qui touchent aux possibles de "l'imaginaire scientifique"⁹ des Grecs.

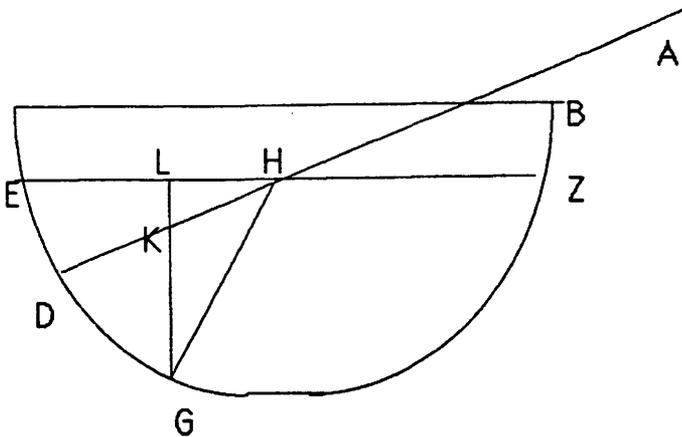


Fig. 1 - Observation de Ptolémée. L'œil placé en A ne peut voir la pièce de monnaie en G aussi longtemps que la cuve opaque reste vide. Si la cuve est remplie d'eau jusqu'au niveau EHZ, la pièce semble flotter en K, à l'intersection de GKL, perpendiculaire de G sur EHZ, et de AHD, prolongement rectilinéaire du rayon incident ABH.

En premier lieu intervient une *limite langagière*. L'expérience ne peut donner de résultats que dans les langages dont on dispose pour la traiter, et pour Ptolémée, ce langage était la géométrie euclidienne.

Certes, les Grecs pouvaient rendre compte d'une variation continue par cette géométrie, mais "les techniques *arithmétiques* qui étaient principalement les leurs les amenaient plus à repérer des rapports de grandeur et à les disposer en séries discrètes — à dresser des tables — qu'à chercher à donner une expression unique à une variation continue"¹⁰. En d'autres mots, il manquait une élaboration de l'algèbre permettant de transformer la constance des différences secondaires entre les angles de réfraction en équation entre les angles d'incidence et de réfraction¹¹.

Notons ensuite que la *conception* même de l'optique limitait nécessairement la façon de poser le problème. D'une part, l'optique de l'Antiquité est une science de la sensation visuelle; elle s'occupe en priorité du regard et de ce qui lui arrive. Son but est d'expliquer l'effet de *signe* (fidèle ou déformant) des *événements* visuels. On pourrait dire que, parallèlement à une cosmologie et une astronomie géocentriques, s'élabore une optique anthropocentrique¹², qui n'est pas une science de la lumière ni des objets réfringents en soi, avec leurs propriétés physiques abstraites : "ce qui compte est bien *la variation de ce qu'on voit, et non la nature de l'objet transformant*". D'où la conséquence que les caractéristiques du dioptré ne sont pas traitées "indépendamment du regard de l'observateur"¹³. D'autre part, si la conception de l'optique détournait l'attention des objets transformants mêmes, elle ne devait pas non plus, dans la réfraction, diriger Ptolémée vers la considération des sinus. Axée sur les données *concrètes* de la perception, cette optique était naturellement orientée vers la recherche d'une régularité *directe* entre les angles d'incidence et de réfraction, et non pas vers la prise en compte des fonctions abstraites (les sinus) de ces angles, qui ne faisaient même pas partie de la façon de concevoir le problème¹⁴. L'analogie établie avec la réflexion, où une telle constance directe existe effectivement, ne pouvait évidemment que renforcer cette tendance.

Enfin, la satisfaction devant les résultats obtenus dépend toujours aussi d'une certaine conception générale du monde. Or, l'univers grec était nettement hiérarchisé; seules pouvaient prétendre à une mathématisation exacte la partie supérieure, céleste, du monde et les sens supérieurs, la vue et l'ouïe, de l'homme. Aussi, "dans la réfraction, le regard pouvait

faire l'objet d'une étude quantitative; mais non le dioptré réfringent *en tant que tel*, car une lentille de verre, une sphère remplie d'eau ou même une pierre précieuse taillée seraient passées pour des objets trop grossiers pour se plier *par nature* à des relations constantes et harmonieuses"¹⁵ (183). Au fond, *rien* ne pouvait donc vraiment marcher pour Ptolémée, à cause de l'imperfection de la nature sublunaire même.

Des "perspectivistes" à Kepler

L'Antiquité a connu plusieurs théories de la vision, mais la seule qui ait donné naissance à une étude détaillée de la réfraction est celle, adoptée par Ptolémée, qui pose l'émission de rayons visuels par l'oeil. Il faut attendre le début du XI^e siècle et l'Arabe Alhazen pour voir paraître une alternative sérieuse, qui sera reprise, en Occident, par les "perspectivistes" (surtout les Anglais Roger Bacon et John Pecham et le Polonais Witelo)¹⁶.

Pour Alhazen¹⁷, la vision suppose une émission non pas depuis l'oeil, mais depuis les objets perçus lorsqu'il sont eux-mêmes frappés par la lumière¹⁸. Chaque point d'un objet illuminé "rayonne" en fait dans toutes les directions et chaque point de l'oeil reçoit donc un "rayon"¹⁹ de chaque point qui se trouve dans son champ de vision. S'il ne résulte pas de cette situation une confusion totale et si nous arrivons à voir des objets distinctement, c'est que tous les rayons émis n'ont pas la même force. Appliquant au rayonnement une métaphore mécanique, Alhazen pose que les rayons perpendiculaires à un point donné sont les plus forts, tout comme un projectile touche son objectif avec le plus de force lorsqu'il l'atteint perpendiculairement²⁰. Chaque point de l'oeil ne retient, dès lors, que le rayon dont l'incidence est perpendiculaire à son plan; les autres sont réfractés et affaiblis, de sorte qu'ils n'arrivent pas à stimuler la "puissance visuelle" (*virtus visiva*).

A partir de l'école "perspectiviste", la réfraction est donc installée, mais de manière toute négative, au coeur même de la théorie de la vision : elle y est omniprésente, mais constamment éliminée. D'autre part, la métaphore mécanique est teintée d'animisme : si les rayons réfractés

sont éliminés pour leur faiblesse, cette sélection optique répond à une *intentionnalité* du cristallin, qui *choisit*, parmi toutes les impressions qu'il reçoit, de manière à obtenir une image cohérente²¹. L'oeil n'est pas encore une *machine* optique²².

Dans l'analyse de la réfraction en elle-même, une approche mécanique, axée sur les causes physiques, domine. Au rayon qui vient la frapper, une surface réfringente oppose une certaine résistance; elle ne parvient pas à supprimer sa puissance de pénétration, mais modifie tout de même son trajet. A chaque rayon incident sont attribuées deux composantes, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la surface du milieu réfringent (fig. 2). Lors du "choc" produit par la rencontre d'un tel milieu, ces deux composantes sont affectées différemment. Dans le cas du passage dans un milieu plus dense, la composante perpendiculaire (la plus forte des deux) subit moins les effets du choc, et le mouvement composé a tendance à se rapprocher de la "normale" (la perpendiculaire touchant la surface réfringente au point d'incidence). Ce rapprochement est d'autant plus considérable que l'incidence même est plus oblique.

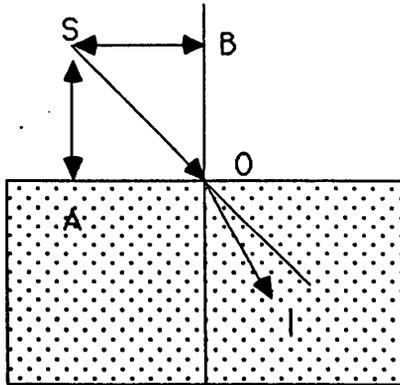


Figure 2. - Le rayon SO, qui tombe sur une surface réfringente, est décomposé en une composante perpendiculaire à la surface (SA) et une composante parallèle (SB). Si le nouveau milieu est plus dense, la force de la composante perpendiculaire sera moins freinée que celle de la composante parallèle (plus faible) et le rayon se rapprochera donc de la normale.

Dans le cas du passage dans un milieu moins dense, au contraire, la composante parallèle ou faible profite le plus de la diminution de la résistance; son influence devient plus importante, et le rayon s'éloigne de la normale.

Pas plus que Ptolémée, les "perspectivistes ne passent à une théorie des lentilles. Leur optique reste en premier lieu une théorie de la vision naturelle, même si Roger Bacon, par exemple, analyse dans le détail les réfractions produites par des surfaces planes, convexes et concaves. Ils ne dissocient pas l'étude des dioptrés de celle du regard.

Les "perspectivistes" s'expriment, par ailleurs, dans un langage aristotélicien. Witelo définit la réfraction par "la résistance d'une qualité passive [la densité] opposée à une qualité active [la lumière]". La lumière est la "forme en acte", le milieu réfringent la "matière" plus ou moins apte à la recevoir. Une certaine densité du milieu "empêche [la lumière d'atteindre] le but vers lequel le mouvement était dirigé". Lorsque la lumière passe dans un milieu moins dense, il y a "victoire de la forme en acte sur une matière mieux adaptée à la recevoir"; dès lors, "la forme se diffuse en s'écartant de son trajet initial..."²³ On le voit : il est question de résistance, et donc de violence; de victoire et donc de guerre; de but et donc d'intention. La distinction de la forme et de la matière colore la métaphore mécanique d'animisme. Cette tendance apparaît le plus nettement chez Bacon : la lumière "désire" le chemin le plus facile, elle le "cherche", le "choisit", etc.²⁴ Les adaptations du trajet d'un rayon en fonction du milieu sont présentées comme des comportements obéissant à des *intentions*.

Nous retrouverons ce langage chez Snellius. Mais, comme nous le verrons également, Kepler ne pourra pas l'admettre. Ce sont pourtant les "perspectivistes", et avant tout Witelo, qu'il choisit comme point de référence pour l'exposé de son optique à lui. Cela se comprend : les traités d'Alhazen et de Witelo avaient été publiés en 1572 à Bâle par les soins de Friedrich Risner, un élève de Pierre de La Ramée, et il s'agissait bien là, à l'époque, de la théorie optique la plus cohérente²⁵.

Kepler étudie longuement la réfraction dans la quatrième section de ses *Paralipomènes à Vitellion* de 1604, généralement considérés comme le premier traité d'optique moderne. En 1604, Kepler ne songe évidemment pas encore à la lunette. S'il traite de la réfraction, c'est qu'elle constituait, dès avant Galilée, un important problème astronomique. Mais au lieu de représenter une arme dans l'exploration du monde, elle apparaissait comme une cause d'illusions. Dès l'Antiquité, Ptolémée avait abordé, dans son *Optique*, la question de la réfraction atmosphérique, qui était censée se produire lors du passage des rayons de l'air sublunaire dans l'éther supralunaire, provoquant des changements dans les dimensions apparentes des corps célestes. De même, Cléomède avait traité des phénomènes tels que des "éclipses paradoxales" de la lune, ayant lieu lorsqu'elle se trouve au-dessus de l'horizon, mais non dans la zone d'ombre de la terre. Dans les *Paralipomènes* (dont le sous-titre est : *Partie optique de l'astronomie*), Kepler introduit, au chapitre IV, son examen de la réfraction par le rappel d'une discussion sur la réfraction atmosphérique entre Tycho Brahé et Rothmann.

Dans les *Paralipomènes*, trois approches de la réfraction se succèdent, mais se révèlent toutes infructueuses. Kepler découvre une constante valable pour les petits angles uniquement : si l'incidence n'est pas supérieure à 30° , les angles d'incidence et de réfraction sont proportionnels entre eux²⁶. Il revient à la réfraction dans sa *Dioptrique* de 1611, après la lecture du *Message céleste* de Galilée, mais toujours sans avoir trouvé la loi générale²⁷. Les trois tentatives des *Paralipomènes*, qui correspondent respectivement à l'*induction*, à l'*analogie* et à la *déduction*, méritent, malgré leur insuccès, qu'on s'y attarde : elles illustrent quelles étaient, pour Kepler, les voies possibles.

Kepler : l'induction "impure"

Dans la première partie de son examen de la réfraction, Kepler déclare partir de l'expérience. Il passe en revue une série de tentatives pour établir la mesure de la réfraction par voie empirique. L'expérience montre qu'elle tient nécessairement à la combinaison de deux facteurs : la densité du milieu réfringent²⁸ et la grandeur de l'angle d'incidence. Kepler essaie en vain d'établir entre ces deux facteurs un rapport qui corresponde parfaitement aux tables des réfractions que, à la suite de Ptolémée, Alhazen et Vitellion ont proposées pour diverses réfractions terrestres (air-eau, etc.), ainsi qu'à celle établie par Tycho Brahé pour la réfraction atmosphérique. La démarche se veut nettement *inductive*, puisqu'elle vise à découvrir une loi générale à partir de la prise en considération d'une série de facteurs présents dans un ensemble de cas particuliers. A un moment donné, Kepler est tout près de découvrir cette loi générale de la réfraction, qui pose un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction pour des milieux bien définis, mais il abandonne la piste. Il cherche, en effet, à établir un rapport entre *sinus* :

Et je n'ai pas négligé non plus de me demander si, une fois la réfraction horizontale établie à partir de la densité du milieu, les autres (réfractions) correspondaient aux sinus des distances au sommet. Mais le calcul ne l'a pas confirmé, et d'ailleurs il était tout à fait inutile de se poser la question. En effet, les réfractions (dans ce cas) croîtraient selon la même forme dans tous les milieux, ce qui répugne à l'expérience²⁹.

Comme c'est le cas pour ses prédécesseurs, ce que Kepler appelle ici *angle de réfraction*, n'est pas ce que nous appelons ainsi. Il ne s'agit pas de l'angle formé par le rayon réfracté avec la normale, mais — dans la tradition de "perspectivistes" et de l'Antiquité — de la déviation subie par le rayon pénétrant dans un nouveau milieu (fig. 3).

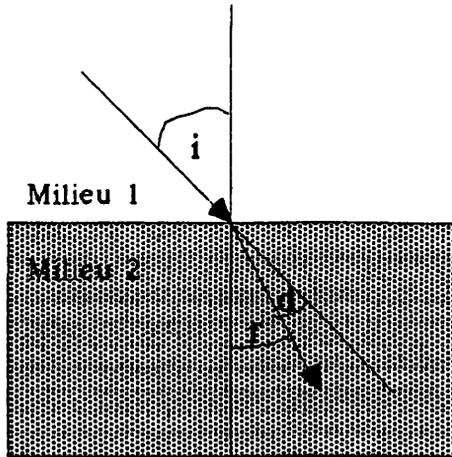


Figure 3. - Outre l'angle d'incidence i , Kepler, n'envisage pas l'actuel angle de réfraction r , mais l'angle de déviation d .

On peut se demander pourquoi Kepler a si vite abandonné l'hypothèse des sinus, sans faire entrer en ligne de compte les sinus d'autres angles que cet angle de déviation. Le fait est d'autant plus remarquable, ainsi que le constate Gérard Simon³⁰, que Kepler rappelle le principe du retour inverse de la lumière, déjà connu de Ptolémée : le trajet suivi par un rayon reste le même si l'on inverse le sens de la propagation de la lumière. De par cette loi, l'angle de réfraction (au sens actuel) dans une direction donnée devient l'angle d'incidence dans le sens inverse. Il n'aurait donc pas été étrange d'en tenir compte et d'arriver ainsi à la loi générale.

Pour expliquer l'aveuglement de Kepler, on a invoqué notamment l'influence du vocabulaire de l'optique : *refringere* invite en effet, étymologiquement, à penser une brisure, une déviation subies³¹. Mais on sait que, loin d'être le prisonnier aveugle d'une langue reçue, Kepler se montre toujours attentif aux problèmes et aux pièges terminologiques et qu'il n'hésite pas à forger des néologismes (*foyer*, *convergence*, *divergence*...) pour mieux signifier sa manière de penser les phénomènes. Les *Paralipomènes* commencent d'ailleurs par une mise au point

terminologique où la justesse de *frangere* est soulignée³². Il faut donc chercher une autre réponse.

Chez Alhazen et Witelo, la "normale", ou la perpendiculaire élevée sur le point d'incidence, jouait un rôle important de par la métaphore mécanique qu'ils appliquaient à la lumière et qui invitait, comme nous l'avons vu, à penser le trajet du rayon réfracté en fonction de son rapport perpendiculaire au plan de séparation des deux milieux, c'est-à-dire en fonction du rapport exemplifié par la normale. Or, c'est là une théorie que Kepler ne peut accepter, car sous la métaphore mécanique du projectile il décèle un animisme qu'il ne peut que rejeter :

La lumière, disent-ils [Alhazen et Vitellion], cherche une compensation pour le préjudice reçu lorsqu'elle est frappée obliquement. Car plus la rencontre du <milieu> plus dense l'a affaiblie, et plus elle se concentre en se rapprochant de la perpendiculaire pour heurter le fond du milieu plus dense par un coup plus droit. Car ces coups-là sont les plus forts. Sur quoi ils ajoutent je ne sais quelle subtilité : que le mouvement de la lumière tombant obliquement sur la surface du dense est composé d'un mouvement perpendiculaire et d'un mouvement parallèle à cette surface, et que ce mouvement ainsi composé n'est pas aboli, mais seulement gêné par la rencontre avec le diaphane plus dense. Que par suite le mouvement entier, tel qu'il est composé, se fortifie de nouveau, c'est-à-dire qu'il subsiste dans le mouvement désormais altéré par la surface dense, comme un vestige de la composition primitive, de telle sorte qu'il n'est ni tout à fait perpendiculaire ni tout à fait parallèle. Que cependant il s'incline davantage vers la perpendiculaire que vers la parallèle parce que le mouvement perpendiculaire est plus fort. Ils n'expliquent pas la chose beaucoup mieux que ne le fait Macrobe, qui prétend au livre VII des *Saturnales* que la vision hésite et revient sur elle-même après le choc. Comme si l'espèce de la lumière était douée d'une intelligence susceptible d'évaluer tant la densité du milieu que le préjudice qu'elle encourt, et ceci de son propre jugement sans force extérieure; et comme si elle se brisait elle-même dans une action, non pas dans une passion³³.

Cette critique combine une pensée encore aristotélicienne du mouvement et un refus de l'animisme. Comme le montre la fin du passage cité, la dynamique de Kepler reste fondamentalement aristotélicienne. Le mouvement est pensé en termes d'action (ou de mouvement naturel) et de passion (ou de mouvement violent, c'est-à-dire subi). La diffusion naturelle de la lumière est rectiligne; sa brisure (par réfraction) ne saurait être qu'une passion, un changement violent, dont la cause est extérieure à la lumière même. Or, recourir, dans ces conditions, à l'angle formé par le rayon réfracté et la normale, revient, selon Kepler, à penser en termes d'action de la lumière réfractée, comme si on la jugeait animée et capable d'orienter elle-même son mouvement en fonction d'une ligne perpendiculaire dont l'existence est purement idéale.

L'induction qui fait appel à la normale est donc *impure* aux yeux de Kepler : au lieu de s'en tenir strictement aux données physiques de l'expérience, elle projette sur eux une métaphore animiste, leur attribuant une intentionnalité et un finalisme. Mais l'induction telle qu'il entend la pratiquer lui-même est, au fond, également impure, puisqu'elle est informée par des conceptions théoriques spécifiques, et surtout par une théorie du mouvement qui reste tout de même aristotélicienne (alors que Descartes fera appel au mouvement inertial) et qui limite *a priori* le nombre de variables admissibles dans la solution du problème.

Les effets, heureux ou malheureux, des présuppositions théoriques qui commandent, consciemment ou non, la sélection des éléments et des relations éventuellement pertinents dans l'induction, peuvent varier d'un cas à l'autre, même chez un seul auteur. Ainsi le refus opposé par Kepler à l'intervention de la normale dans la loi de la réfraction rappelle son refus de considérer que les planètes pourraient se mouvoir en cercle autour d'un centre auquel ne correspond aucun corps. Tout comme il reproche à Alhazen et Vitellion d'expliquer le trajet de la lumière en fonction d'une ligne à laquelle ne correspond aucune réalité matérielle, il écrit, dans son *Astronomie nouvelle*, au sujet de la trajectoire des planètes : "Je ne nie pas que l'on puisse penser un centre, et un cercle autour de ce centre. Je dis seulement que si ce centre n'existe que dans la pensée et n'est jamais marqué par un signe extérieur, il n'est pas

possible qu'un corps réel exécute autour de lui un mouvement parfaitement circulaire."³⁴ La normale est en optique ce que le centre des orbites circulaires est en astronomie : une considération de type finaliste, incapable de jouer le rôle d'une cause efficiente dans l'ordre des relations physiques en tant que telles. Mais alors que, en astronomie, cette option s'intègre dans le cheminement qui conduit Kepler vers la découverte des orbites elliptiques, elle l'amène, en optique, à ne pas prendre en considération les relations qui auraient permis de découvrir la véritable loi de la réfraction.

Kepler : l'impasse de l'analogie

A la fin de sa première approche de la réfraction, Kepler déclare que la méthode inductive qu'il a poursuivie jusque là était, au fond, une démarche aveugle : "Ainsi jusqu'à présent nous avons suivi une méthode de recherche presque aveugle et nous avons compté sur la chance."³⁵ Il passe alors à une nouvelle tentative où il recourt à une analogie entre des phénomènes qui concernent tous deux la lumière : il essaiera d'établir des relations d'équivalence dans la "mesure" des phénomènes de réflexion et de réfraction. Il avoue ne pas connaître les "causes" spécifiques des éventuelles correspondances; sa démarche reste donc tâtonnante, mais il espère que les "mesures" le mettront sur la piste des "causes" : "Je désirais en effet obtenir une mesure des réfractions; peu m'importait qu'elle fût aveugle pourvu qu'elle fût : car j'avais l'espoir tenace qu'une fois connue la mesure légitime, la cause se dévoilerait elle aussi."³⁶ Il s'agit bien, on le verra, de l'*analogie* telle que Kant l'oppose, en tant qu'instrument heuristique, à l'induction³⁷ : il ne s'agit plus d'inférer une généralisation à partir d'un ensemble de cas de même espèce, comme lors de l'approche inductive précédente (qui ne portait que sur la réfraction), mais de *spécifier* des propriétés de la réfraction grâce à l'explicitation systématique de ses similarités mathématiques avec la réflexion. L'analogie entre réflexion et réfraction apparaissait déjà, on l'a vu, chez Ptolémée. Pour Kepler comme pour Ptolémée, les similarités entre réflexion et réfraction sont à la fois d'ordre qualitatif et d'ordre quantitatif. Mais les conditions dans lesquelles se déploie l'analogie keplérienne ne sont évidemment plus celles de l'Antiquité. La tentative des *Paralipo-*

mènes est inspirée par le succès que le recours aux analogies — "mes maîtres les plus fidèles, instruits de tous les arcanes de la nature"³⁸, dit Kepler — avait eu dans le chapitre précédent des *Paralipomènes*, consacré à la seule réflexion. Kepler y avait développé l'analogie entre la position de l'image dans un miroir et celle dans l'eau, tout en critiquant, à ce sujet, les insuffisances de ses prédécesseurs "perspectivistes" et en leur reprochant, sur ce point également, une présupposition fonaliste et animiste.

Du point de vue qualitatif, Kepler compare la réfraction lors du passage à un milieu moins dense avec la réflexion dans un miroir convexe (l'image étant réduite dans les deux cas), tandis que le cas du passage à un milieu plus dense est rapproché de la réflexion dans un miroir concave (l'image étant dans les deux cas agrandie). L'établissement de rapports quantitatifs est nettement plus difficile et conduit Kepler à une longue dissertation sur les sections coniques en vue de découvrir des similarités entre les effets de milieux plus ou moins denses et ceux des miroirs elliptiques, paraboliques et hyperboliques. Il se lance dans des complications toujours plus subtiles, mais abandonne finalement cette voie parce que, quelles que soient les correspondances dans les "mesures", elles ne lui découvrent nullement ce qu'il avait espéré trouver, c'est-à-dire la "cause" des réfractions : "... je me suis efforcé de rassembler dans un seul et unique ensemble les mesures des différentes réfractions, et pourtant je dois reconnaître que la cause ne réside pas dans cette mesure."³⁹ Ayant l'impression que l'analogie l'enferme dans un formalisme sans issue, il décide, pour sa troisième tentative, de partir de l'examen des causes : "Occupons-nous donc maintenant aussi des causes de cette mesure et que Dieu nous soit favorable!"⁴⁰

Lorsque, en se souvenant visiblement de Kepler, Descartes abordera la réfraction dans la VIII^e des *Règles pour la direction de l'esprit*, il tirera une leçon méthodologique de l'abandon de la deuxième approche des *Paralipomènes*. Il établira explicitement comme règle qu' il est vain d'espérer passer de l'étude mathématique de la réfraction à son explication physique : celle-ci doit précéder celle-là⁴¹. Or, la nécessité de partir des "causes" avant de pouvoir aborder les "mesures", c'est

précisément ce que reconnaît Kepler lorsqu'il abandonne sa deuxième tentative pour entamer la troisième : "Si l'explication générale que nous avons donnée ci-dessus dans les propositions optiques est correcte, l'explication particulière doit nécessairement en dériver tout aussi correctement."⁴² Voilà que s'affirme donc la foi en un cheminement déductif.

Kepler : le filtre déductif

La pensée de Kepler est dominée par un double système de causalité. D'une part le monde a été créé sur le seul modèle parfait possible : Dieu, dont il est la figure anagogique. Rappelant à ce propos, dans les toutes premières pages des *Paralipomènes*, ses convictions cosmologiques les plus fermes, Kepler souligne que "la figure la plus éminente de toutes, la Surface Sphérique", a servi de modèle à la Création, parce qu'elle est elle-même l'image de la Trinité divine : le centre de la sphère du monde (le soleil) représente le Père, la surface des étoiles fixes correspond au Fils, et l'espace intermédiaire à l'Esprit qui relie les deux autres, — "et quoique le Centre, la Surface et l'Intervalle soient assurément trois, ils ne font pourtant qu'un, de sorte que l'on ne peut, même en pensée, en séparer un des autres sans que le tout soit détruit"⁴³. Or, la sphère a aussi été "l'archétype" de la lumière, grâce à laquelle les parties du monde communiquent entre elles :

Le Soleil est donc ce corps dans lequel réside la faculté de se communiquer soi-même à toutes les choses, faculté que nous nommons lumière, et de ce fait il a droit à une place au milieu de la totalité du monde, il a droit au centre, afin de se diffuser également et perpétuellement tout à l'entour. Tout ce qui participe de la lumière imite le soleil⁴⁴.

A la base de l'optique keplérienne, il y a donc une analogie qui détermine *a priori* la forme du monde aussi bien que la diffusion de la lumière. Le monde est fait sur un modèle divin, il obéit à la nécessité d'une analogie *métaphysique*. Mais si le monde est bien, du point de vue des causes finales, le plan signifiant d'une sémiologie verticale, reliant

physique et métaphysique, la nécessité d'une explication spécifique des causes efficientes régissant les rapports entre les objets dans leur réalité purement physique n'en est pas pour autant éliminée. Au contraire, aucune analogie métaphysique ne peut être reconnue comme valable aussi longtemps que n'a pas été établie sa compatibilité avec "les modes d'apparition et les causes de la connexion de chaque élément" dans un ordre purement physique⁴⁵. Indépendamment de toute figuration du divin, il importe de montrer, comme il est dit dans les *Paralipomènes*, que "toutes ces affections touchent la vue par une nécessité matérielle, dans laquelle il n'y a de place pour aucune considération de fin ou de beauté"⁴⁶. Une explication par causalité exclusivement physique, d'où tout finalisme et toute intentionnalité propre des phénomènes est éliminée, doit garantir que les spéculations de l'homme sur le sens métaphysique du monde ne sont pas gratuites, mais ancrées dans la réalité physique en tant que telle. Tout en continuant à affirmer, et avec force, la *sémiosis* verticale du monde, Kepler pose donc également, et avec une conviction égale, l'indépendance de l'explication physique. Celle-ci ne peut pas faire intervenir des déductions de l'analogie métaphysique se rapportant à la fin de la Création. Mais une telle étanchéité est-elle possible ?

Il faut bien constater qu'en astronomie, par exemple, signification métaphysique et causalité physique demeurent étroitement liées. Si Kepler arrive à penser sa thèse *physique* d'orbites elliptiques dont un foyer est occupé par le soleil, c'est qu'il voit en celui-ci le symbole *métaphysique* du Père, principe générateur et source d'énergie vitale, et que ces implications métaphysiques l'invitent à se le représenter comme l'origine d'une relation dynamique qui génère le mouvement dans le monde. Même si le fonctionnement du système solaire peut être exposé en termes purement physiques de relations contextuelles entre des corps matériels, la possibilité de le penser découle, en somme, de l'analogie présupposée entre le monde et la Trinité divine qui fait occuper au soleil la place du Père⁴⁷.

Or, si un refus est opposé à l'analogie animiste en optique, la théorie de la lumière n'en est pas moins, elle aussi, travaillée par l'analogie avec la Trinité qui est à la base de l'optique keplérienne. Dans

ses *Paralipomènes*, Kepler recherche aux faits des explications purement physiques, certes, mais celles-ci sont pensées *dans le champ de possibilités* délimité par l'analogie initiale.

Kepler admet que l'angle de réfraction dépend de deux facteurs⁴⁸. La réfraction augmente, certes, avec l'obliquité de l'incidence, mais ne lui est pas simplement proportionnelle. C'est pourquoi Kepler fait intervenir un autre élément, les lignes BM de la fig. 4. Il constate d'abord qu'elles augmentent comme les sécantes des incidences⁴⁹. Mais comme le recours à celles-ci conduit à l'absurde dans le cas de la pénétration de la lumière dans un milieu moins dense⁵⁰, il préfère retenir dans tous les cas les sécantes de l'angle formé dans le milieu plus dense (fig. 4)⁵¹, se justifiant par le principe du retour inverse de la lumière. Pourquoi ce recours aux sécantes ? C'est qu'à une même différence de degrés ou d'obliquité correspondent des différences croissantes des sécantes : le recours aux lignes BM empêche donc la réfraction d'être simplement proportionnelle à l'angle d'incidence. D'autre part, ces mêmes lignes BM correspondent au plan de séparation des deux milieux traversés par la lumière et apparaissent, par là, parfaitement aptes à mesurer les effets de la *passion* subie par la lumière lors de son contact physique avec le milieu réfringent, la *violence* exercée par celui-ci — ce qui n'est pas le cas des perpendiculaires (comme la normale) auxquelles d'autres ont recours et dont le rôle ne s'expliquerait aux yeux de Kepler, nous l'avons vu, que par une impensable *réaction intentionnelle* de la lumière même. Le recours aux lignes BM est donc conforme à l'exigence d'une causalité purement physique ou d'une "nécessité matérielle" (la "résistance du milieu"⁵²) telle que Kepler la conçoit et l'exige. Mais en même temps on voit aussi qu'il ne pense pas en termes de rayons isolés : la ligne BM délimite une zone de la diffusion *en nappes sphériques* de la lumière. Une telle diffusion avait certes déjà été admise par d'autres, mais ceux-ci n'en reviennent pas moins, dans l'analyse concrète, à l'"abstraction" que constituent les lignes ou les rayons réfractés. C'est le propre de Kepler de développer de manière cohérente tout son raisonnement *physique* en restant rigoureusement fidèle à la présupposition, nécessaire de son point de vue *métaphysique*, d'une dispersion sphérique de la lumière⁵³. La

conviction métaphysique constitue bien l'horizon inaliénable de la déduction physique des causes de la réfraction.

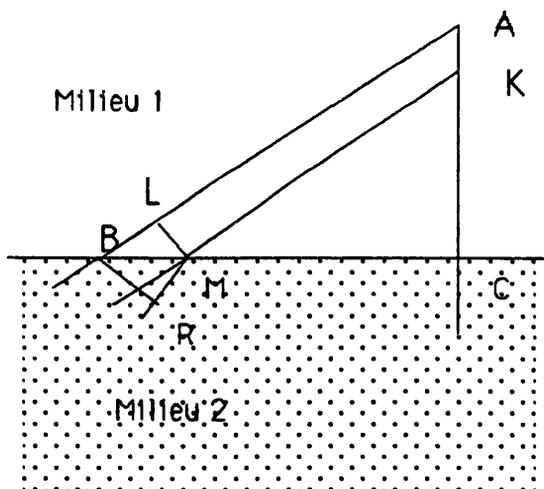


Figure 4. - Soient AB et KM "issus du soleil et quasi parallèles", leur écart correspondant à LM. Lors de la rencontre de la surface réfringente BC, Kepler prend en considération, outre la densité spécifique, deux grandeurs corrélatives : l'angle BAC et la longueur de la ligne BM. (*Paralipomènes*, IV, 6, prop. 1, 2 et 6, trad. cit., pp. 242-243.)

Si la voie déductive ne conduit pas Kepler à la loi de la réfraction, on ne saurait pourtant voir dans l'analogie métaphysique de la lumière uniquement un obstacle. Ailleurs dans les *Paralipomènes*, elle a aussi, comme le souligne Gérard Simon "sa fécondité, puisque dans son analyse de la formation des images sous l'effet de miroirs ou de lentilles, elle l'amène naturellement à chercher ce qu'il advient de faisceaux de rayons et non de rayons isolés, et le conduit aux concepts de convergence et de divergence"⁵⁴. Le principe de l'analogie métaphysique qui travaille la déduction agit comme un *filtre* : il limite le nombre de réponses possibles aux questions, il focalise et aveugle à la fois, conduit tantôt à l'erreur ou l'impasse, tantôt à la vérité. Il est aussi à la base de la

cohérence de l'oeuvre de Kepler, dans ses réussites et ses échecs qui s'en trouvent indissociablement liés.

Snellius : succès de l'animisme

L'existence d'un manuscrit aujourd'hui perdu dans lequel Willebrord Snell énonce la loi de la réfraction (en termes de cotangentes, et non de sinus) est attestée par plusieurs témoignages. Golius (fig. 5) en informe Constantin Huygens dans une lettre du 1er novembre 1632 en précisant que Snellius s'était basé tant sur les observations de Vitellion que sur les siennes propres⁵⁵. Isaac Vossius nous apprend que la loi apparaît dans un traité d'optique divisé en trois livres, mais inachevé⁵⁶.

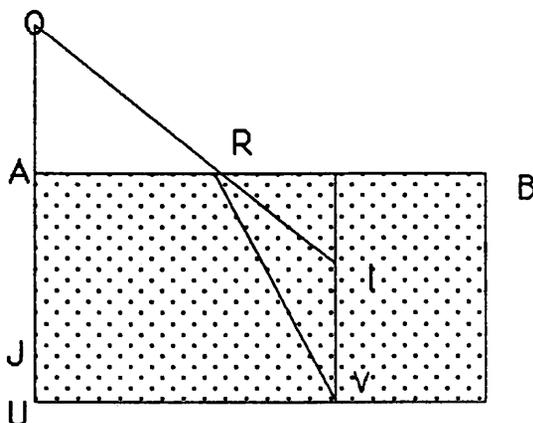


Figure 5 - La loi de Snellius (d'après Golius) : une source lumineuse V , au fond de l'eau est réfractée en R et semble, à l'oeil en O , venir de I ; le rapport de RV à RI est constant pour un milieu donné (pour l'eau : $4/3$, pour le verre $3/2$). Snellius admet le raccourcissement du rayon vertical (vu de O , U semble situé en J), ce qui est nié par Huygens dans le passage cité ci-dessus.

Christian Huygens évoque, dans sa correspondance, un "livre manuscrit de Snellius (...) qui était écrit exprès touchant la nature de la réfraction et qui finissait par cette règle dont il remerciait Dieu, quoi qu'au lieu de

considérer les sinus, il prenait, ce qui revient à la même chose, les côtés d'un triangle, et qu'il se trompait en voulant que le rayon qui tombe perpendiculairement sur la surface de l'eau se raccourcit et que cela fait paraître le fond d'un vaisseau plus élevé qu'il n'est.⁵⁷ Dans sa *Dioptrique*, le même Huygens déclare que Snellius avait découvert la loi "grâce à beaucoup de labeur et beaucoup d'expériences"⁵⁸. Depuis, c'est devenu un lieu commun de dire que la découverte s'est faite grâce à l'expérience seule, à l'expérience pure. Est-ce bien vrai ?

Si nous n'avons plus l'ouvrage même de Snellius, nous connaissons au moins une sorte d'abrégé, énumérant les titres des propositions des deux premiers livres et du début du troisième⁵⁹. Ce texte nous renseigne peu, cependant, sur la manière dont la loi a été découverte. Certes, il témoigne d'expériences très précises, mais qui ont pu servir avant tout de vérification⁶⁰. Mais le document le plus important concernant les présuppositions de la recherche est constitué par des annotations laissées par Snellius dans son exemplaire personnel de la traduction que Friedrich Risner publia en 1572 d'Alhazen et de Vitellion et dont on ne s'est guère préoccupé jusqu'à présent à ce propos⁶¹. Il s'agit en quelque sorte des "paralipomènes" de Snellius. Ces notes nous apprennent, entre autres, que jusqu'en 1622, Snellius avait fait de nombreuses expériences sur la réflexion, mais non, semble-t-il, sur la réfraction. Elles nous renseignent également sur certaines idées générales de leur auteur, qui avait lu Kepler et concevait la science dans la tradition humaniste : s'il faisait des expériences, le savoir se constituait également, pour lui, par référence constante aux classiques; il cite les témoignages d'Hésiode et d'Ovide aussi bien que le traité de Philopon.

Snellius pensait toujours le mouvement en tant qu'*action* (naturelle) ou *passion* (subie). Il écrit en effet :

Il est naturellement vrai, comme l'affirment Ptolémée, Alhazen, Vitellion et les autres spécialistes d'optique, que la Nature agit en tout selon les lignes les plus courtes. Mais il ne s'ensuit pas pour autant immédiatement que la réflexion se fait toujours selon des angles d'incidence et de réflexion égaux parce que dans ce

cas-là les lignes sont les plus courtes. Car que nous répondront-ils au sujet des rayons réfractés dont il est manifeste qu'ils ne sont pas les plus courts, mais suivent quelqu'autre loi en rayonnant ? Lorsqu'ils assument cela, ils l'assument probablement de la nature dans son action libre, non gênée⁶².

Si la théorie du mouvement fait ainsi intervenir l'opposition déjà rencontrée chez Kepler, on ne trouve pas chez Snellius la même critique de l'animisme. Au contraire, celui-ci apparaît nettement au sujet de la réfraction :

Il est propre au visible de rayonner également dans tous les sens et aussi, parce que le rayonnement est fini, de s'exténuer si bien que, lorsqu'il rencontre un milieu plus dense dont la surface résiste au mouvement qui s'exténue, par quoi ses rayons sont rassemblés, il concentre ses forces pour pouvoir pénétrer. Et tout choc oblique est d'autant plus faible qu'il est plus éloigné de la perpendiculaire, plus il est oblique, et c'est pourquoi, pour avoir plus de force, il se concentre plus près de la perpendiculaire⁶³.

Le même animisme dans l'explication des faits physiques domine l'annotation suivante, qui porte toujours sur la réfraction :

Dans un milieu plus dense, toutes choses, même celles qui sont considérées sous l'angle perpendiculaire, semblent plus proches, parce que la densité est en quelque sorte ennemie de la lumière. Car une eau trop concentrée, comme celle qui est trop profonde, engendre une certaine opacité, telle que le regard ne peut la traverser entièrement. C'est pourquoi la lumière, comme une éponge qui sent qu'on la détache, se contracte...⁶⁴

Il apparaît clairement dans ces passages que Snellius est un héritier de l'animisme que Kepler récuse. L'interprétation qu'il donne à ses expériences, les réponses possibles qu'il en attend, peuvent donc parfaitement faire intervenir des considérations où la lumière agit en fonction d'un but à atteindre — finalisme que Kepler rejette, comme nous l'avons vu. Il n'est donc pas surprenant que Snellius ait envisagé ces rapports à la normale dont Kepler se détournait comme d'une impossibili-

té. Un certain "retard" théorique se révèle donc heureux, au moins dans ce cas-ci. Mais en même temps on comprend aussi que Descartes, dans l'hypothèse où il aurait eu connaissance du manuscrit, a pu juger que la loi de Snellius relevait d'un faux savoir et qu'elle était à *re-* trouver à partir d'autres principes. Les présomptions du droit à l'appropriation d'une découverte ne sont pas nécessairement basées sur une priorité chronologique. Par rapport à Snellius, à qui on l'oppose toujours, Descartes offrait une justification théorique de la loi qui était entièrement différente et qui devait lui apparaître de loin supérieure. S'il n'est pas vrai que tout peut marcher aux yeux d'un chacun, il y avait là sans doute, à ses yeux, un argument suffisant pour garder le silence sur le Hollandais et s'approprier *de droit* la découverte en tant que *loi*, c'est-à-dire susceptible d'être imposée à tous dans la représentation scientifique de la nature.

Notes

1. Sur cette question, je me permets de renvoyer à l'introduction de ma traduction française : Galilée, *Le Messager des étoiles*, Paris, Seuil, 1992.
2. P. Feyerabend, *Against Method*, Londres, Verso, 1978.
3. Sur cette notion de "poétique" scientifique, voir mon ouvrage : *La structure poétique du monde : Copernic, Kepler*, Paris, Seuil, 1987.
4. L'*Optique* de Ptolémée n'est connue que par une traduction latine d'une version arabe perdue. Il manque le livre I et la fin du livre V. Voir l'édition d'A. Lejeune, Louvain, Publ. de l'Université, 1956.
5. Précisons que pour Ptolémée, les rayons sont une commodité de mathématicien, mais n'ont pas d'existence physique. Cf. D.C.

Lindberg, *Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1978, pp. 15-16.

6. I désigne l'angle d'incidence et r , selon les cas, l'angle de réflexion ou de réfraction. Puisque Ptolémée considère que les rayons sortent de l'oeil, l'angle d'incidence correspond, chez lui, à l'actuel angle de réfraction. Jusqu'au début du XVIIe siècle, Kepler inclus, on entend par "angle de réfraction" l'actuel angle de déviation (voir *infra*, fig. 3).
7. Comme la réflexion pouvait être considérée comme un cas particulier de la réfraction, où la différence de densité entre les milieux était telle qu'elle empêchait toute pénétration et obligeait le rayon de rebondir, on peut supposer que Ptolémée espérait obtenir une relation du type : $i : r : i_1 : r_1$.
8. Lorsque, dans le cas du passage de l'air dans l'eau, les angles d'incidence sont successivement de 10° , 20° , 30° ..., les angles de réfraction sont de 8° , $15^\circ 1/2$, $22^\circ 1/2$, etc. La différence des différences entre deux angles de réfraction successifs ($15\ 1/2 - 8 = 7\ 1/2$; $22\ 1/2 - 15\ 1/2 = 7$; ...) sont d'un $1/2^\circ$. Cette régularité est présente dans les tables de Ptolémée, mais il ne la formule pas expressément. Il en était pourtant conscient, car il a manifestement retouché le résultat d'au moins un cas (l'incidence à 80°) : cf. G. Govi, *L'ottica di Claudio Tolomeo*, Turin, R. Accademia delle Scienze, 1885, pp. xxiv-xxvii.
9. La formule est de G. Simon, *Le regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'Antiquité*, Paris, Seuil, 1988, p. 180.
10. *Ibid.*, p. 176.
11. Voir la démonstration de A. M. Smith, "Ptolemy's Search for a Law of Refraction : a Case-Study in the Classical Methodology of 'Saving the Appearances' and its Limitations", *Archive for History of Exact Science*, XXVI (1982), spéc. pp. 235-236.

12. Cf. E. Cantore, "Genetical Understanding of Science : Some Considerations About Optics", *Archives internationales d'histoire des sciences*, XIX (1966), pp. 333-363. En fait, la solidarité de l'astronomie et de l'optique de l'Antiquité va beaucoup plus loin. Si l'astronomie cherchait à "sauver les apparences" (à ramener la diversité des mouvements célestes à une régularité géométrique sous-jacente), l'optique cherchait en quelque sorte, de même, à "sauver les apparences des apparences", c'est-à-dire à ramener la vision à une semblable régularité euclidienne : voir A.M. Smith, "Saving the Appearances of the Appearances : the Foundations of Classical Geometrical Optics", *Archive for History of Exact Science*, XXIV (1981), pp. 73-99.
13. Simon, *o.c.*, p. 177
14. Cf. A.M. Smith. "Ptolemy's Search..." (*o.c.*), p. 237.
15. G. Simon, *o.c.*, p. 183. Cf. également A. De Pace, "Elementi aristotelici nella *Ottica* di Tolomeo", *Rivista critica di storia della filosofia*, XXXVI (1981), pp. 123-138.
16. Pour une vue d'ensemble, cf. D. C. Lindberg, *Theories of Vision from al-Kindi to Kepler*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1976, chap. 4-6. Sur Robert Grosseteste, qui ne semble pas avoir connu Alhazen, voir B.S. Eastwood, "Grosseteste's 'Quantitative' Law of Refraction : a Chapter in the History of Non-Experimental science", *Journal of the History of Ideas*, 1967, pp. 403-414.
17. Au moyen âge, son traité d'optique était appelé *Perspectiva* ou *De Aspectibus*. Trad. franc. d'un ouvrage plus bref par R. Rashed : "Le discours de la lumière", *Revue d'histoire des sciences*, XXI (1968).
18. Deux arguments pour cette théorie de la *réception* par l'oeil : après avoir regardé le soleil, on continue à le voir, même les yeux

fermés; et la douleur dans l'oeil que provoque la vue d'un objet brillant tel que le soleil.

19. Le but n'est pas de résumer ici la théorie complète de la vision chez les perspectivistes. D'où quelques simplifications : ainsi, le rayon n'est en fait, pour Alhazen et les autres, qu'une fiction mathématique.
20. Witelo attribue cette prépondérance de la direction perpendiculaire à l'influence céleste (*Perspectiva*, II, théorème 47).
21. Cf. A.M. Smith, "Getting the Big Picture in Perspectivist Optics", *Isis*, LXXII (1981), pp. 568-589, surtout pp. 581-582.
22. Il faut nuancer ce qu'affirme M. Authier à ce propos ("La réfraction et l'oubli' cartésien", dans M. Serres (éd.), *Eléments d'histoire des sciences*, Paris, Bordas, 1988, p. 257).
23. Witelo, *Perspectiva*, II, théorème 47.
24. R. Bacon, *De multiplicatione specierum*, II, 3. John Pecham critique ce vocabulaire : *Perspectiva communis*, I, proposition 15.
25. Il y avait eu des éditions indépendantes de Witelo en 1535 et 1551 déjà, à Nuremberg.
26. *Paraplipomènes à Vitellion*, IV, trad. C. Chevalay, Paris, Vrin 1980. Voir également la *Dioptrique* de Kepler, axiomes 6-8, au sujet du cristal et du verre (*Gesammelte Werke*, t. IV, p. 357) : si l'angle d'incidence ne dépasse pas 30° , l'angle de réfraction est dans le rapport : $r = 2/3$ i. Dans un ouvrage antérieur, mais publié seulement en 1611 (*Photismi*), Maurolico avait posé pour tous les angles le rapport : $r = 5/8$ i.
27. Dans une lettre du 2 mars 1629, Kepler reconnaît ne pas avoir trouvé "les véritables causes qui déterminent la quantité des

- réfractions" (*Gesammelte Werke*, t. XVIII, p. 388). Dans sa *Dioptrique*, il réclame néanmoins une sorte de priorité théorique pour l'invention de la lunette, en se référant à un schéma de ses *Paralipomènes* (trad. cit., p. 364) où il illustre, en les *juxtaposant*, mais ne les *combinant* pas, la divergence et la convergence produites par des verres concaves et convexes.
28. Plus tard, après avoir eu connaissance des expériences de Harriot, Kepler sera amené à distinguer la densité mécanique et la densité optique, mais, dans la *Dioptrique*, il ne reprendra pas ses recherches à partir de cette distinction. Descartes, de son côté, sera amené à insister sur la distinction entre la densité et la dureté.
29. *Paralipomènes*, trad. cit., p. 210.
30. G. Simon, *Structures de pensée et objets de savoir chez Kepler*, Lille, Univ. de Lille III, Atelier de Reproduction des Thèses, 1979, t. I, p. 485. Kepler affirme cette réversibilité dans les *Paralipomènes* (IV, 6, prop. 6. trad. cit., p. 246) et, avec plus d'insistance, dans sa *Dioptrique* (axiome III).
31. C. Chevalery dans *Paralipomènes*, trad. cit., p. 69.
32. *Paralipomènes*, trad. cit., pp. 105-106.
33. *Paralipomènes*, trad. cit., pp. 210-211.
34. *Gesammelte Werke*, t. III, p. 258.
35. *Paralipomènes*, trad. cit., p. 217.
36. *Ibid.*, p. 218.
37. Voir *Logik*, §§ 81 et 84, ainsi que l'analyse qu'en fait E. Melandri, *La linea e il circolo*, Bologne, Il Mulino, 1968, pp. 586 sqq., définissant l'analogie comme une "induction intensionnelle", alors

que l'induction au sens courant devient une "induction extensionnelle".

38. *Ibid.*, p. 224.
39. *Ibid.*, p. 241.
40. *Ibid.*
41. *Règles utiles et claires pour la direction de l'esprit et la recherche de la vérité*, trad. cit., p. 27. L'annotation de cette traduction, faite par J.-L. Marion et P. Costabel, mentionne certaines allusions aux *Paralipomènes*, mais non pas cette relation-ci.
42. *Paralipomènes*, trad. cit., p. 241.
43. *Ibid.*, p. 107.
44. *Ibid.*, p. 108. La diffusion sphérique de la lumière est déjà affirmée par les "perspectivistes". Mais Kepler la replace dans son univers (physique *et* métaphysique) à lui et la soumet à ses propres exigences épistémologiques.
45. *Gesammelte Werke*, t. XVI, p. 158.
46. *Paralipomènes*, trad. cit., p. 177.
47. Voir mon ouvrage *La structure poétique...*, chap. 9.
48. Voir les propositions I, II, III et VI de la 6ème partie du chapitre IV des *Paralipomènes*. Traditionnellement, on admet une relation additive entre ces deux facteurs, ce qui conduit à une contradiction avec des formules ultérieures. C. Chevalay (trad. cit., p. 467) propose d'y voir une relation multiplicative, ce qui lève la contradiction et est plus conforme au sens habituel des termes latins employés par Kepler. La conception d'un angle de réfrac-

- tion ayant deux composantes sera critiquée par Descartes dans ses *Règles... pour la direction de l'esprit...*: voir le commentaire de P. Costabel dans la trad. cit., p. 197.
49. *Loc. cit.*, prop. II (trad. cit., pp. 242-243). Voir fig. 4. Puisque $\sec \alpha = 1 : \cos \alpha$, on constate que dans le triangle BLM (où $\cos BML = LM : BM$) $\sec BML = BM : LM$; et aussi : $BM = LM \cdot \sec BML$. D'autre part, $BML = BAC$ (puisque l'angle LBM est commun aux triangles rectangles ABC et BLM) et donc $BM = LM \cdot \sec BAC$. Comme AB et KM sont parallèles, LM est constant et les lignes BM augmentent donc comme $\sec BAC$.
50. *Loc. cit.*, prop. VI (pp. 244-245). Dans ce cas, le rayon réfracté s'éloigne de la perpendiculaire. Si l'incidence est rasante (tendant vers 90° , et donc $\cos i$ tendant vers 0), la sécante de l'incidence (1 : 0) tendrait vers l'infini. Or, l'angle de déviation, loin de devenir infini, ne dépasse jamais 90° .
51. *Ibid.* Dans la fig. 4, il s'agit de l'angle RBM. Au rapport $BM : LM$ (voir note 3), Kepler substitue donc $BM : BR$ ou la sécante de l'angle RBM (dont le cos est : $BR : BM$).
52. *Paralipomènes*, trad. cit., p. 241.
53. Cf. G. Simon, *Structures de pensée...* (o.c.), pp. 507-508.
54. G. Simon, o.c., p. 486.
55. *De Briefwisseling van Const. Huygens*, éd. Worp, t. I (1911), p. 263.
56. *De lucis natura et proprietate*, Amsterdam, 1662, pp. 36-37.
57. C. Huygens, *Oeuvres complètes*, t. X, p. 405.
58. *Ibid.*, t. XIII, p. 7.

59. Voir C. De Waard, "Le manuscrit perdu de Snellius sur la réfraction", *Janus*, XXXIV (1935). pp. 51-73.
60. Ainsi l'établissement des valeurs maximales de l'angle de réfraction pour le verre et pour l'eau (I, 33; De Waard, *o.c.*, p. 66).
61. Voir J.-A. Vollgraff, *Risneri Opticam cum annotationibus Willebrordri Snellii*, Gand, Plantin, 1918.
62. *Ibid.*, p. 27b.
63. *Ibid.*, p. 29b.
64. *Ibid.*

