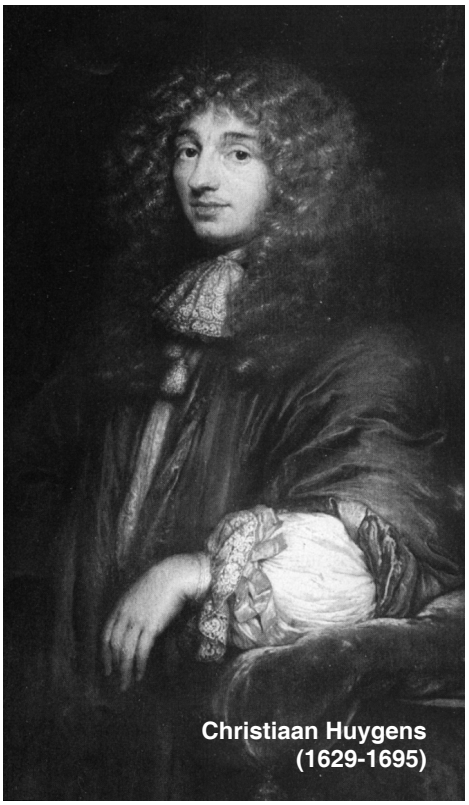
Avec Huygens, rendons la lumière moins obscure



Christiaan Huygens (1629-1695)

Pierre Bonnefoy

Fusion a entrepris des recherches sur la collaboration entre Ampère et Fresnel au début du XIXe siècle, en optique et en électrodynamique. Nous présenterons très bientôt dans nos colonnes cette collaboration qui a provoqué une véritable révolution dans l'ensemble de la physique. Cependant, pour permettre au lecteur d'avoir une meilleure compréhension du contexte historique sous-jacent à cette révolution, nous retraçons ici, en guise de prologue, les grandes lignes du débat fondamental sur la question de la lumière.

La science de l'optique a connu un développement considérable au cours du XVIIe depuis les travaux de Snell sur la réfraction jusqu'à l'*Optique* de Newton. Au début du XIXe siècle, Young et surtout Fresnel aidé d'Ampère et d'Arago, vont révolutionner la théorie de la lumière et changer plus généralement la vision que les physiciens ont de notre Univers. Cependant, il y a là un fait singulier pour l'histoire de la science : entre Newton et Fresnel, c'est-à-dire pendant un siècle, la science de la lumière a stagné alors que les chercheurs disposaient déjà des *faits* expérimentaux qui ont permis à Fresnel de faire ses percées décisives. En effet, la diffraction avait déjà été observée en 1665 par Grimaldi et la double réfraction du spath d'Islande avait été correctement décrite en 1678 par Huygens. Par ailleurs, le calcul différentiel de Leibniz – un outil indispensable pour ces recherches – date de la même époque.

Alors, comment expliquer que relativement peu de progrès aient été effectués dans ce domaine au cours du XVIIIe siècle ? Fallait-il un temps de gestation pour « digérer » toutes les découvertes précédentes ? Ou bien peut-être que la pensée scientifique s'est alors trouvée dans une impasse ?

Retour sur la loi des sinus

Il serait évidemment très long de développer un historique complet de la science de la lumière depuis la nuit des temps jusqu'à la période d'obscurité que nous venons d'évoquer. Nous disposons cependant d'un petit « motif générateur » dont le développement, tel un thème musical dans une composition classique, marque les différentes « étapes » de l'histoire de la science de la lumière. La manière dont chaque scientifique développe ce « motif » constitue une sorte d'image condensée de sa vision de la science et de l'Univers. Ce « motif », c'est le phénomène de la réfraction.

• Les Grecs considéraient qu'un rayon lumineux prend *le plus court chemin* pour se rendre d'un point à un autre. C'est d'ailleurs à partir de ce principe qu'ils avaient établi la loi de la *réflexion* qui stipule que le rayon incident et le rayon réfléchi forment un même angle avec la normale de la surface réfléchissante (**Figure 1**). Ils avaient cependant remarqué qu'un tel principe, énoncé de la sorte, ne peut pas être universel. En effet, en passant d'un milieu transparent à un autre, le rayon lumineux change en général de direction. Chacun de

nous a fait l'expérience suivante : lorsque l'on plonge une règle droite dans l'eau, celle-ci apparaît brisée. Sur la **figure 2**, l'observateur « vise » l'extrémité de la baguette et l'eau étant un milieu plus réfringent que l'air, le rayon lumineux se rapproche davantage de la normale dans l'eau que dans l'air : l'angle *i* est plus grand que l'angle *r*. Pour que le lecteur ne commette pas la même erreur que Descartes, il remarquera que la conséquence de ce fait – la lumière étant plus réfractée dans l'eau que dans l'air (et pas l'inverse !) – est que la baguette semble brisée « vers l'avant ».

• Les principes qui régissent cette réfraction qui contredit le principe de *plus court chemin* tel qu'énoncé par les Grecs, n'ont en fait été mis en équation pour la première fois qu'aux alentours de 1621 par l'astronome hollandais Willebrord Snell sous la forme de la fameuse *loi des sinus*. On ne sait malheureusement pas grand chose des travaux de Snell et comment il a établi sa formule. Cependant, selon Fermat et Leibniz, Snell n'a pas agi empiriquement et devait sans aucun doute rechercher un principe universel de la nature pour généraliser le principe de plus court chemin. Leibniz écrit dans son *Discours de métaphysique* : *« Il me semble que M. Snellius, qui a été le premier à découvrir les lois de la réfraction, aurait attendu longtemps avant de les trouver s'il avait essayé de savoir d'abord comment la lumière était formée. Mais il a apparemment suivi la méthode que les anciens avaient employée pour la Catroptique, c'est-à-dire la méthode des causes finales. »*

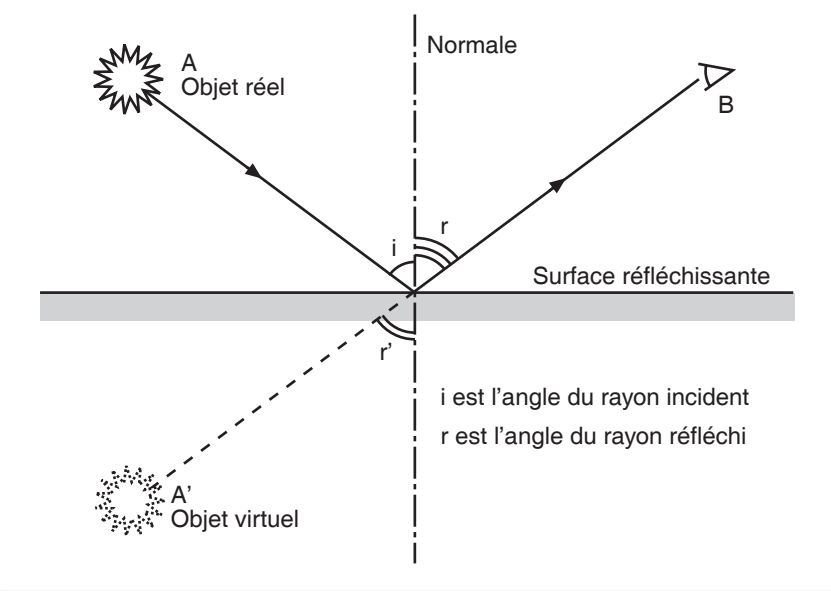
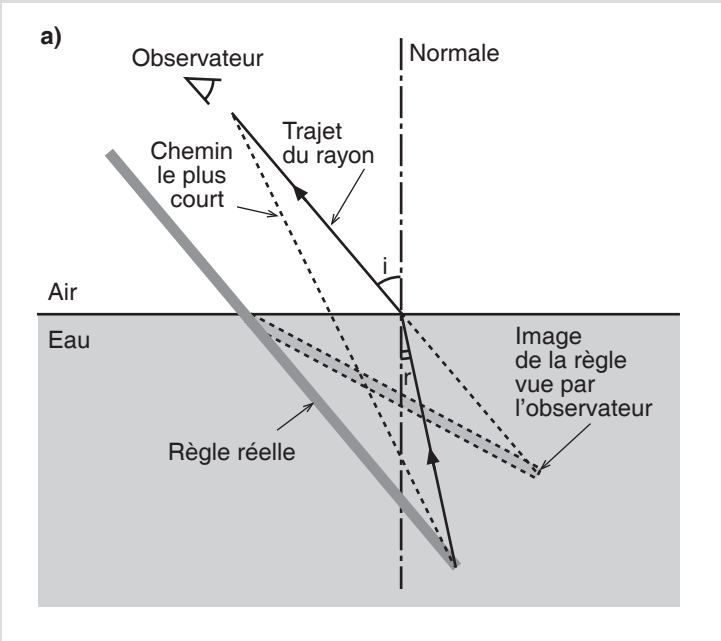


Figure 1. Le plus court chemin entre A' et B étant la ligne droite, r est donc égal à r'. Or, par symétrie, i est égal à r', donc i est égal à r.

Nous allons nous limiter ici à donner l'expression géométrique de la réfraction. Si l'on considère un rayon lumineux qui traverse obliquement une surface séparant deux milieux transparents différents, le rapport des sinus des angles d'incidence et



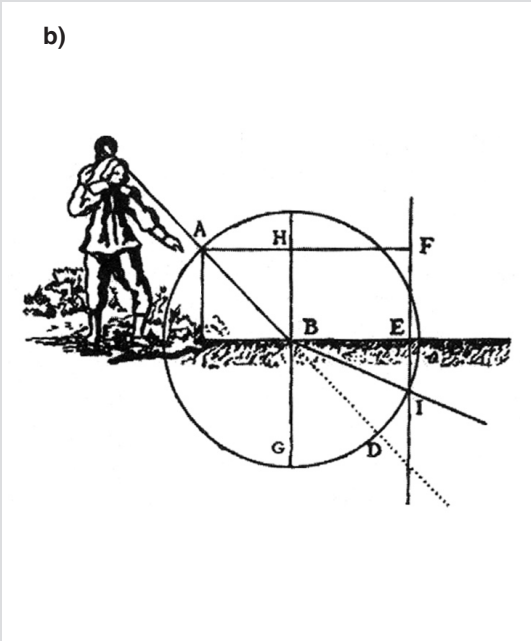


Figure 2. On voit que le corps de la baguette semble plus « rasant » par rapport à la surface entre l'air et l'eau que ce qu'il n'est en réalité. On voit également que l'angle de réfraction r est plus petit que l'angle d'incidence i, contrairement à ce que montre le schéma (en b) publié par Descartes. Les proportions ne sont pas respectées sur le schéma.

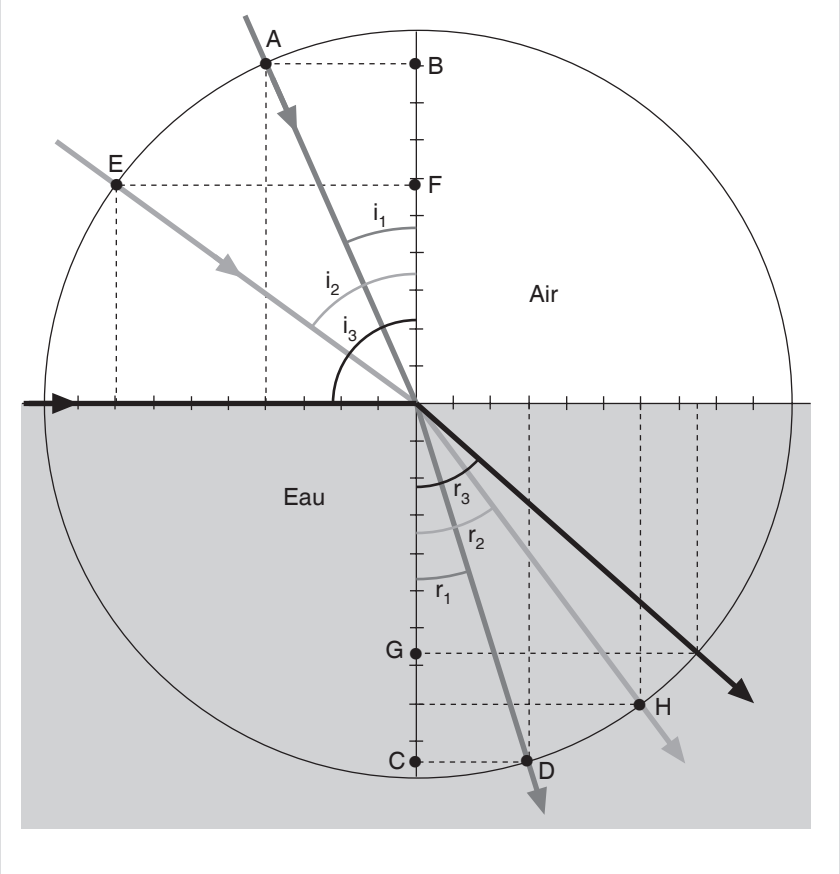


Figure 3. La loi des sinus. Le rapport de l'angle incident sur le sinus de l'angle de réfraction est constant, c'est-à-dire indépendant des angles d'incidence et de réfraction.
sin i_1/sin r_1 = AB/CD = 4/3
sin i_2/sin r_2 = EF/GH = 8/6 = 4/3
sin i_3/sin r_3 = 10/7,5 = 4/3

de réfraction est constant, quelles que soient les valeurs de ces angles par ailleurs, et ce rapport dépend de la nature des deux milieux (air, eau, verre, etc.). Sur la **figure 3**, nous avons pris pour exemple deux milieux dont le rapport des sinus est de 4 : 3, ce qui correspond à peu près au rapport de l'air et de l'eau, et nous représentons deux rayons incidents d'obliquités différentes.

Notons au passage que si le rayon dans l'air est perpendiculaire à la surface de contact, il en sera de même pour le rayon dans l'eau (dans ce cas limite, le rayon de lumière n'est pas réfracté). Si l'on examine l'autre cas extrême – le cas où le rayon dans l'air est « rasant », l'on constatera qu'il existe un « angle limite » que le rayon dans l'eau ne pourra pas dépasser.

Si l'on imagine maintenant que le rayon ne passe pas de l'air dans l'eau mais le contraire, on observera que la loi des sinus continue à s'appliquer. Cela a notamment pour conséquence que si le rayon dans l'eau dépasse la « valeur limite » signalée plus haut, la lumière ne parviendra pas à passer dans l'air et sera totalement réfléchie dans l'eau.

• Descartes a rencontré Snell en 1625 peu de temps avant la mort de ce dernier. Quelques années plus tard Descartes publia la loi des sinus qu'il prétendit avoir trouvée lui-même et que l'on appelle aujourd'hui encore dans les écoles la « loi de Descartes ». Néanmoins, il donne de « sa » découverte une « explication » tellement fausse et confuse qu'il devient évident qu'il n'a pas pu aboutir au « bon résultat » autrement qu'en plagiant Snell (voir *Fusion* n°65).

Selon Descartes, en effet, le rayon de lumière qui passe de l'air dans l'eau peut être comparé à une balle qui traverse une toile. Le « choc » de la balle contre la toile ne modifierait que la composante de la vitesse perpendiculaire à la surface de séparation (bizarrement, malgré cette image « corpusculaire », Descartes considère la lumière comme un fluide continu). Pour que son explication corresponde à la loi des sinus – c'est-à-dire pour que le rayon ait un angle plus petit avec la normale dans l'eau que dans l'air, tel que le montre l'expérience – il faut admettre que la lumière est accélérée lorsqu'elle passe dans l'eau, ce que Descartes postule *a priori*. Toutefois, quand on regarde la figure qu'il donne pour illustrer son propos, on voit exactement le contraire : dans l'eau, le rayon s'éloigne de la normale. Cela contredit non seulement la loi des sinus mais également le postulat – faux – de Descartes selon lequel le rayon est plus rapide dans l'eau car il y est plus proche de la normale. Descartes semble avoir appris très superficiellement la loi de Descartes et serait certainement recalé en interrogation d'optique !

Leibniz et Fermat ont dénoncé cette supercherie manifeste. Fermat écrit dans sa correspondance : « *La démonstration de la réfraction [par Descartes] me semble un véritable paralogisme premièrement parce que Descartes la fonde sur une comparaison et que la géométrie ne se pique guère de ces figures. […] deuxièmement parce qu'il suppose que le mouvement de la lumière qui se fait dans l'air et dans les corps rares est plus lent que celui qui se fait dans l'eau et dans les autres corps ce qui semble choquer le sens commun.* » Nous pouvons aussi mentionner le fait que Descartes n'en est pas à une incohérence près puisqu'il suppose ici que la lumière change de vitesse quand elle change de milieu et qu'ailleurs il affirmera que la lumière a une vitesse infinie – affirmation qui sera d'ailleurs réfutée définitivement par Römer en 1676, malgré l'opposition des cartésiens de son temps.

• Contrairement à Descartes, Fermat ne cherche pas à donner une analogie qui puisse « coller » à la réalité expérimentale de la loi des sinus. Fermat considère le phénomène de réfraction non pas comme une propriété de la lumière mais plutôt comme *le reflet d'une caractéristique universelle*. Si l'on repense au principe du plus court chemin des Grecs, on se rend compte que l'on a déjà là en germe la démarche de Fermat. Le principe des anciens est évidemment incomplet mais l'idée qui y a conduit

est la bonne : la *recherche d'une caractéristique universelle*. Fermat va donc essayer de généraliser le principe de moindre chemin de manière à rendre compte de la diffraction, et il obtient ce que l'on appelle le *principe de moindre durée*.

Pour en arriver là, il a d'abord émis l'hypothèse que la lumière a une vitesse finie (avant même la vérification expérimentale de Römer), et que cette vitesse dépend du milieu dans lequel elle se trouve. Le principe de moindre chemin qui a conduit à la loi de la réflexion s'avère donc être un cas particulier du principe de Fermat. Fort de cette hypothèse, Fermat parvient à montrer que si l'on considère deux points se trouvant dans deux milieux différents séparés par une surface commune, le trajet du rayon construit selon la loi des sinus correspond effectivement à la durée la plus courte pour que la lumière puisse aller d'un point à un autre. Il s'avère ainsi que sans connaître la vitesse de la lumière dans aucun milieu, on peut en connaissant le rapport des sinus de deux milieux différents (par des mesures angulaires de la réfraction) en déduire le rapport des vitesses de la lumière dans ces deux milieux.

Il va sans dire que les cartésiens, préoccupés seulement par la recherche des causes efficientes, se sont opposés de façon virulente à cette idée d'une caractéristique universelle.

• Cette démarche a conduit Fermat à la découverte, dans les mathématiques, de sa méthode des *maxima-minima*, qui fut le prélude au calcul différentiel de Leibniz. Ce dernier a repris le flambeau de Fermat pour accomplir une révolution supplémentaire. En effet, il publie en 1684 son *Nova methodus* qui est en fait le premier texte dans lequel est présenté le calcul différentiel. Et l'exemple que Leibniz choisit dans ce texte pour illustrer la première fois la puissance de son calcul n'est rien d'autre que la loi des sinus. Considérant la différence de vitesse de la lumière dans les différents milieux et considérant le principe de moindre durée pour que la lumière aille d'un point à un autre, il arrive à faire une démonstration mathématique de la loi des sinus en un calcul de seulement quelques lignes.

Il faut cependant préciser que Leibniz généralise encore une fois la caractéristique universelle établie par Fermat : au principe de moindre durée, il substitue son *principe de moindre action* qui devient le pilier de ses recherches dans tous les domaines de la physique.

• Au début du XVIIIe siècle, deux ouvrages font référence sur la question de la lumière. Il s'agit du *Traité de la lumière* écrit par Christiaan Huygens en 1678 et publié en 1690, et de l'*Optique* d'Isaac Newton publié en 1704. L'opposition des conceptions sous-jacentes à ces deux ouvrages – le premier présentant la *théorie ondulatoire* de la lumière et le second la *théorie corpusculaire* – est légendaire et bien connue de tous les physiciens d'aujourd'hui… Bien connue ? Ce n'est peut-être pas tout à fait sûr. Surtout si l'on se fie au jugement de Michel Blay du CNRS, grand spécialiste de la question puisque c'est lui qui présente les deux textes dans leurs éditions actuellement disponibles en France (*Traité de la lumière*, Ed. Dunod et l'*Optique* trad. de Jean-Paul Marat, Ed. Christian Bourgois). Voila ce qu'il écrit en marge du *Traité de la lumière* : *« Christiaan Huygens, qui était hollandais, fut hautement respecté par son époque et sa réputation ne le céda en rien à celle de Newton. On sait que tous deux étudièrent la nature de la lumière ; chacun développant une conviction particulière. Newton prêcha en faveur de la thèse corpusculaire, Huygens, lui, pour l'état ondulatoire.* L'avenir, conjointement, allait leur donner raison. » [Souligné par nous.]

Etant donné que l'on a pu mettre en évidence des phénomènes ondulatoires et des phénomènes corpusculaires, le point de vue de la plupart des physiciens d'aujourd'hui est de considérer que les deux conceptions antagonistes de Newton et de Huygens ont le même degré de légitimité. Si nous admettons cependant ce point de vue confortable et stérile, ne risquons-nous pas plutôt de passer à côté de quelque chose d'essentiel dans la science ? Ne sommes-nous pas condamnés à répéter de nombreuses connaissances toutes faites mais à ne jamais rien découvrir ?

Si nous voulons comprendre pourquoi le début du XVIIIe siècle marque le début d'une longue période de stagnation dans la science de la lumière, nous devons d'abord examiner plus finement les textes de Huygens et de Newton, en commençant par celui qui a été publié en premier.

Le Traité de la lumière

La lecture de l'ouvrage de Huygens peut sembler contredire quelque peu ce que nous avons présenté plus haut. En effet, d'après notre intuition immédiate, la lumière semble être composée d'une multitude de *rayons* lumineux. D'ailleurs, les constructions qui présentent le phénomène de la réfraction nous montrent bien comment un rayon rectiligne change de direction en changeant de milieu. Tout le monde utilise la notion de rayon pour parler de la lumière, c'est une évidence qui n'a même pas besoin d'être évoquée. Pourtant, dans le *Traité de la lumière*, Huygens utilise bel et bien la notion de rayon mais d'une manière quelque peu inhabituelle. Pour lui, l'onde « précède » le rayon : le rayon est un phénomène compliqué qui est le résultat d'une certaine combinaison de phénomènes ondulatoires, mais ce n'est pas un *élément simple* ! C'est juste une manière commode de décrire certains phénomènes. De la même manière, si l'on veut utiliser une image de Leibniz, nous dirons que tous les matins le Soleil se lève, alors que nous savons parfaitement qu'il ne se lève pas à proprement parler, mais que c'est la Terre qui tourne.

Donc, pour Huygens, le point de départ de sa construction c'est l'onde, et même l'onde sphérique en première approximation. Il faut imaginer que la lumière se comporte un peu de la même manière que l'onde qui se forme à la surface d'un plan d'eau. Chacun de nous a déjà observé des cercles de vaguelettes concentriques qui vont en s'élargissant lorsqu'un objet tombe dans l'eau. Il y a en fait une perturbation circulaire qui se déplace sur la surface, en s'éloignant du centre, mais il n'y a pas de déplacement de « matière » : si un objet se trouve sur le chemin de la vague, il est momentanément soulevé sans pour autant suivre la perturbation qui s'éloigne de son centre.

Huygens pense que la lumière est une onde qui se forme de la même manière, non pas dans un plan mais dans tout l'espace. Par ailleurs, il n'y a pas une source unique de lumière (comme le point où l'objet tombe dans l'eau) mais il y en a une infinité… En fait, tout point de l'espace qui est illuminé devient à son tour une source de lumière secondaire

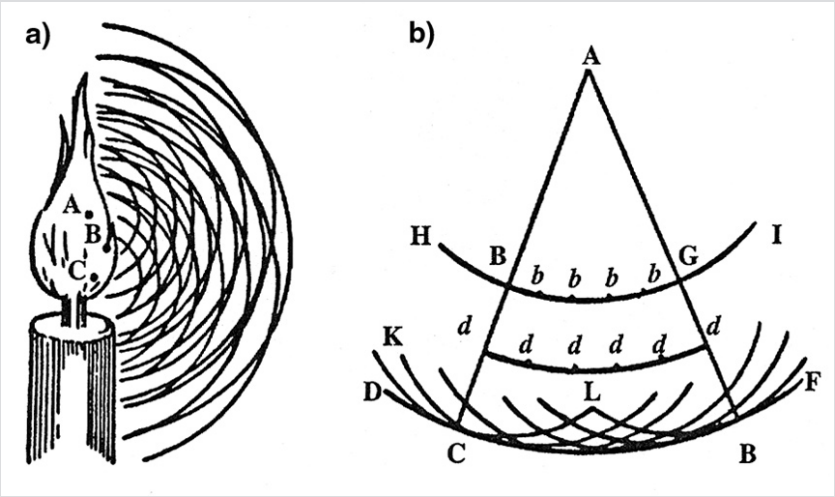


Figure 4.

autour de laquelle vont se développer de nouvelles ondes sphériques (**Figure 4**). Dans ces conditions, il est clair qu'à tout instant, tout point de l'espace se trouve lui-même à la conjonction d'une infinité d'ondes provenant de tous les autres points de l'espace. Bien entendu, de même que dans les vagues, il y a des creux et des crêtes, toutes les contributions des ondes secondaires en un point de l'espace ne vont pas nécessairement produire le même effet mais vont plutôt se perturber réciproquement : c'est ce qui explique que l'on ait pas une illumination infinie en chaque point de l'espace. Néanmoins, on peut voir sur la **figure 4b** comment sur le cercle DCBF, l'onde principale provenant de A s'additionne aux ondes secondaires provenant des points b et des points c, de telle manière que l'onde principale constitue ici l'enveloppe géométrique de toutes les ondes secondaires. Cette enveloppe constitue ainsi un « front d'ondes », et celui-ci va à son tour générer des ondes secondaires au fur et à mesure de son développement. Bien entendu, si l'on isole par la pensée une ligne radiale provenant de la source initiale, on obtient en quelque sorte un rayon, mais ce dernier est donc bien le résultat d'un processus et non un élément de base.

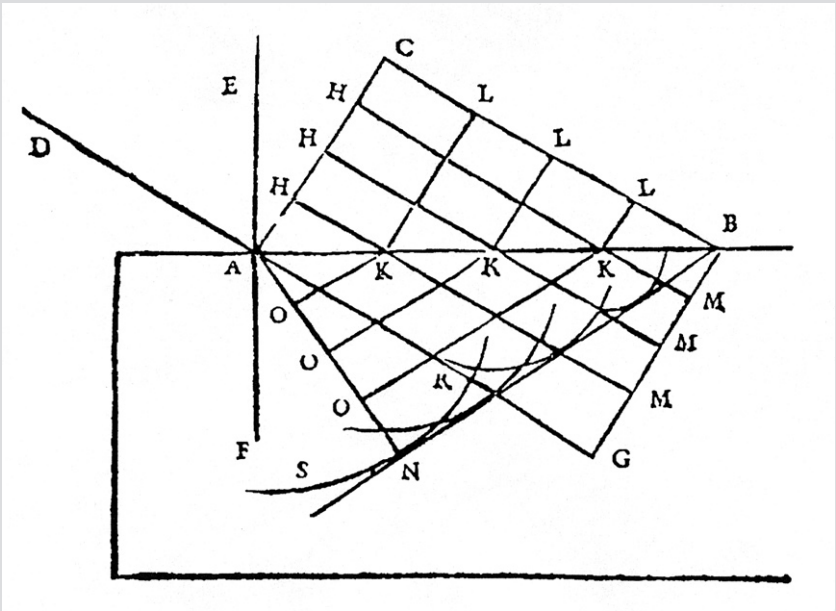


Figure 5.

Il nous faut voir maintenant comment Huygens traite la question de la réfraction à partir d'une telle conception. Par hypothèse, la nature de la lumière est ondulatoire et la vitesse de cette onde dépend du milieu dans lequel elle se trouve. Notons au passage que *Huygens ne fait pas d'hypothèse a priori pour savoir si la lumière est plus rapide ou moins rapide dans les milieux les plus réfringents ou les moins réfringents*. Il suppose simplement que cette vitesse change lorsque l'on change de milieu.

Sur l'exemple de la **figure 5**, on supposera que la vitesse de la lumière dans le premier milieu est plus importante que dans le second et nous verrons ce que cela entraîne pour les rapports des sinus. Le lecteur est invité à reproduire lui même cette figure avec une règle et un compas en choisissant les rapports des vitesses qu'il veut (par exemple 4/3 ou 3/2).

Sur la **figure 5**, la source principale de la lumière se trouve à une distance très grande, considérée comme infinie. Dans ce cas, le front d'onde étant une sphère de rayon infini est considéré comme un plan. Celui-ci est représenté vu « de côté », ce qui nous donne la droite AC, le point A étant le point d'intersection entre le front d'onde et la surface de séparation des deux milieux. La droite DA peut être considérée comme le rayon incident venu du premier milieu et qui atteint le second milieu au point A.

On voit que le front d'onde s'enfonce progressivement dans le second milieu, les segments KL représentent les parties du front qui se trouvent encore dans le premier milieu. Les droites AG, HM et CB représentent les chemins qu'auraient pris les rayons s'il n'y avait pas eu un changement de milieu : le front qui se trouvait initialement en AHC se serait alors translaté en GMB. Mais que devient le rayon DA dans le second milieu ? La lumière va passer du point A à un certain point N qu'il faut déterminer. Quelle est la distance entre A et N ? On sait que pendant la même durée, la lumière passe de A en N et de C en B, et l'on connaît le rapport des vitesses entre les deux milieux : si ce rapport est de 3/2, alors le rapport de CB à AN sera de 3 à 2. Or comme l'on connaît par construction la distance CB, on en déduit la distance AN qui vaut donc les deux tiers de CB. Connaissant cette distance AN, on peut tracer un cercle dont le rayon est cette distance

et dont le centre est A. On sait donc que le point N se trouve sur ce cercle et dans le second milieu, mais il reste à déterminer sa position exacte.

Recommençons le même raisonnement avec un point H intermédiaire entre A et C. Au bout d'un certain temps, le front HC se sera translaté en KL, K étant un point de contact avec le second milieu. Pendant la durée restante, la lumière va passer de L en B dans le premier milieu tandis qu'elle parcourra une certaine distance depuis le point K dans le second milieu – distance que l'on saura déterminer comme précédemment pour AN, en utilisant le rapport des vitesses. On voit que pour chaque point de contact K entre les deux milieux, on peut tracer un cercle dans le second milieu. Il est possible de tracer ainsi autant de cercles que l'on veut.

Or tous ces cercles ont une tangente commune que l'on peut construire : la droite NB qui n'est rien d'autre que la nouvelle position du front d'onde qui se trouvait auparavant en AC. L'intersection de cette droite avec le cercle centré en A, dont elle est la tangente, nous donne le point N. En fait la figure montre différentes étapes de l'évolution du front d'onde.

Il reste à déterminer l'orientation de la droite AN pour voir si la loi des sinus se vérifie bien par cette construction. Il faut donc calculer le rapport des sinus des angles DAE et NAF et s'assurer qu'il est constant, c'est-à-dire qu'il ne dépend pas de l'angle d'incidence. Pour cela considérons que AB est le rayon d'un cercle unitaire. AB est l'hypoténuse de deux triangles rectangles : ACB (car le front d'onde est perpendiculaire au rayon) et ANB (car BN est tangente au cercle de rayon AN). Il en découle que le sinus de l'angle BAC est BC et que le sinus de l'angle ABN est AN. Or l'angle BAC est égal à DAE puisque chacun d'eux ajouté à CAE forme un angle droit. De même, ABN est égal à NAF puisque chacun d'eux ajouté à BAN forme un angle droit.

Le rapport des sinus des angles DAE et NAF est donc égal au rapport de BC et AN. Par construction, on peut établir que ce dernier rapport est égal au rapport des vitesses de la lumière dans les deux milieux (rapport évidemment indépendant de l'angle d'incidence). Ainsi, on retrouve bien la loi des sinus à partir de l'hypothèse ondulatoire de Huygens.

Une conséquence de cette construction saute immédiatement aux yeux : si, comme c'est le cas dans notre construction, le second milieu ralentit davantage la lumière que le premier, alors le rayon réfracté aura un angle plus petit avec la normale que le rayon incident. D'où la réciproque, puisque dans l'eau ou dans le verre, le rayon réfracté est plus proche de la normale que le rayon incident dans l'air, on peut en conclure que la lumière est plus rapide dans l'air que dans ces deux milieux. Huygens prend donc le parti de Fermat contre celui de Descartes. Pour rendre hommage à la démarche de Fermat, Huygens montrera par ailleurs que sa construction respecte le principe de moindre durée par un calcul plus court que son prédécesseur.

Avant de passer à l'examen de l'hypothèse de Newton, nous proposons à notre lecteur d'essayer de refaire la construction de Huygens dans le cas de figure symétrique à celui que nous venons de développer, c'est-à-dire lorsque la vitesse de la lumière dans le second milieu est supérieure à celle dans le premier milieu, et de retrouver encore une fois la loi des sinus. Il faudra simplement prendre garde de ne pas tomber dans un petit piège…

L'Optique

La différence entre les optiques de Huygens et de Newton est flagrante. Chez Newton, le rayon lumineux reprend une importance primordiale : il est constitué d'un train de particules lumineuses très petites et très rapides (mais de vitesse finie) dont le trajet est une *ligne droite*. Cette ligne droite est déviée lorsque les particules rencontrent un obstacle comme, par exemple, la surface qui délimite deux milieux transparents d'indices de réfraction différents.

Newton expose très clairement son hypothèse à la question XXIX : *« Les rayons de lumière ne sont-ils pas formés par de très petits corpuscules lancés par les corps lumineux ? Or de pareils corpuscules pourraient très bien traverser en lignes droites des milieux homogènes sans fléchir vers le corps qui fait ombre, ce que font constamment les rayons de lumière. Ils pourraient aussi avoir plusieurs propriétés, et les conserver en traversant différents milieux ; ce qui convient de même aux rayons de lumière.*

« Les corps diaphanes agissent à certaine distance sur les rayons, en les réfractant, les réfléchissant, les infléchissant : à leur tour les rayons agissent à certaine distance sur les particules des corps pour les échauffer. Cette action et cette réaction ressemblent très fort à l'attraction réciproque des corps. […] » En somme, la lumière chez Newton se ramène au principe de gravitation universelle appliqué aux particules lumineuses.

La plus grande partie de l'*Optique* est une description des expériences de Newton sur la décomposition de la lumière, qu'il explique en montrant que des rayons de couleurs différentes ne sont pas réfractés de manière égale lorsqu'ils traversent un prisme transparent. Ici encore, le phénomène de la réfraction joue un rôle primordial et il convient donc d'examiner la manière dont Newton retrouve la loi des sinus.

En fait, il procède d'une manière qui rappelle beaucoup le « raisonnement » de Descartes, à cette différence près qu'il donne une démonstration mathématique et une figure cohérentes. Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, tout son développement repose sur la théorie de la gravitation universelle appliquée à des particules lumineuses : selon Newton, plus un milieu est dense, plus la force qu'il va exercer sur les corpuscules lumineux sera forte. Ainsi, lorsque la lumière passe de l'air dans le verre ou l'eau, elle voit sa vitesse fortement accélérée dans un espace très étroit qui correspond à l'« épaisseur » de la surface de séparation entre les deux milieux. De plus, cette « accélération » est perpendiculaire à la surface de séparation entre les deux milieux. Comme Descartes, Newton décompose donc la vitesse de la lumière en deux composantes orthogonales : l'une a la direction de la normale au point de contact, l'autre lui est perpendiculaire.

On a représenté sur la **figure 6** un rayon qui passe de l'air dans l'eau (sans respecter les proportions réelles). D'après ce qui précède, la composante de la vitesse parallèle à la surface reste inchangée : cette composante représentée par AO pour l'air est donc égale à la composante OB pour l'eau. Par contre, la composante perpendiculaire à la surface est augmentée, c'est-à-dire que OD pour

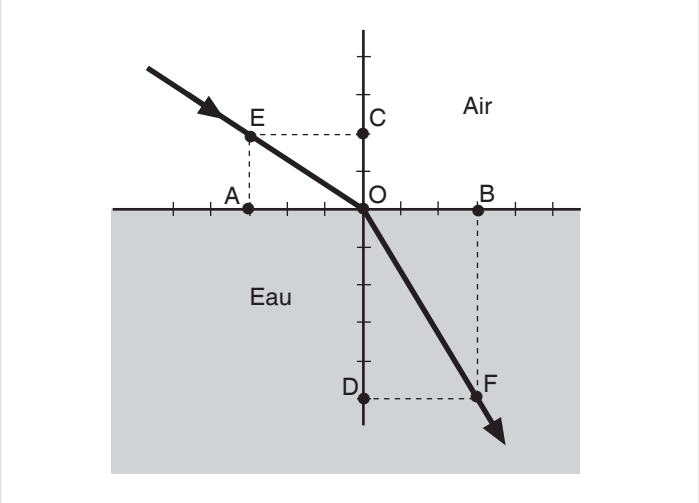


Figure 6. La réfraction selon Newton (et Descartes). La lumière est accélérée dans le sens de la normale à la surface de séparation : si l'on représente les composantes horizontales de la vitesse AO et OB par deux lignes égales, les composantes verticales CO et OD seront telles que OD est plus grande que OC.
(Les proportions ne sont pas respectées sur le schéma.)

l'eau est supérieure à CO pour l'air. Il en résulte que la vitesse totale dans l'eau (OF) est supérieure à la vitesse totale dans l'air (EO). La lumière se déplace donc plus vite dans le milieu le plus réfringent (eau, verre) que dans l'autre (air).

Comment Newton arrive-t-il ensuite à établir la loi des sinus ? Eh bien en donnant la loi mathématique qui permet de calculer l'augmentation de la composante normale de la vitesse ou, en d'autres termes, la relation qui permet d'établir OD à partir de CO. Cela étant réalisé, il est alors en mesure de calculer le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction et de vérifier que ce rapport est constant lorsque ces angles varient – ce qu'il fallait démontrer et ce que Newton démontre effectivement.

Il n'est pas utile ici de rentrer dans le détail des calculs mais il est important de voir comment il établit la relation qui permet de calculer l'augmentation de la composante normale de la vitesse. Suivons Newton : *« Si un mobile, tombant avec une vitesse quelconque sur un espace large, mince, et séparé par deux plan parallèles, vient à être poussé perpendiculairement à travers cet espace vers le plan le plus éloigné, par une force qui à distances données du plan ait une énergie donnée ; la vitesse perpendiculaire de son mouvement, au sortir de cet espace, sera toujours égale à la racine carrée de la somme du carré de la vitesse perpendiculaire de ce mouvement à son incidence sur cet espace, et du carré de la vitesse perpendiculaire que ce mobile aurait à son émergence, si sa vitesse perpendiculaire était infiniment petite à son incidence. »*

Pour un angle d'incidence quelconque, appelons V_1 la vitesse perpendiculaire de la lumière dans l'air et V_2 la vitesse perpendiculaire dans l'eau. Newton introduit ici un cas limite, celui où le rayon dans l'air « rase » la surface de l'eau, c'est-à-dire quand la vitesse perpendiculaire de la lumière est considérée comme nulle. On sait qu'alors le rayon réfracté dans l'eau forme un angle limite avec la normale, la vitesse perpendiculaire de cette lumière dans l'eau n'est donc pas nulle ; appelons-la V_0.

Newton affirme donc que $(V_2)^2 = (V_1)^2 + (V_0)^2$

Cela ne vous rappelle rien ? C'est par une formule identique que l'on peut exprimer la transformation de la vitesse pour un corps qui tombe en chute libre. L'optique de Newton est donc bien développée à partir d'une analogie algébrique avec sa vision de la mécanique : la lumière est pour lui corpusculaire.

Un moment de tension

Arrivés à ce point de notre petit historique nous devrions peut-être marquer une pause et réfléchir un instant. Nous sommes parvenus au début du XVIIIe siècle, la science va stagner. Deux hypothèses contradictoires de la lumière s'affrontent. Quel jugement pouvons-nous porter sur cette situation ? Comment découvre-t-on la vérité ? Le problème ici est que nous croyons déjà connaître « la bonne réponse » et que cette illusion nous empêche de réfléchir en profondeur.

En effet, nous savons déjà que la science du XVIIIe siècle est dominée par les conceptions de Newton. Nous savons qu'en France, la science de la lumière a été plongée dans l'obscurité par… les Lumières, à commencer par le plus menteur d'entre eux, Voltaire, qui s'est montré un agent de propagande enthousiaste pour le newtonisme dans ses *Lettres philosophiques*, sans oublier Buffon qui a traduit *La méthode des fluxions et des suites infinies* de Newton.

Il a fallu attendre qu'un jeune homme, Augustin Fresnel, ait le courage un siècle après Huygens de dire – et de prouver – que le roi Newton est nu. Il a en effet mené toute une série d'attaques contre Newton (voir *Œuvres complètes*) dont la virulence est assez inhabituelle dans l'ensemble de l'histoire de la science. Par exemple : *« Huygens, guidé par une hypothèse pensée dans la théorie des ondes, a reconnu le premier les véritables lois de la double réfraction des cristaux à un axe. Cette découverte était peut-être plus difficile à faire que toutes celles de Newton sur la lumière, et ce qui semble le prouver c'est qu'ici Newton, après d'inutiles efforts pour trouver la vérité, est tombé dans l'erreur. En songeant comment le phénomène de la double réfraction devait piquer sa curiosité, on ne peut pas supposer qu'il y ait donné moins d'attention qu'aux autres phénomènes de l'optique, et on doit être surpris de lui voir substituer une règle fausse à la construction aussi exacte qu'élégante de Huygens, construction qu'il connaissait sans*

doute, puisqu'il cite son Traité de la lumière. *Mais ce qui parait encore plus inconcevable, c'est que l'exactitude de la loi de Huygens ait été méconnue pendant plus de cent ans quoi qu'elle fut appuyée par des vérifications expérimentales de ce grand homme aussi remarquable peut-être par sa bonne foi et sa modestie que par sa rare sagacité. Si nous osions hasarder une explication de ce trait singulier de l'histoire de la science, nous dirions que les considérations puisées dans la théorie des ondes qui avaient guidé Huygens ont fait supposer peut-être aux partisans du système de l'émission, qu'il n'avait pas pu arriver à la vérité par des hypothèses erronées, et les ont empêché de lire son* Traité de la lumière *avec l'attention qu'il méritait.* » Fresnel accuse donc Newton d'avoir publié et imposé des conceptions moins avancées que d'autres dont il avait pourtant connaissance !

Aujourd'hui, nous sommes capables de mesurer la vitesse de la lumière dans différents milieux, nous savons que la lumière est plus rapide dans l'air que dans l'eau ou le verre : nous savons donc que sur cette question Huygens avait « la bonne réponse » et donc que toute la démonstration de la loi des sinus de Newton n'est qu'une construction mathématique sans valeur. Mais est-ce vraiment de cette manière que nous devons chercher la vérité ?

Nous sommes en train de parler de choses que nous avons apprises mais que nous n'avons pas découvertes par nous-mêmes. Fresnel n'avait pas nos appareils de mesure. Où a-t-il donc trouvé le courage pour oser dire « non » à ce que la science de son temps avait admis et entreprendre de longues recherches. Ce n'est pas évident en soi de voir dans la lumière autre chose que des rayons comme Huygens l'a fait. Comment ce dernier a-t-il jugé de ce qui était vrai ou faux ? A son époque, on ne savait pas mesurer directement la vitesse de la lumière. Pourquoi devrait-il être tellement évident que cette vitesse est plus lente dans les milieux « denses » ?

« Oublions » donc notre confort intellectuel et ce que nous avons appris sur la vitesse de la lumière, et essayons de nous replacer mentalement à l'époque de Huygens et de Newton. De quelle autorité pourrions-nous donner raison à l'un plutôt qu'à l'autre ?

La question de l'hypothèse

Comme nous l'avons évoqué plus haut, tout ce débat sur la question de la lumière est vu d'une manière extrêmement réductrice par nos contemporains. Nous entendons dire régulièrement que pour Newton, l'*élément de base* c'est le corpuscule, et que pour Huygens, l'*élément de base* c'est l'onde. Or, comme la physique quantique a mis en évidence des phénomènes corpusculaires et des phénomènes ondulatoires, il n'y aurait donc aucune raison de privilégier l'une de ces conceptions axiomatiques plutôt que l'autre. Nous aurions affaire à deux *objets* différents – l'onde et le corpuscule – qui auraient le même degré de légitimité.

Cependant, en raisonnant de la sorte nous tombons précisément dans le piège des newtoniens anciens et modernes… La différence essentielle entre les deux pensées que nous examinons ne porte pas sur une question d'éléments de base mais sur la *méthode* de pensée. Il existe en effet une manière newtonienne de « faire de la théorie ondulatoire », c'est de considérer qu'il existe un milieu *parfaitement homogène* qui occuperait tout l'Univers et qui servirait de support pour les ondes constituant la lumière.

Maintenant, si nous lisons avec attention la correspondance Leibniz-Clarke (dans cette correspondance Clarke est le porte-parole officiel de Newton, et l'on peut montrer d'une manière générale que Leibniz est un héritier de la même tradition scientifique que Huygens), nous voyons que l'un des principaux reproches que Leibniz fait à Newton est que celui-ci considère qu'il existe dans la nature des objets identiques. En effet, il écrit dans sa cinquième lettre à Clarke au §21, à propos de son principe de la *Raison suffisante* (rien n'arrive dans l'Univers sans qu'il en existe une raison) : *« Il faut avouer que ce grand Principe quoi qu'il ait été reconnu n'a pas été assez employé. […] J'en infère entre autres conséquences, qu'il n'y a point dans la nature deux êtres réels absolus indiscernables : parce que s'il y en avait, Dieu et la Nature agiraient sans raison, en traitant l'un autrement que l'autre ; et qu'ainsi Dieu ne produit point deux portions de matière parfaitement égales et semblables. […] Cette supposition de deux indiscernables, comme de deux portions de matière qui conviennent parfaitement entre elles, paraît possible en termes abstraits, mais elle n'est point compatible avec l'ordre des choses, ni avec la sagesse divine, où rien n'est admis sans Raison. Le Vulgaire s'imagine de telles choses, parce qu'il se contente de notions incomplètes. Et c'est un défaut des Atomistes.* »

En d'autres termes, s'il existait deux corps indiscernables, l'ordre de l'Univers resterait le même si l'on permutait ces deux corps. Il n'y aurait donc aucune raison pour laquelle ces deux corps seraient dans cette situation-ci plutôt que dans celle-là. En conséquence, il y aurait dans l'Univers une chose sans raison, ce qui violerait le principe de la Raison suffisante.

De ce point de vue découle l'impossibilité de la notion même d'atome ou d'*élément de base* (un corollaire de cela est qu'il ne peut pas exister de milieu *homogène*, sinon il suffirait d'en isoler deux parties de mêmes dimensions par la pensée pour obtenir deux objets identiques). Ainsi, chez Leibniz comme chez Huygens, tous les objets qui sont accessibles à nos sens (rayons, ondes, corpuscules, etc.) ne doivent être vus que comme des *singularités* dans des processus. En effet, si rien ne peut être ramené à une combinaison d'éléments de base ou d'objets fixes, la seule chose qui puisse être considérée comme constante dans notre Univers, c'est le *changement*. Et puisqu'il n'existe qu'un seul Univers, ce changement n'est rien d'autre qu'*une action permanente de l'Univers sur lui-même*. Cela nous amène à la question qui constitue le point de départ de toute recherche scientifique : comment peut-on connaître ce changement ? La seule manière possible est la méthode de l'*hypothèse*.

Arrivés à ce point, il convient de revenir sur un point dont la portée est en général très mal comprise et négligée. Dans tous ses écrits, Newton répète avec une insistance pourtant remarquable qu'il ne fait jamais d'hypothèse sur les causes des phénomènes, mais qu'il se contente de décrire les *faits* expérimentaux. Son *Optique* commence par les mots suivants : *« Mon dessein n'est pas d'expliquer les propriétés de la lumière par des hypothèses ; je me borne à les*

énoncer, pour les prouver ensuite par le raisonnement appuyé sur l'expérience [...] » Et son ouvrage est une attaque contre l'hypothèse ondulatoire de Huygens. Lui, Newton, se contenterait d'observer *objectivement* des phénomènes, les rayons, et d'en déduire des lois mathématiques à partir des choses qui sont déjà prouvées ou *évidentes en soi*.

C'est justement cette notion de soi-évidence qui doit – ou qui devrait – nous paraître suspecte. Comme nous l'avons vu ci-dessus, Newton ment quand il prétend ne pas faire d'hypothèse. En effet, son « regard d'expérimentateur » n'est pas « objectif » (rien ne saurait l'être), mais il est déjà « préformé » par son hypothèse – fausse – que la lumière est formée d'éléments de base corpusculaires.

Comment dans ses conditions trouver la cause des phénomènes que l'on observe ? Comment peut-on trouver ces processus qui gouvernent la nature et qui ne sont pas accessibles à nos seuls sens ? Comment ne pas se laisser abuser par des hypothèses fausses ?

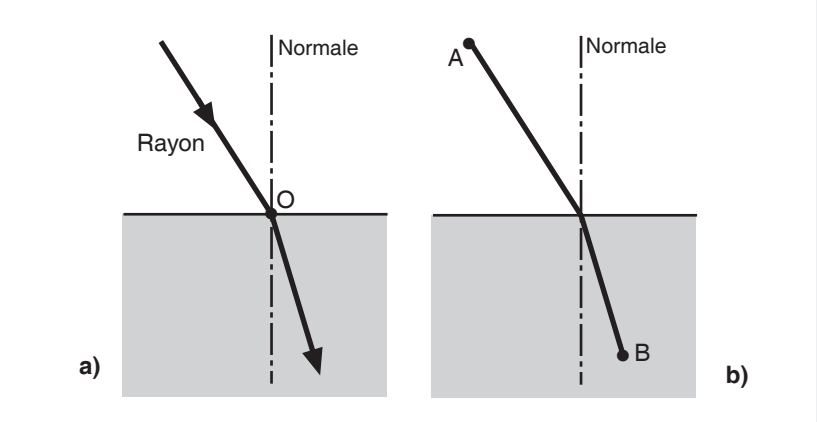


Figure 7. A gauche, c'est le point O qui détermine l'effet (la réfraction). A droite, pour aller de A à B, le rayon prend la durée la plus courte – c'est l'Univers qui détermine l'effet local.

Causalité et principe de moindre action

Pour donner une image qui caractériserait la différence entre les manières de penser associées à la tradition de Fermat, Huygens, Leibniz et Fresnel d'une part, et à la tradition de Descartes, Newton et Laplace d'autre part, considérons ce qui suit. Imaginons un alignement interminable de dominos dressés verticalement les uns à côté des autres et l'« onde » qui se déplace le long de cette rangée au fur et à mesure que chaque domino tombe sur son successeur. Quelle est la causalité ? Si l'on raisonne dans l'Univers des causes efficientes de Descartes et de Newton, nous dirons que le domino N tombe à cause du domino N-1, que le domino N-1 tombe à cause du domino N-2, que le domino N-2 tombe à cause... il vaudrait mieux s'arrêter ici car on risque de ne jamais trouver de « premier moteur ».

Une manière radicalement différente de raisonner est la suivante : *pourquoi ces dominos ont-ils été disposés de la sorte ?* Là, nous sortons de l'Univers du domino immédiatement voisin, et pour essayer de comprendre la situation d'ensemble, nous cherchons une cause dans un Univers supérieur à celui de la rangée de dominos. Bref, nous cherchons un *principe universel*.

L'histoire de la science de la lumière nous donne un exemple éclairant d'une telle recherche et que nous avons déjà évoqué, c'est la succession *principe de moindre chemin, principe de moindre durée, principe de moindre action*. Chacune de ces hypothèses est bien évidemment subsumée par la suivante et ne doit pas être regardée en tant que telle, c'est-à-dire comme un objet. Il ne s'agit pas de trouver une curiosité parmi les lois de la lumière mais plutôt d'essayer de trouver un principe universel qui nous permettra de trouver de nouvelles lois pour la lumière. C'est aussi ce que LaRouche appelle *l'hypothèse de l'hypothèse supérieure*.

Revenons maintenant à la loi des sinus. Nous pouvons mieux comprendre la rage qu'a suscité chez Descartes la simple idée de Fermat qu'il puisse exister un principe universel. Chez Descartes la nature est « aveugle » : le rayon lumineux dans un milieu homogène va suivre sa trajectoire « naturelle » la ligne droite*.

Notre rayon va donc suivre un trajet rectiligne jusqu'au moment où se produit un « accident » : le rayon rencontre la surface de séparation de deux milieux transparents en O (**Figure 7a**). Le choc change l'orientation du rayon qui reprend sa course aveugle dans le nouveau milieu selon une nouvelle direction, c'est-à-dire de nouveau en ligne droite jusqu'au prochain accident. Il n'y a donc qu'un point de l'espace-temps à prendre en considération : le lieu de l'impact.

La question que se pose Fermat est différente. Si l'on considère deux points A et B (**Figure 7b**) dans deux milieux transparents différents con-

---

* Ici nous touchons un préjugé crucial qui nous vient de Newton. La pensée de ce dernier est en effet *linéaire* au sens propre comme au sens figuré. Pour lui, l'axiome le plus « évident » en soi c'est la ligne droite, c'est-à-dire la figure géométrique la moins susceptible de changement parmi toutes les figures géométriques possibles. Nous sommes donc bien aux antipodes de l'idée d'un Univers qui possède une certaine *courbure*, c'est-à-dire qui *agit* de manière permanente sur lui-même ; l'Univers de Newton est réellement mort.
Pour montrer que ce n'est pas simplement un problème dans son *Optique*, considérons le grand postulat qu'il place en tête de ses *Principia* et de son *Du mouvement des corps*, la première « évidence » que les élèves apprennent à l'école le jour de leur premier cours de physique : *« Tout corps, par sa seule force inhérente [inertie], s'avance uniformément selon une ligne droite à l'infini, à moins que quelque chose d'extérieur ne l'en empêche. »*
Ce principe d'inertie nous demande implicitement de tenir pour évidentes en soi plusieurs affirmations. Entre autres choses, il faut supposer que l'espace de l'Univers réel puisse être assimilé à un espace géométrique homogène, infini, cartésien, à trois dimensions et indépendant de toute existence de matière. Il faut également imaginer qu'il soit possible de placer dans un tel espace vide un corps unique ! Leibniz avait déjà réfuté de manière rigoureuse de telles notions, mais il a fallu attendre Riemann et tous les développements de la physique après lui, pour que l'on ose dire que le principe de l'inertie n'est qu'une hypothèse… que l'on enseigne toujours aux élèves comme une vérité éternelle !

tigus, quel est le chemin qui permet de minimiser le temps que met la lumière pour passer de A en B ? *Ici, ce n'est plus le point d'impact qui rentre en considération, mais c'est l'espace-temps dans sa totalité.*

Chez Descartes (et Newton), l'Univers dans son ensemble est la somme algébrique d'objets et de forces élémentaire locaux. Chez Fermat (et Leibniz), au contraire, chaque événement local est le résultat d'une *action de l'ensemble de l'Univers sur lui-même*. Cela nous perturbe ? Peut-être serions-nous tentés de nous poser la question suivante : à partir du moment où le rayon a quitté le point A, *comment pourrait-il « savoir »* quel chemin prendre pour aller vers B dans le temps le plus court ? Y aurait-il quelque chose de plus rapide que la lumière qui précéderait le rayon et qui lui montrerait la voie à suivre ?

Mettons un instant cette question troublante entre parenthèses. Nous devons ici nous interroger plus en profondeur sur notre manière de penser la science et l'Univers. Qu'est-ce qu'une loi physique ? Qu'est-ce qu'un principe universel ? Nous avons étudié la loi de la réfraction, nous avons pu l'énoncer, dire que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est constant et égal au rapport des vitesses la lumière dans les différents milieux qu'elle traverse. Nous pouvons maintenant répertorier dans une table la vitesse de la lumière pour tous les milieux que nous voulons. Cependant, une description par une formule mathématique d'un phénomène physique n'est pas l'explication physique de ce phénomène. La preuve en est qu'en utilisant la même formule, la loi des sinus, Huygens et Newton donnent deux descriptions de la vitesse de la lumière incompatibles.

Le point de vue de Newton est qu'il faut se contenter de décrire les phénomènes sans en chercher les causes (le message sous-jacent à sa démarche est donc ouvertement antiscientifique puisqu'il ne cherche pas à savoir pourquoi).

En réalité, les mathématiques sont un outil utile qui nous permet de décrire, avec beaucoup de limitations, les découvertes effectuées dans le monde de la physique. Toutefois, ces lois physiques, ces découvertes de nouvelles lois physiques sont elles-même des phénomènes qui existent *dans le monde physique*, donc des phénomènes qui obéissent à certaines lois, puisque nous avons admis que rien n'arrive dans cet Univers sans qu'il en existe une cause.

Nous voyons ici toute l'ironie et toute l'ambiguïté de la notion même de « loi physique ». Nous avons dit plus haut que l'une des caractéristiques de l'Univers est qu'il agit sur lui-même et se transforme en permanence. Comment, dans ce cas, pourrions-nous parler de lois de la physique – qui par définition sont constantes – pour décrire cet Univers ? Comment un objet fixe pourrait-il rendre compte du mouvement ? Il y a là un paradoxe !

Leibniz était parfaitement conscient de ce paradoxe, c'est pourquoi sa démarche est essentiellement une remise en cause permanente de tout ce qui est tenu pour évident en soi. Et c'est pourquoi, à juste titre, il cherchait avant tout à rendre compte de cette autotransformation permanente de l'Univers ; d'où sa recherche d'une *caractéristique universelle*. Il est clair, qu'une telle démarche ne peut jamais s'achever puisque l'énoncé d'une telle loi en fixerait déjà des limitations. Il est clair également qu'en procédant de la sorte, Leibniz crée l'environnement social qui *favorise l'éclosion de nouvelles découvertes scientifiques*, non pas tant en énonçant des vérités mais bien plutôt en chassant des préjugés et *en rendant autrui conscient de la manière dont il pense* !

C'est en adoptant la fixation obsessionnelle de Newton sur des objets (atomes, vide, temps et espace absolus, constantes universelles, etc.) que les scientifiques se sont mis – et continuent à se mettre – dans des impasses, comme nous l'avons assez montré ci-dessus.

Repensons maintenant au trouble que nous a provoqué plus haut l'idée que la lumière utilise le chemin le plus rapide. Qu'on le veuille où non il y a là une *réalité physique*. Les métaphysiques de Descartes et de Newton avaient nié l'éventualité qu'il puisse exister un principe universel. Leurs calculs *nient un fait* dont nous avons la preuve expérimentale aujourd'hui : pour aller de A vers B, la lumière met le temps le plus court possible. Ce fait est présenté en général à l'école comme une curiosité ou au mieux comme un moyen de calcul mais il existe néanmoins. Il faut en rendre compte bien que nous ne parvenions pas à l'expliquer dans le simple cadre de la science de la lumière.

Nous nous sommes demandés comment la lumière pourrait savoir *a priori*, quel chemin elle devrait suivre. Ce trouble nous vient du fait qu'implicitement nous tenons le temps pour une donnée fixe absolue. Or, redisons-le, nous avons vu que l'Univers agit de manière permanente sur lui-même. Ajoutons à cela que le temps a lui-même une existence physique dans cet Univers. Si le temps n'est pas une donnée première, si nous arrivons à comprendre que l'action le « précède » ontologiquement, quoi de choquant dans ce principe de moindre action ?

Pourquoi l'action de l'Univers sur lui-même, par laquelle cet Univers obtient un certain résultat, devrait-elle être la moindre de toutes les actions possibles permettant d'atteindre le même résultat ? On peut répondre à cette dernière question par l'absurde : si l'Univers utilisait plus de force que ce dont il a besoin pour réaliser un tel travail, il y aurait là, comme Leibniz l'a montré, quelque chose qui violerait le principe de la raison suffisante. En effet, une partie de la force que l'Univers aurait mobilisé aurait été *inutile* et sans raison.

Le problème posé ici à Newton et à Descartes est que la raison suffisante que nous recherchons est dans l'Univers considéré dans sa totalité, c'est-à-dire dans tout l'*espace-temps physique*. Pour quelqu'un qui considère que le temps est quelque chose d'absolu, la raison des choses ne pourra être recherchée que dans le *passé*. L'ironie ici est que *Leibniz recherche les causes dans l'avenir* !

Ce sont justement ces paradoxes lancés par Leibniz, tel son rejet du temps absolu, qui ont permis à Gauss et Riemann de réaliser leurs percées majeures au XIXe siècle, dont l'un des sous-produits est l'avancée technologique du siècle suivant.

Ce qui donne finalement raison à Fermat, Huygens et Leibniz contre Descartes et Newton, ce n'est donc pas tant leurs résultats (dans le sens de ce que l'on a l'habitude de penser en matière de résultat) mais bien plutôt leur *méthode*. Leur héritage, c'est un monde dans lequel davantage de découvertes sont devenues possibles que dans le monde où ils sont nés. Un monde plus ouvert. Commençons donc par reconsidérer notre manière de penser… n