

Chapitre 5 : la lumière, petit historique

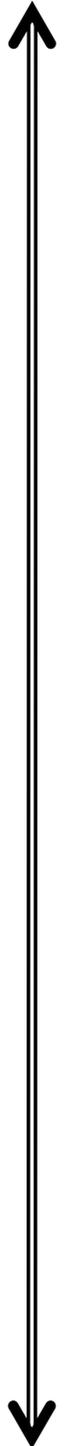
1 Introduction

La *lumière* est facilement associée à une notion *d'évidence* et de *simplicité* dont elle reste le symbole. Ainsi, la Genèse affirme que la lumière fut créée le premier jour, précédant ainsi largement une complexité du monde sans cesse accrue.

Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre. Or la terre était vide et vague, les ténèbres couvraient l'abîme et un souffle de Dieu agitait la surface des eaux. Dieu dit: « que la lumière soit » et la lumière fut. Dieu vit que la lumière était bonne, et Dieu sépara la lumière et les ténèbres. Dieu appela la lumière « jour » et les ténèbres « nuit ». Il y eut un soir et il y eut un matin : premier jour. (Genèse 1;1-5)

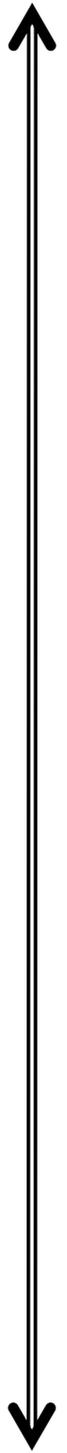
De la même manière, la lumière est un élément essentiel de la création du monde dans la description donnée par le Coran :

Béni soit Celui qui a placé au ciel des constellations et qui y a mis le flambeau solaire et une lune brillante. Il a établi une alternance de la nuit et du jour pour celui qui veut penser à Dieu ou se montrer reconnaissant. (Coran, sourate 25;61-62)





Le récit de la Création dans l'Hexaméron, de Saint Ambroise de Milan, manuscrit réalisé à Weissenau (en Souabe) entre 1175 et 1200, conservé à Amiens, BM, ms. Lescalopier 30, f. 10v.

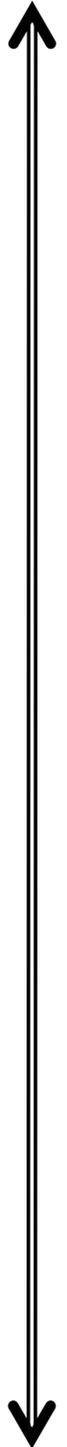


Pourtant ce phénomène, le plus directement associé aux manifestations du monde sensible et aux perceptions visuelles immédiates, se révèle bientôt très mystérieux.

« Si nous savions ce qu'est un simple rayon de lumière, nous saurions beaucoup de choses » (Louis de Broglie)

Aujourd'hui, à la simplicité primitive de la « lumière du premier jour » s'est substituée la complexité qui accompagne les fondements mêmes de la physique et cristallise, en grande partie, ses difficultés.

Passons en revue quelques grandes étapes historiques de la compréhension du phénomène lumineux, et de l'élaboration des théories de l'optique.



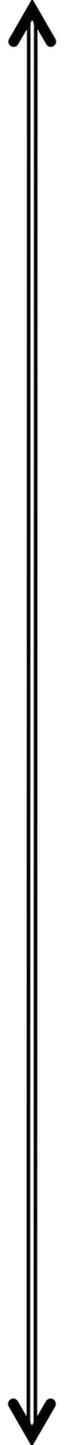
2 Petit historique de l'optique

2.1 Antiquité

Les théories archaïques attribuent à la lumière une sorte de prédominance mythique. Il s'agit alors d'un *Feu* commun à toute chose, permettant les transformations de la matière.

Comment expliquer que l'on voit des objets, et que ces objets présentent différentes couleurs ? Les philosophes antiques se préoccupaient en fait essentiellement du *problème de la vision*.

L'Antiquité se posait donc plutôt la question : « *Comment voyons-nous ?* » plutôt que : « *Quelle est la nature de l'agent qui nous permet de voir ?* ».

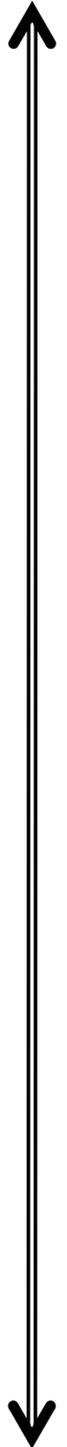


2.1.1 Théories de la vision

Selon la réponse à cette première question, on peut distinguer *trois types de théories antiques de la vision* : la lumière peut, en effet, avoir sa source

- ✓ dans les objets eux-mêmes (théories du *feu externe*, développée par Empédocle d'Agrigente et plus tard par Aristote)
- ✓ dans l'œil qui voit (théories du *feu interne ou visuel*, défendue par l'école pythagoricienne et les disciples d'Euclide)
- ✓ dans les deux à la fois (théories *mixtes*, défendues notamment par Platon).

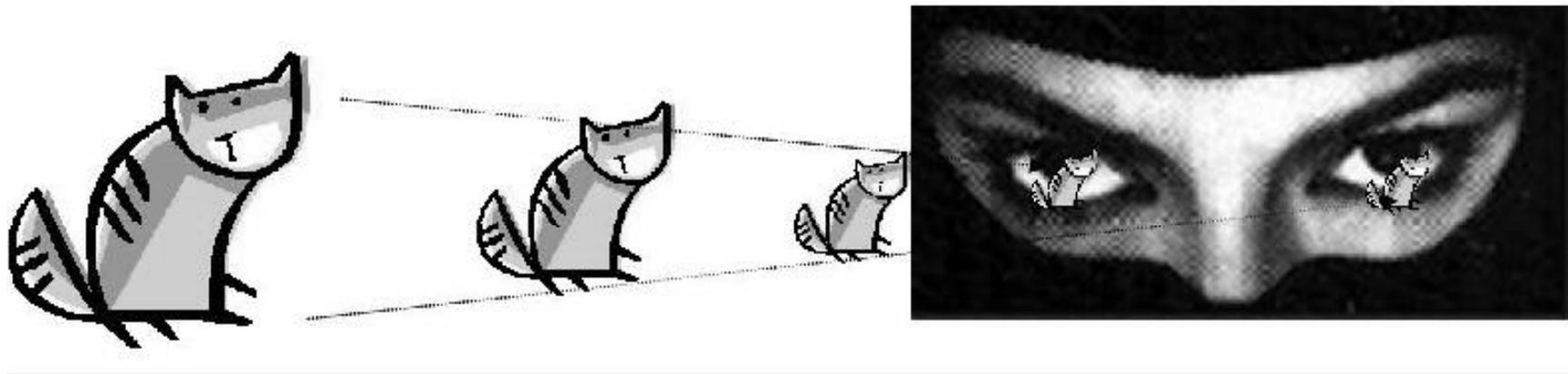
Notons que dans toutes ces conceptions, la *nature* continue ou discontinue de la lumière, son *mode de propagation* (mouvement spécifique d'un milieu ou émission de corpuscules) ne jouent qu'un *rôle très accessoire*.



2.1.1.a Théories du feu externe

Défenseur du feu externe, *Empédocle d'Agrigente* (490-435 avant J.-C.) propose un cosmos fondé sur la présence de *quatre éléments* (feu, air, eau, terre). Le premier d'entre eux, le *feu*, le plus subtil, s'apparente à la *lumière* sans toutefois se confondre avec elle.

D'autre part, dès l'époque de *Leucippe de Milet* (VI^e siècle av. J.-C.), certaines théories du feu externe avaient décomposé ce feu en micro-objets, les *simulacres* ou *eidola*, images fidèles et réduites des corps matériels. Les « simulacres » qui produisent alors la vision et même les phantasmes des rêves possèdent toutes les qualités des corps dont ils proviennent (formes, couleurs, etc.).

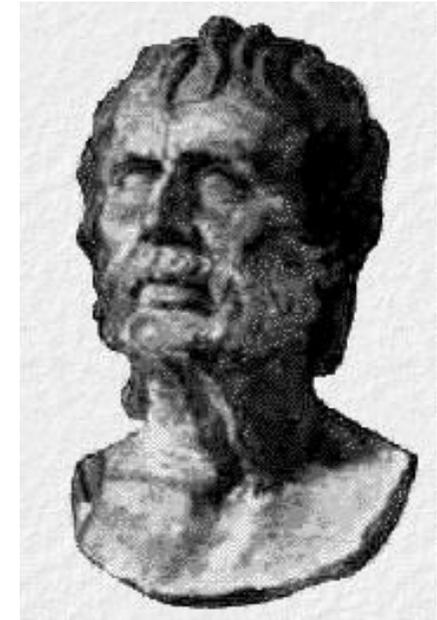


Cette miniaturisation qui conserve au corpuscule lumineux les multiples qualités de l'objet s'affirme chez *Épicure*, dont la théorie sera vulgarisée plus tard par *Lucrece*.

Le philosophe romain *Lucrece* (98-55) reprend les théories atomistes de *Démocrite* (460-470) et d'*Epicure* (341-270).

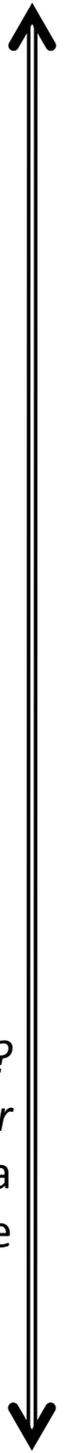
Pour Lucrece, le monde est constitué *d'atomes insécables* qui constituent les parties ultimes de la matière. Ce monde est en perpétuel mouvement. Lorsque périt un corps ses atomes se combinent à d'autres pour former de nouveaux corps.

Les atomistes sont conduits à formuler une théorie de la vision, qui à l'exemple du toucher, s'accomplit par *l'action matérielle d'un corps sur un autre*. Ainsi, la réplique fidèle d'un objet constituée *matériellement* d'atomes émis par sa surface, se détache et se propage dans l'espace jusqu'à l'observateur. L'existence de ces *simulacres* trouve un support dans l'observation de la nature, par exemple les *mues* de certains animaux.



Lucrece

Que se passe-t-il si les simulacres rencontrent un obstacle au cours de leur propagation ? Leur comportement dépend de la nature de l'obstacle : ils peuvent le *traverser*, s'y *abîmer* ou en être *repoussés*. Ainsi, la théorie rend compte, du moins très qualitativement, de la possibilité de la réflexion des simulacres dans un miroir : le poli de celui-ci ne les dénature pas.



Dans ce monde en perpétuel mouvement, les simulacres qui se croisent peuvent se recombinaer au gré de leurs rencontres et former des êtres qui n'existent pas, qui viennent frapper notre esprit, d'où des *visions de l'esprit* : fantômes, chimères...

Comment le simulacre d'une montagne par exemple peut-il entrer dans l'œil ? Il faut supposer qu'il rétrécit au cours de sa propagation, suivant la *pyramide visuelle*, dont le sommet est dans l'œil de l'observateur et la base sur l'objet (cf. figure précédente). Cette affirmation constitue un postulat de la théorie. Pour divers observateurs, situés à des distances différentes d'un objet, il faut donc faire l'hypothèse que les simulacres émis par l'objet se comportent différemment suivant les observateurs. D'une certaine manière, l'œil de l'observateur joue un rôle actif indirect dans cette théorie puisqu'il conditionne les caractéristiques de la pyramide visuelle dans laquelle doit s'inscrire le simulacre pour parvenir à l'œil.

Quant au fait que l'on ne peut voir la nuit, Lucrèce invoque que :

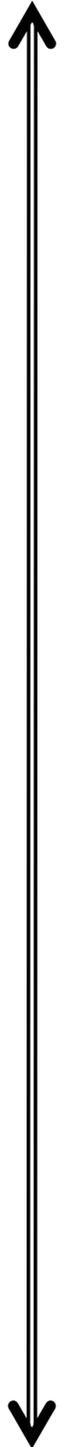
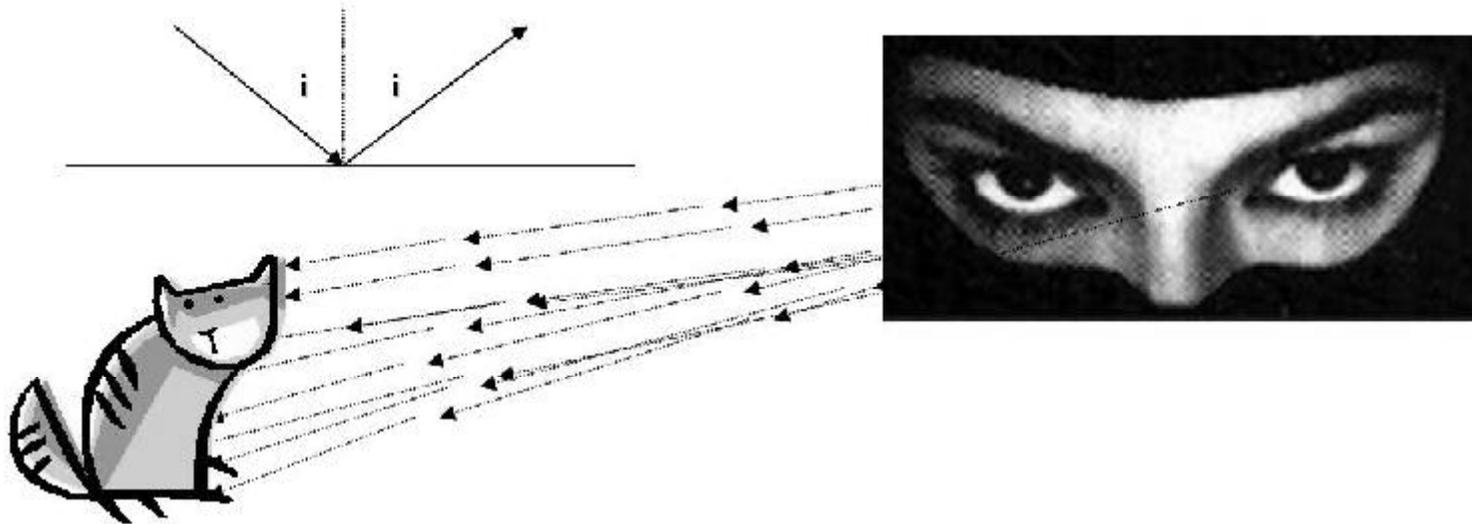
En revanche, de la lumière nous ne pouvons voir dans les ténèbres ; car l'air obscur qui se trouve derrière le jour, étant plus épais, bouche toutes les ouvertures, obstrue les canaux des yeux, si bien que le choc d'aucun simulacre ne saurait ébranler la vue.

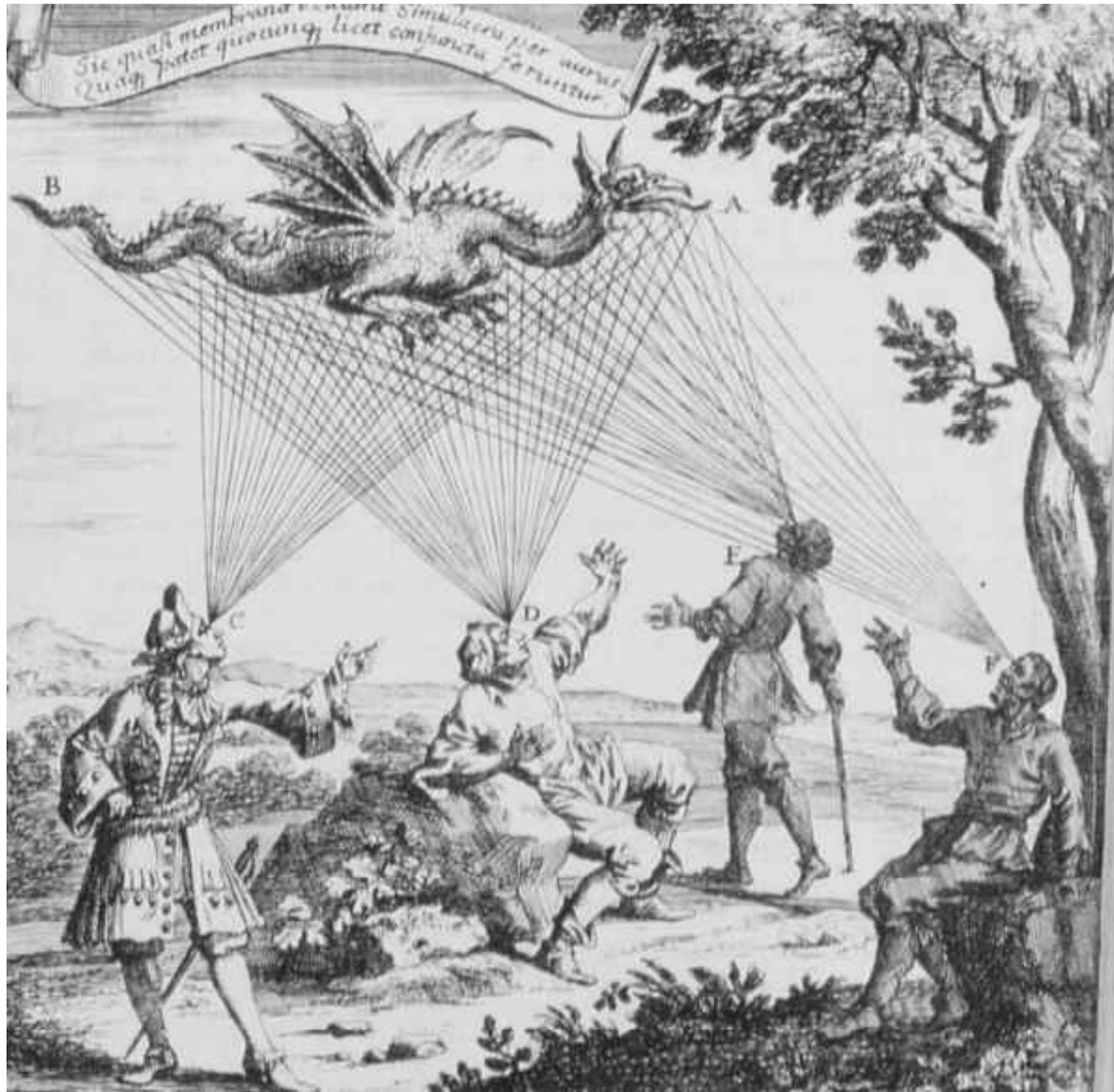
(Lucrèce, Phénomènes divers de la vision. Livre IV).

2.1.1.b Théories du feu interne ou visuel

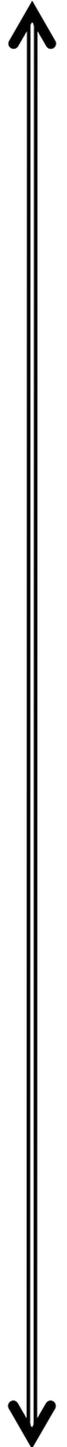
Les théories du feu visuel affirment, au contraire, que *l'œil*, et non pas les objets vus, est le siège d'une émission spécifique permettant la vision.

Cette opinion est admise par une part importante de *l'école pythagoricienne*, dont *Pythagore* (570-480), *Archytas de Tarente* (435-347), mais son représentant le plus brillant reste certainement *Euclide*.





Gravure illustrant la théorie du feu interne ou visuel

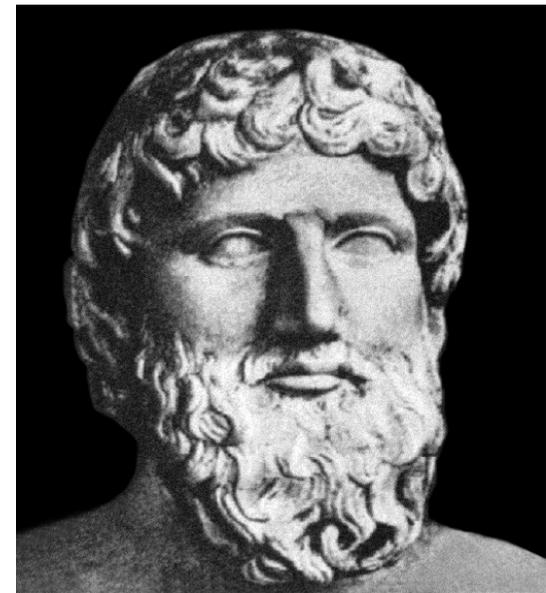


2.1.1.c Théories mixtes

Platon (427-348) donne une description de sa cosmologie par la voix de *Timée*. Il explique la genèse du monde de la formation des astres à l'homme. La *vision résulte d'une communion entre le feu extérieur du monde qui nous entoure et le feu interne qui compose notre âme*, le feu étant le plus subtil des quatre constituants élémentaires du monde sublunaire. Platon tente une explication de la vision en conférant un rôle actif à l'œil qui devient émetteur d'un *feu* visuel qui va à la rencontre du *feu* qui peut provenir de ceux-ci, à la faveur de la lumière du jour. *De cette rencontre du semblable naît la vision.*

L'obscurité provient de ce que le feu intérieur n'a plus de semblable avec lequel s'unir :

*Mais lorsque le feu extérieur se retire pour la nuit, le feu intérieur se trouve séparé de lui : alors, s'il sort des yeux, il tombe sur un élément différent de lui ; il se modifie et s'éteint, puisqu'il cesse d'être de même nature que l'air environnant, lequel n'a plus de feu. Il cesse alors d'y voir et ainsi amène le sommeil. (Platon, *Timée* 45 e).*



Platon

Pour Platon, la vision ainsi expliquée trouve son fondement dans un autre type de vision : la *vision « intelligible » de réalités inaccessibles aux sens*, les Idées, qu'on ne peut atteindre que par l'esprit (cf. *Mythe de la Caverne*).

2.1.2 Aristote et la théorie de la propagation

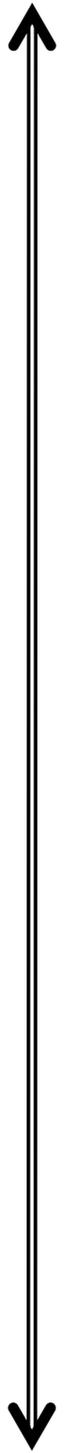
Aristote (384-322) expose sa théorie de la vision dans le traité *De l'Âme*. Dans la partie consacrée aux sens, Aristote développe une étude théorique de la lumière, très subtile, fondée sur la notion de *milieu*.

Chez Aristote, il n'est plus question de rayon visuel, et dans la théorie aristotélicienne, ce que l'on voit correspond à un *ébranlement d'un milieu* se propageant de l'objet à l'œil, première *ébauche d'une description ondulatoire* de la lumière.



Aristote et Platon, extrait de « L'école d'Athènes », de Raphael.





Les milieux transparents, comme l'air et l'eau, sont nommés *diaphanes* par Aristote.

Un diaphane « n'est pas visible par soi », à la différence d'un objet. Un diaphane a deux états possibles : il peut être *diaphane en puissance ou en acte*. « Là où le diaphane n'est qu'en puissance se trouve l'obscurité ». Une source de lumière, composée de « feu » dans notre monde terrestre, « actualise » le diaphane, le faisant passer de son état de diaphane en puissance à celui de diaphane en acte. Le diaphane est dit en *entéléchie* grâce à l'action du feu. Il subit un *changement d'état*.

« *La lumière* », quant à elle, « *n'est pas le feu* ». « *La lumière en est l'acte* » [du diaphane] et « est en quelque sorte la couleur du diaphane ». Ainsi, « c'est la même nature qui est tantôt obscurité, tantôt lumière ». Quant à « l'objet de la vue, c'est le visible » qui est « la couleur » dont Aristote donne la nature.

Cette théorie des milieux s'oppose à celle des atomistes, pour lesquels la vision à travers le « vide » est possible : en effet les simulacres n'ont pas besoin de support pour se propager, mais l'ébranlement a besoin du diaphane.

La « mise en mouvement » à la base de la vision constitue pour Aristote un « *ébranlement d'un milieu* » pour lequel on peut trouver l'*analogue pour le son et l'odeur*. Pour Aristote, qui compare les différents sens entre eux, la *vision se fait dans l'instant*, à la différence de l'ouïe et de l'odorat.

2.1.3 Euclide et la naissance de l'optique géométrique

Chez *Euclide* (III^{ème} Siècle av. JC), le souci est de rendre compte des « illusions » d'optique, par une méthode géométrique.

Deux traités d'optiques sont attribués à Euclide : *Optique* et *Catoptrique*. Dans ces ouvrages, à l'inverse de ceux de Platon et d'Aristote, il n'y a *pas de discussion sur la nature de la lumière*. Ils se présentent sous la forme d'une série de définitions, propositions, et théorèmes. Les problèmes abordés sont très inégaux.

Les sources d'Euclide ne sont pas connues mais il est vraisemblable qu'il a opéré une synthèse et une présentation globalement rigoureuse de connaissances antérieures dont la *Recension de l'optique par Théon*, rédigée par un auditeur des cours de *Théon d'Alexandrie* (IV^{ème} siècle ap. J.C.).

Euclide géométrise l'optique : la lumière se propage suivant des lignes droites, au sens mathématique, sans épaisseur : les *rayons lumineux*. Ce modèle mathématique fonde *optique géométrique* utilisée de nos jours dans la plupart des cas usuels.

L'optique géométrique, par opposition à l'optique physique, s'intéresse aux phénomènes où la nature fondamentale de la lumière ne joue pas de rôle.



Euclide, peinture du XVIII^{ème} siècle.

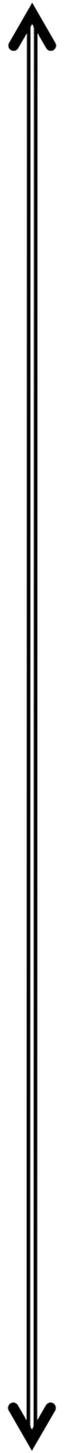
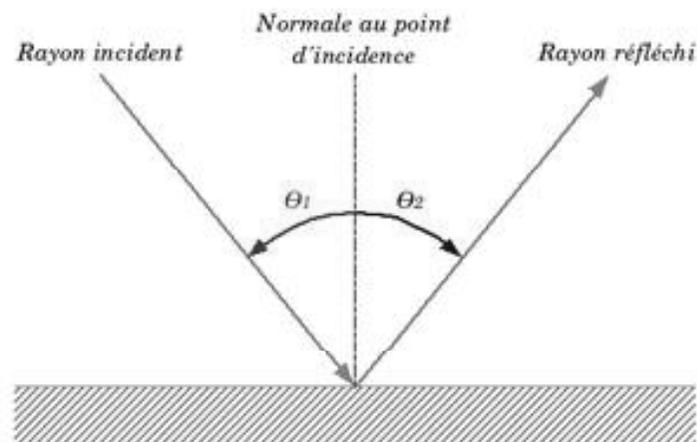


Quelles sont les propriétés de ces rayons ? Quel est leur sens de propagation ? Euclide utilise parfois des rayons issus du Soleil, mais le plus souvent, les *rayons visuels divergent de l'œil* pour atteindre les objets dans toute leur étendue. Cela est une *supposition*, une hypothèse de travail, mais qui le place clairement dans la lignée des théories du feu visuel.

Par cette théorie du rayon visuel, où un « feu » invisible sortant de l'œil touche les objets et fait connaître leurs formes et leurs couleurs, Euclide reprend la thèse des pythagoriciens (Pythagore, 500 av. JC).

Les *lois de la réflexion*, clairement exposées dans la *Catoptrique*, correspondent à une donnée expérimentale et non à une démonstration : rayons incidents et réfléchis sont contenus dans un même plan, les angles formés avec la normale sont égaux ; ces lois sont généralisées à des miroirs convexes et concaves.

Notons qu'il n'y a pas alors, et ce pour longtemps encore, de loi générale de la *réfraction*.

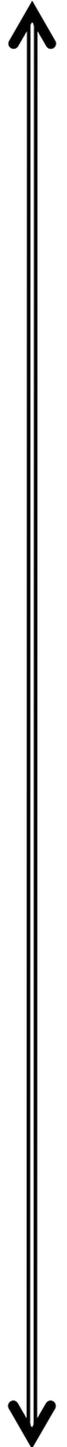


2.1.4 Galien et le rôle de l'œil

Des progrès scientifiques sensibles sont accomplis par le médecin grec *Galien* (Pergame, 131-201 après J.-C.). Il dissèque de nombreux animaux dans le but d'améliorer les pratiques médicales. Il met en évidence le rôle du nerf optique dans la vision.

Il rejoint les idées platoniciennes en ce qu'il considère qu'un fluide intérieur est communiqué du cerveau à l'œil par le nerf optique, qui sensibilise l'œil et le rend apte à être impressionné par le fluide externe en provenance de l'objet. *Il pense que la zone sensible de l'œil, c'est-à-dire le siège de la vision, est le cristallin.*

Selon Galien, la rétine joue un rôle important, mais elle n'est pas perçue comme le siège de la vision. En tant que la dernière des *tuniques* qui compose l'œil, elle assure le lien entre l'œil et le cerveau, via le nerf optique et constitue une réserve de nutriments.



2.2 le Moyen âge arabe

A la suite de l'effondrement de la civilisation grecque et romaine, naît le nouvel empire arabe, qui s'étend du bassin méditerranéen au Moyen Orient. Après la phase de conquêtes, s'instaure une période pendant laquelle les connaissances propres aux divers peuples assujettis imprègnent la civilisation émergente.

L'un des auteurs de cette période les plus importants pour l'optique est *Al-Kindi* (fin du VIII^{ème} siècle-866). Il traduit les travaux d'Euclide et défend la théorie des rayons visuels.

Un de ses apports majeurs est de *discrétiser la surface de l'œil* : *chaque point de la surface de l'œil est associé au sommet d'un cône visuel*. Il réalise aussi de la même manière une discrétisation de la source lumineuse. Al-Kindi dote les rayons lumineux d'une extension transversale. Il crée ainsi une optique des *faisceaux* lumineux.

Les ouvrages grecs sont tout d'abord traduits massivement, souvent grâce au mécénat de califes. Puis une science nouvelle se met en place. L'apogée de la science arabe se situe entre le VIII^{ème} et le XI^{ème} siècle, peu avant l'effondrement de l'empire.

Deux figures marquantes de cette période sont *Ibn Sahl* et *Ibn Al-Haytham*.



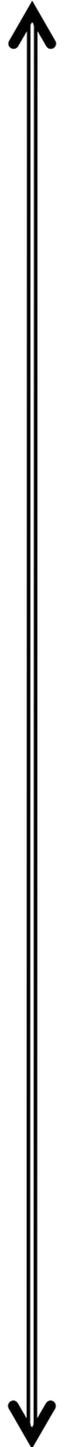
2.2.1 Ibn Sahl et la loi de la réfraction

Les travaux du mathématicien *Ibn Sahl*, n'ont été découverts que récemment et de manière parcellaire. Sa période d'activité est située vers 980.

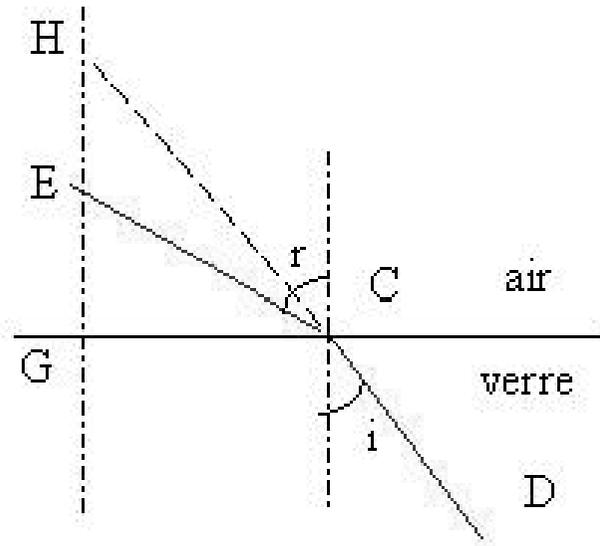
Ibn Sahl consacre ses travaux d'optique à un sujet très discuté : la détermination de la forme des miroirs ardents d'Archimède, qui est réputé avoir incendié à distance par ce moyen une flotte ennemie assiégeant Syracuse. Ibn Sahl utilise ses connaissances sur les coniques pour calculer, dans différentes configurations, quelle forme donner aux miroirs.

Mais il ne se limite pas à une étude de *catoptrique* (étude de la réflexion) mais étudie aussi les « *foyers ardents* », lorsque la lumière traverse les milieux transparents.

Il fait l'étude de lentilles plan-convexe et biconvexe, et s'intéresse au problème de *l'anacoustique* (la détermination de la forme à donner à une lentille pour que la lumière converge en un point).

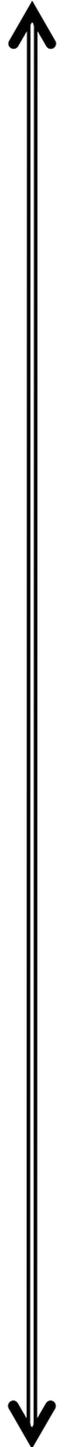


Ses constructions géométriques l'amènent à définir une propriété de la réfraction qui n'était pas connue antérieurement et qui aurait pu constituer la *première formulation connue de la loi de la réfraction*.



La lumière se propage dans un corps vitreux suivant le chemin DC et rencontre la surface en C. Elle se réfracte dans l'air suivant CE. Ibn Sahl trace la perpendiculaire GE au dioptré. Le point H est à l'intersection du prolongement du rayon incident DC et de GE. Ibn Sahl écrit que le rapport CH/CE est constant pour deux milieux donnés.

Dans les écrits qui nous sont parvenus, Ibn Sahl n'érige malheureusement nulle part ce fait au statut de *loi physique*. Il semble passer à côté de la grande généralité de ce qui n'est pour lui qu'un outil de calcul. D'autre part, il n'écrit pas explicitement que ce rapport dépend des milieux considérés.



2.2.2 Ibn Ah-Haytham et la renaissance de l'optique expérimentale

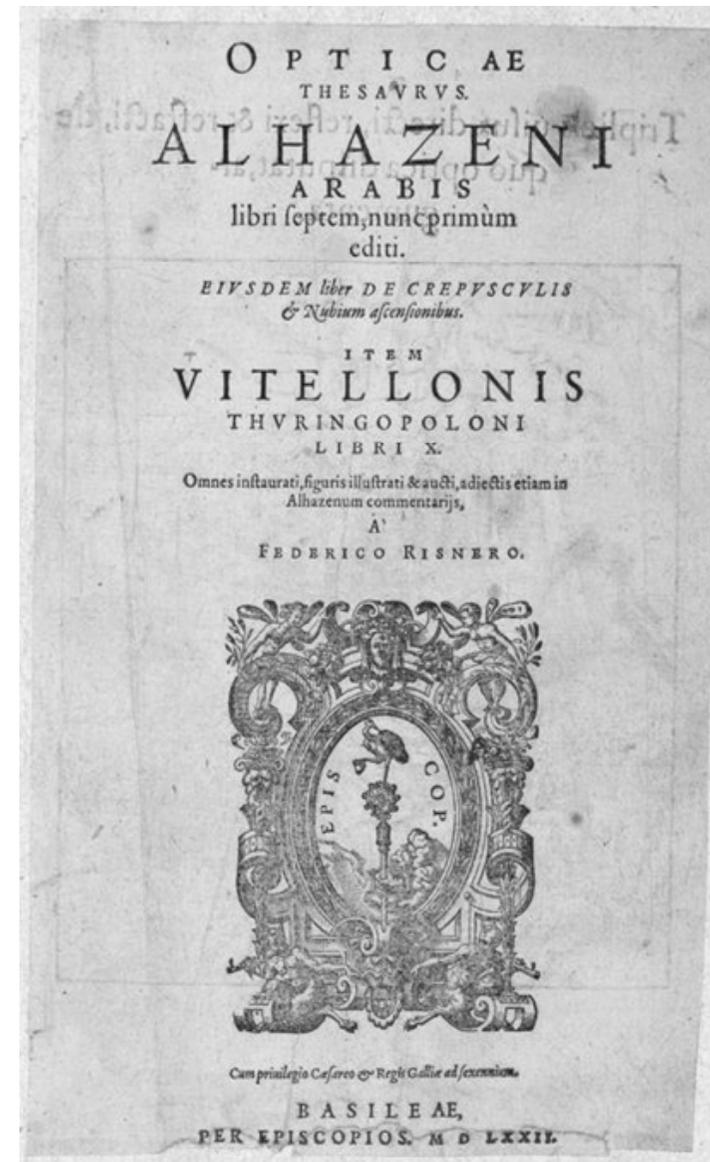
Ibn Al-Haytham (965-1039) (dit *Alhazen* en Occident) apporte quant à lui une contribution majeure à l'optique, dans son *Traité d'Optique*.

Après avoir souligné le mérite de ses prédécesseurs, Al-Haitham remarque que leurs points de vue sont inconciliables. En effet, *deux courants de pensée s'affrontent* : celui des « *physiciens* » pour lesquels la lumière va des objets à l'œil, sous la forme de *simulacres*, et celui des « *mathématiciens* » pour lesquels il y a un *rayon visuel*, allant de l'œil aux objets.

Aucune des deux approches ne lui semble satisfaisante. Dans la première, il n'y a pas de formulation mathématique possible de la théorie, alors que la seconde utilise un rayon visuel qui ne repose sur aucune réalité tangible.

Il éprouve donc la *nécessité d'aboutir à une théorie de la vision* « *physique* », traduisant au plus près les *phénomènes*, mais aussi « *géométrique* ».

Il lui faut reformuler la science de la vision, ce qui est l'objet de son *Traité d'Optique*.



Ibn Al-Haytham fait un usage systématique des *expériences*, qu'il mène dans un ordre progressif, afin de choisir entre différentes hypothèses. Il s'attache ainsi à la démonstration expérimentale systématique de la *propagation rectiligne de la lumière* issue de différentes sources avec la *chambre noire* : une ouverture est aménagée dans une pièce sombre, puis il intercepte à l'aide d'un écran le faisceau de lumière entrant. Le rapport homothétique liant la dimension de cette section avec la distance à l'ouverture indique que la lumière se propage en lignes droites. Il remarque en outre que lorsque la pièce est emplie de fumée ou de poussière, qui « matérialisent » le faisceau lumineux, celle-ci semble se propager rectilignement.

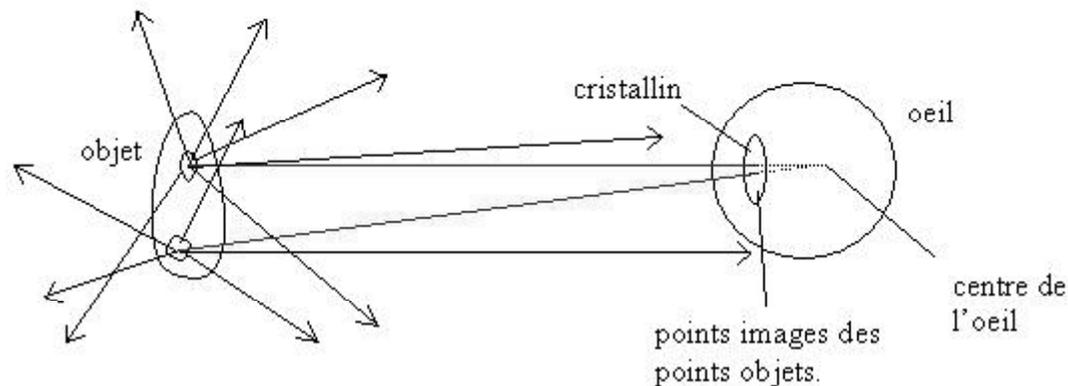
Il envisage pour chaque objet la propagation de *formes*, ou d'*espèces*, en tant qu'images aériennes, mais différentes de celles des atomistes car sans transport de matière. Contrairement aux *eidola* des atomistes, composées d'un ensemble ordonné et lié d'atomes, fidèles à l'objet qui les émet, les *espèces*, au sens de *forme* ou d'*images*, d'Al-Haytham sont issues des différentes parties de la source, dont chaque point émet dans toutes les directions de l'espace.

Il montre par une série d'observations que lumière et couleurs sont intimement liées et il en conclut que *la couleur est une forme*, au même titre que la lumière et qu'elle *ne provient pas d'un phénomène intervenant entre l'œil et l'objet*.

Al-Haytham souligne que *la lumière a une action sur l'œil* en donnant l'exemple de la persistance lumineuse qui apparaît après avoir regardé une zone très éclairée et avoir ensuite détourné son regard vers une zone plus obscure. Il en conclut que *la lumière se rend des objets à l'œil et que la théorie du rayon visuel est superflue*.

Al-Haytham est le premier à tenir compte explicitement de la structure de l'œil pour expliquer le mécanisme de la vision. Toutefois, comme Galien, il considère que le lieu privilégié de la vision est le cristallin. À chaque point à la surface du cristallin correspond un point de l'objet.

Pour réaliser cette correspondance bijective, sans connaître les lois du phénomène de réfraction, qui assure la convergence des rayons réfractés en un point, Al-Haytham accorde un rôle prépondérant aux rayons lumineux perpendiculaires à la surface de l'œil. Ces derniers sont censés avoir plus de force que les autres, à la manière d'une épée qui peut couper une corde tendue par le tranchant mais échoue à le faire de biais. Ces rayons traversent l'œil (supposé sphérique) sans déviation pour atteindre le cristallin, placé en avant du centre de l'œil : les lignes droites perpendiculaires à la surface de l'œil, émises par les objets, se confondent avec le rayon visuel des « mathématiciens ».



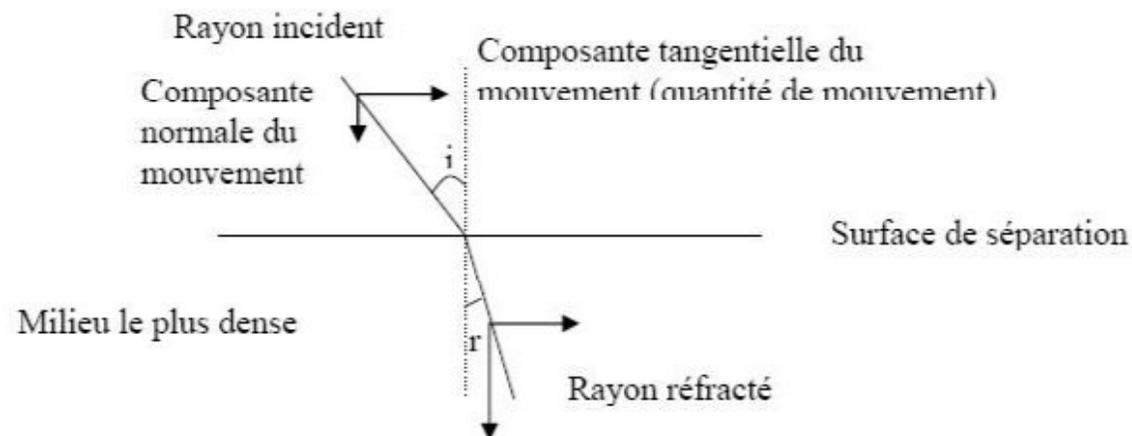
Chaque élément de la source émet de la lumière dans toute les directions en lignes droites. Les rayons perpendiculaires à la surface de l'œil (en rouge) ont plus de « force », pour Al-Haytham, et forment l'image de l'objet dans le cristallin, organe de la vision.

Il n'insiste pas sur *le mode de propagation de la lumière* mais précise toutefois que quel qu'il soit, il *ne peut se faire dans l'instant*, bien que sa durée nous semble imperceptible.

Il souhaite donner une *interprétation mécanique* de la *réflexion* et de la *réfraction* et dans l'analogie avec une flèche tirée vers la surface de séparation entre les milieux, décompose le mouvement en une *composante tangentielle* et une *composante perpendiculaire* :

- ✓ Lors de la réflexion, la composante tangentielle du mouvement ne change pas, alors que la composante normale s'inverse.
- ✓ Lors de la réfraction, la composante tangentielle du mouvement est encore inchangée, alors que la composante normale est *freinée* ou *accélérée*.

Dans un milieu plus dense que le milieu incident, le rayon réfracté se rapproche de la normale, ce qui implique dans la description mécanique précédente que *la vitesse de la lumière s'accroît avec la densité du milieu* comme l'illustre la figure. Une interprétation similaire nourrit une vive polémique au XVII^{ème} siècle entre Fermat et Descartes.



2.3 Le Moyen âge occidental

Jusqu'au XI^{ème} siècle, les intellectuels occidentaux ne disposent que d'ouvrages hérités des Romains dont le souci n'avait pas été tant d'approfondir la recherche théorique des Grecs, que de s'attacher à un savoir encyclopédique de vulgarisation. L'exploitation de ces documents ne permettait pas de faire avancer l'état des connaissances.

Avec l'accès aux textes grecs originaux ou aux traductions, via les documents laissés par les Arabes lors de leur retrait d'Espagne (Reconquista), commence une période de traduction intense des sources. Parmi les auteurs importants, Aristote (commenté par Ibn al-Haytham et Averroès) tient le premier rang, en grande partie grâce au travail d'*Albert le Grand* (env. 1200-1280).

Il apparaît alors aux philosophes qu'il existe des *contradictions entre la révélation chrétienne et les savoirs antiques ou arabes*. Une intense activité intellectuelle vise à mettre en conformité Foi et Raison. Ceci aboutit à des constructions théoriques entièrement nouvelles.

En ce qui concerne la lumière, *deux tendances principales se dégagent* :

✓ *Thomas d'Aquin* (XIIIe) et les Maîtres de la Faculté de Théologie de Paris idéalisant la métaphysique d'Aristote, font de la lumière une pure qualité qui représente la perfection de Dieu, ce qui ne favorise pas les avancées scientifiques.

✓ Au contraire, les *Franciscains*, la Faculté des Arts de Paris, l'Université d'Oxford, intègrent les savoirs arabes (sauf le recours concret à l'expérience), et se posent comme héritiers à la fois du platonisme, d'Aristote, et des mécaniciens arabes.



Le franciscain anglais *Robert Grosseteste* (1168-1253) qui dirige l'école d'Oxford en 1230 et devient évêque de Lincoln en 1235 peut être considéré comme le fondateur de l'optique en Occident.

La lumière se « multiplie elle-même [...] instantanément dans toutes les directions » et se « répand uniformément dans toutes les directions ». Elle est la « première forme corporelle créée » car elle est la plus proche des formes qui existent hors de la matière, « les intelligences ». Grosseteste fait le lien avec une « lumière divine » qui vient éclairer l'esprit humain, suivant en cela Saint Augustin (354-430).

Il préconise l'*usage de l'expérience* pour contrôler les hypothèses et s'appuie sur les mathématiques, et en particulier la *géométrie*. Il utilise également des rapports à l'arithmétique pour analyser la multiplication des formes (ou espèces) à l'infini. Il développe une cosmologie finaliste où « toute opération de la nature s'accomplit de la manière la plus déterminée, la plus brève, la plus parfaite possible » et où la lumière occupe le rôle central, originel.



À Oxford, Robert Grosseteste a comme élève *Roger Bacon* (env. 1215-1292) ; après avoir étudié à Oxford puis à Paris, il enseigne Aristote à la Sorbonne en 1240. Théologien, il rejoint l'ordre des Franciscains en 1257.

Bacon tente d'harmoniser les théories de l'Antiquité en s'inspirant beaucoup des travaux d'Al-Haytham. Bacon utilise aussi des *espèces*, au sens des *formes* d'Al-Haitham, issues de chaque point de l'objet (discrétisé en éléments rayonnants) et émises dans toutes les directions.

Contrairement à Démocrite, qui suggère que la vision est possible dans le vide, la théorie des espèces de Bacon, inspirée d'Aristote, est une *théorie des milieux*. Ses espèces peuvent être assimilées à des « ondes » se propageant dans un milieu.

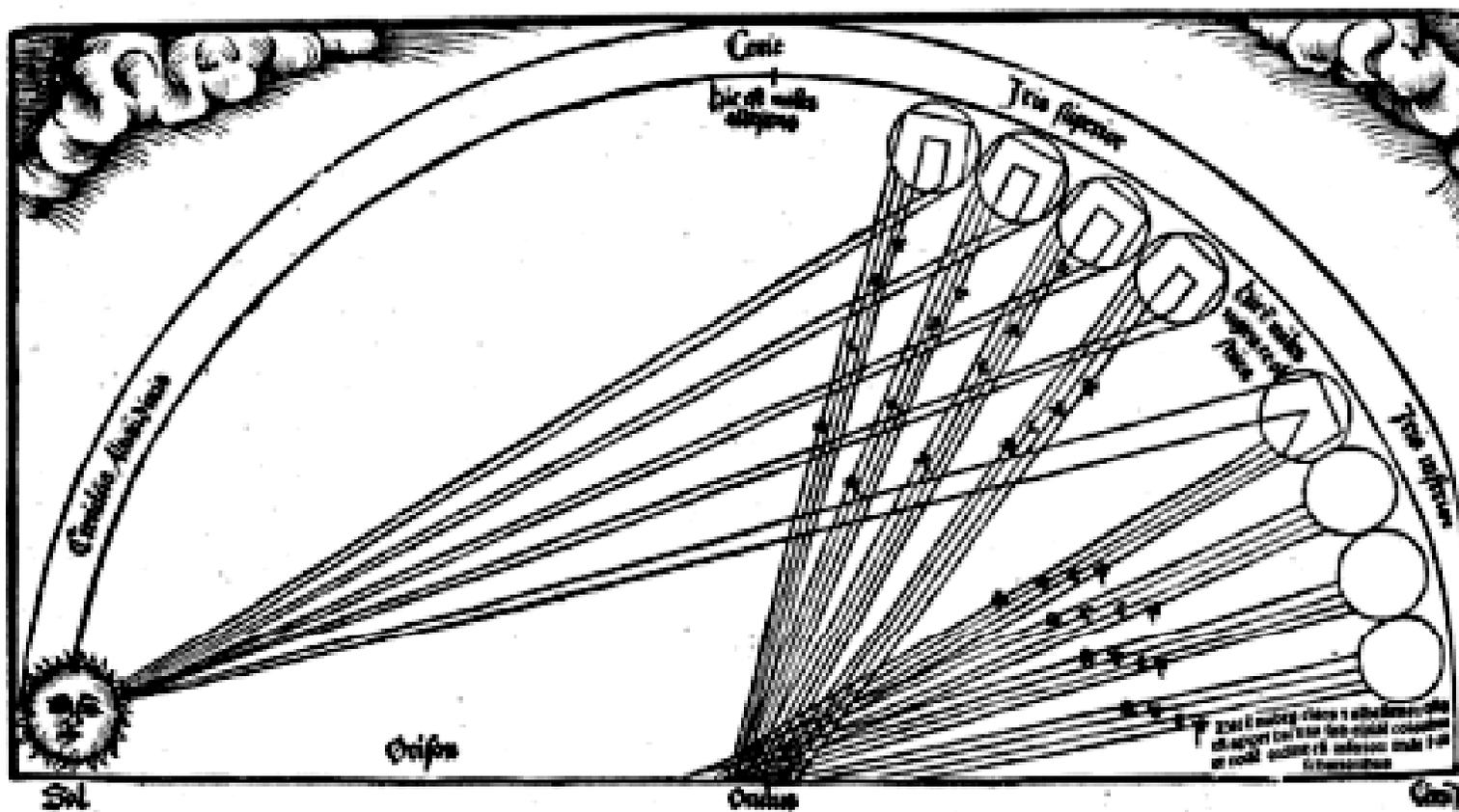
Bacon s'intéresse aussi aux phénomènes de réflexion et de réfraction :

Les miracles réalisables par la réfraction sont encore plus grands, car il apparaît clairement des règles précédentes que ce qui est très grand peut être rendu très petit et vice versa, et que les objets éloignés peuvent être rapprochés et les choses proches éloignées. Car nous pouvons donner une forme telle aux matières transparentes et les disposer d'une manière telle par rapport à l'œil et aux objets visibles, que les rayons seront réfractés et déviés dans la direction que nous souhaitons, nous permettant ainsi de voir les choses proches ou loin, selon l'aspect voulu.



Le moine polonais *Witelo* (1220-1275) publie des *tables d'angles de réfraction en fonction de l'angle d'incidence* dans différents milieux.

Une autre grande figure de l'optique en Occident au Moyen-âge est *Dietrich* (ou *Thierry*) de *Freiberg* (dominicain allemand né vers 1250 et mort après 1310), le premier à donner une explication satisfaisante de *l'arc-en-ciel* dans son traité *De iride et radialibus impressionibus*.

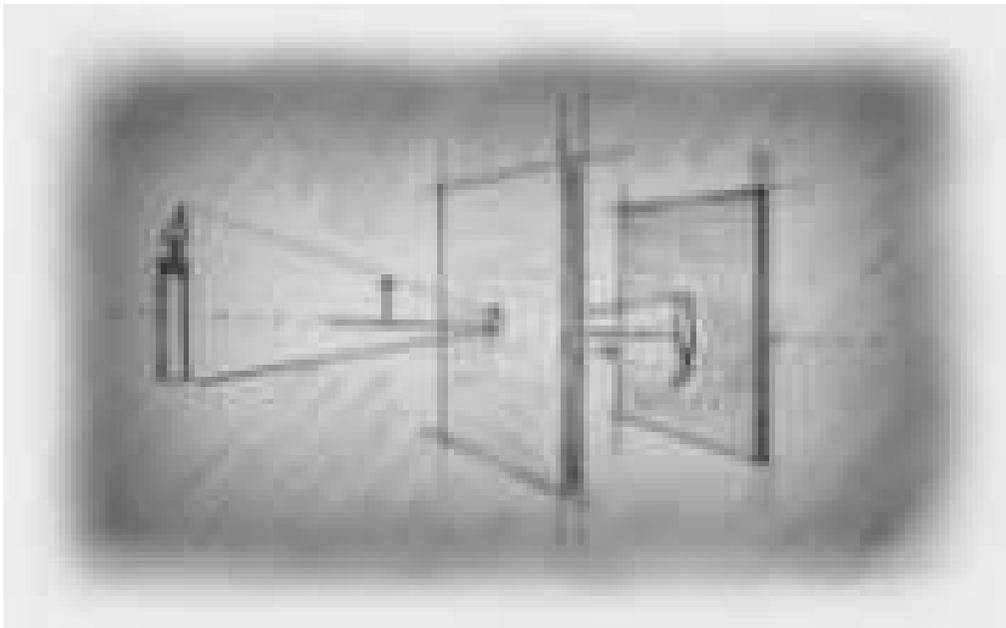


Gravure issue d'une reproduction de 1514 de l'ouvrage de Dietrich von Freiberg

2.4 la Renaissance et les fondements de la science moderne

Ce n'est qu'en 1572 que l'œuvre intégrale d'Ibn al-Haytham sera réellement diffusée et rendue accessible à la civilisation occidentale.

Dans la seconde moitié du XVI^{ème} siècle, *Giambattista Della Porta* (Naples, 1535-1615) détaille, mais sans vraiment l'expliquer, dans son *Magia Naturalis* l'expérience de la *chambre noire ou sténopé* à laquelle il ajoute une lentille à l'entrée et explique ainsi *le mécanisme de la formation des images sur la rétine par l'œil*.



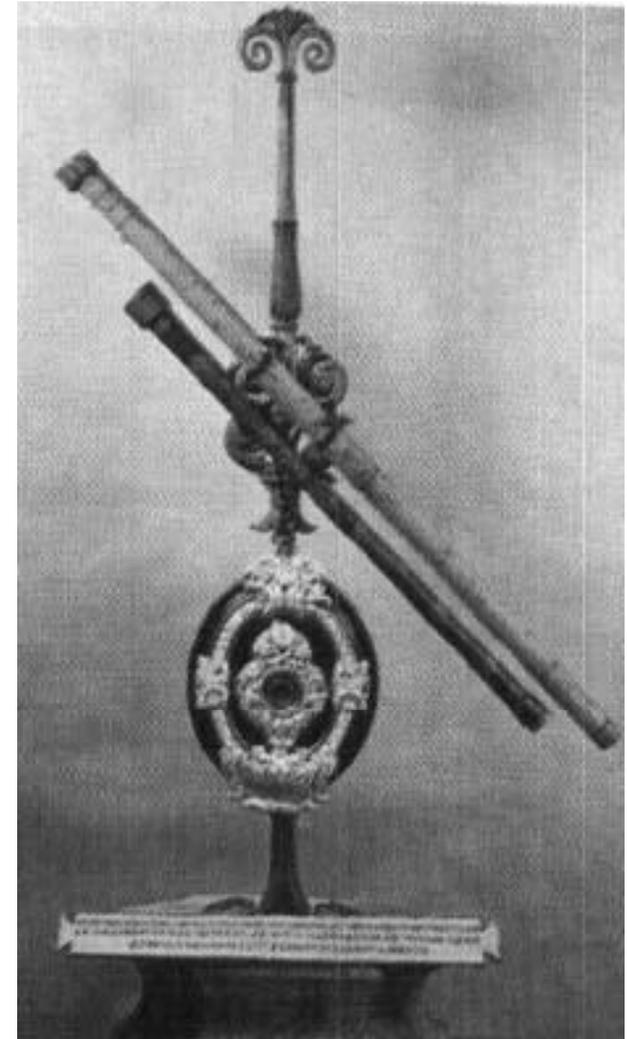
Cette période voit aussi le développement de l'*optique instrumentale*, notamment avec l'invention et les premières utilisations de la lunette astronomique par *Galilée* (1564-1642) et *Johannes Kepler* (1571-1630).

Même s'il en fit le premier une utilisation capitale, Galilée a eu de nombreux prédécesseurs dans la réalisation de l'instrument, et il faut modérer l'arrogance de ses propos lorsqu'il écrit en 1610 :

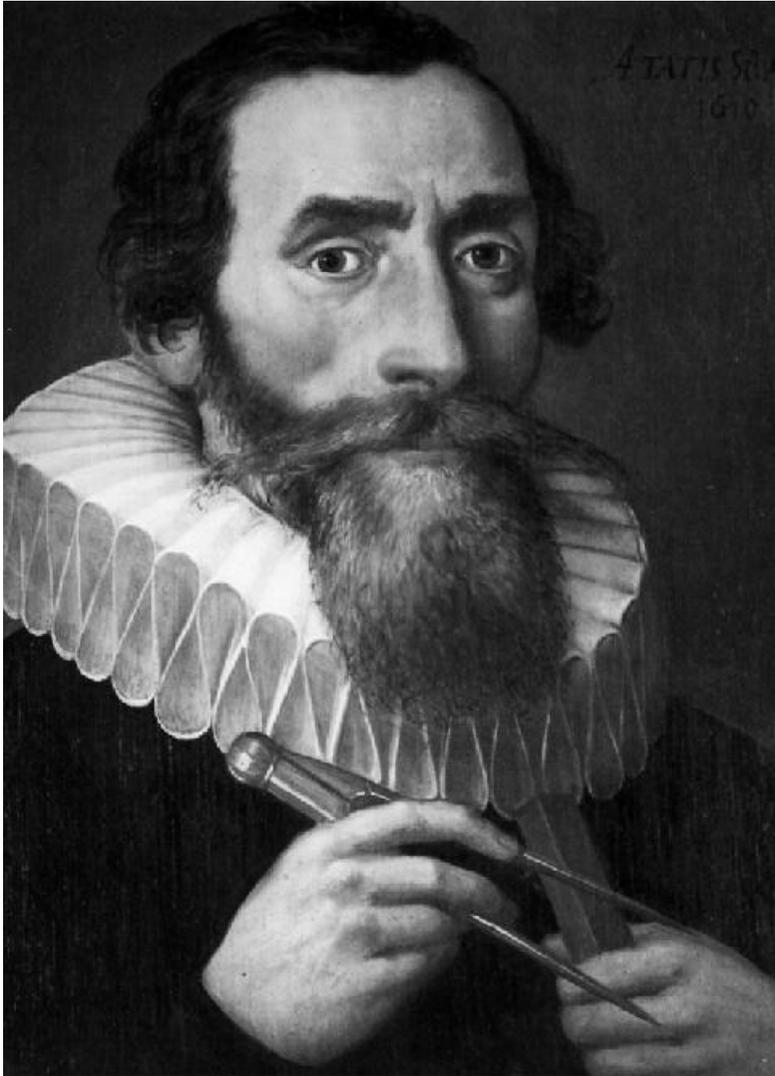
Tous ces phénomènes, une Lunette que j'ai conçue sous l'illumination de la grâce divine m'a permis, il y a peu de jours, de les découvrir et de les observer.

L'apport déterminant de Galilée est de réaliser un *instrument de bonne qualité* : grâce à ses améliorations (qualité des verres, stabilité), la lunette dans les mains de Galilée devient vraiment un instrument scientifique.

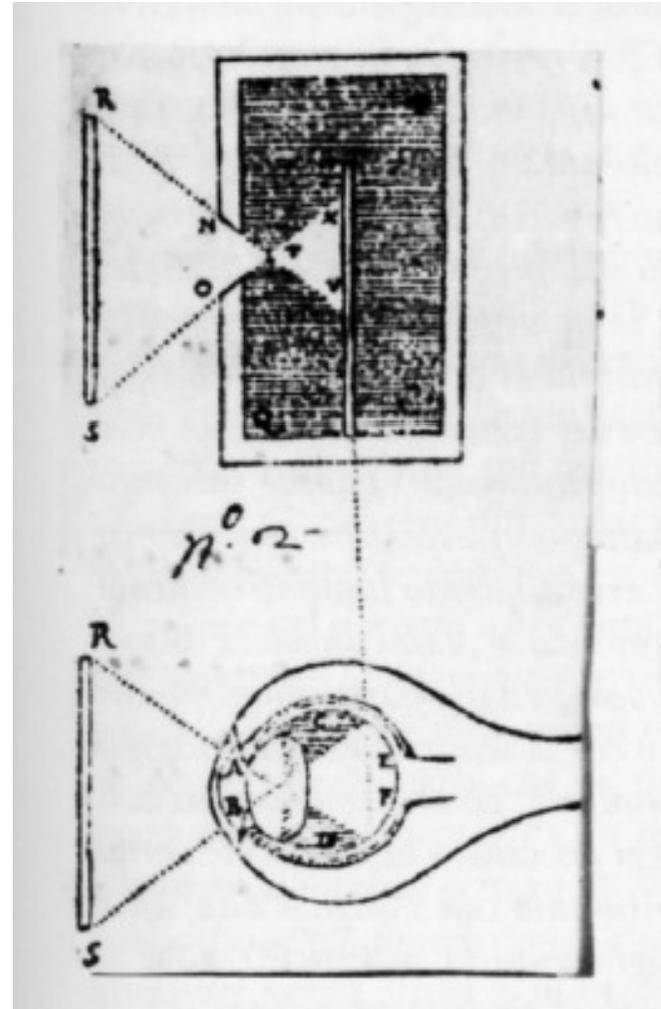
Dans le domaine de l'optique, ses connaissances théoriques semblent très floues.



À l'inverse, l'apport de Kepler à l'optique théorique est énorme. Kepler élucide notamment le *fonctionnement de la chambre noire*. C'est l'un des premiers avec Ludovico Cardi (dit *il Cigoli*) à en expliquer correctement le fonctionnement



Johannes Kepler



L'œil, comme une camera obscura, par Cigoli



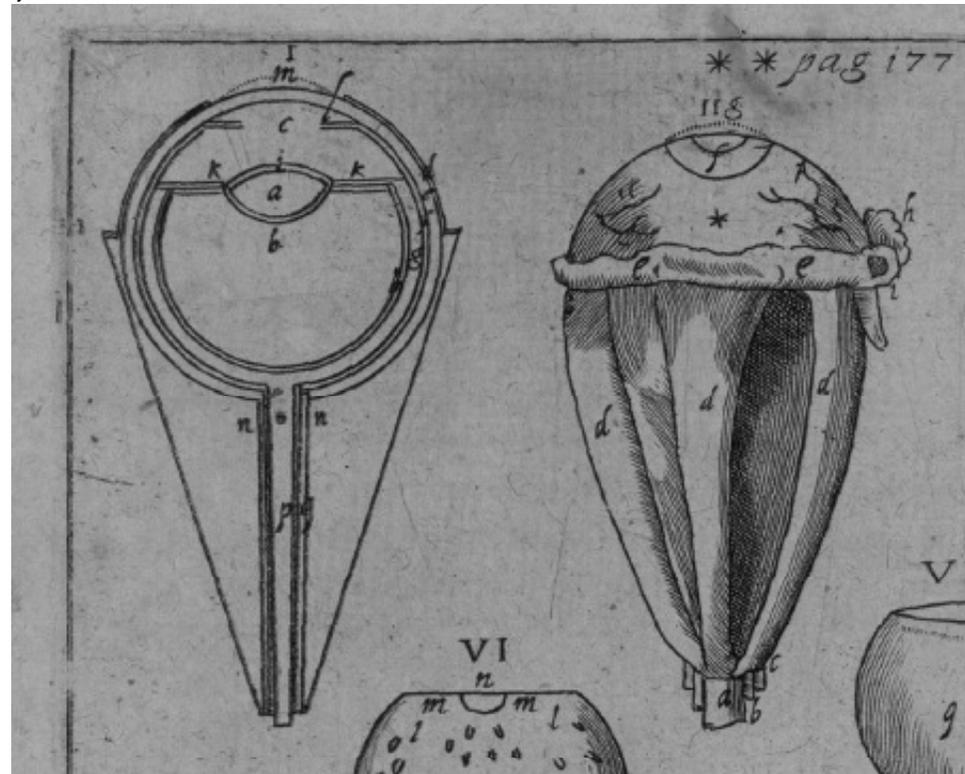
Dans le domaine de la vision, Kepler condamne la proposition qu'il juge artificielle d'Al-Haytam qui consistait pour expliquer la vision à privilégier les rayons perpendiculaires à l'œil en leur attribuant une force prépondérante. Il argumente que *les rayons quasi perpendiculaires n'ont pas de raison d'avoir notablement moins de force que ceux qui le sont exactement*.

Ayant connaissance des travaux des anatomistes contemporains, Kepler adopte le point de vue de Félix Platter qui attribue la *zone de la formation des images non pas au cristallin*, comme Galien ou AL-Haytham l'avaient fait, mais à *la rétine*.

Les rayons se croisent après le cristallin et forment une *image inversée de l'objet sur la rétine*. Kepler fait s'arrêter là le domaine de l'optique et s'en remet au cerveau pour « redresser » l'image. Il explique ensuite le *rôle des lentilles convexes et concaves* dans l'amélioration de la presbytie et de la myopie.

En faisant de l'œil un instrument d'optique, Kepler résout le problème de la vision et marque le début de l'optique moderne. Il condamne définitivement la notion de rayon visuel.

Surtout, grâce à ces avancées théoriques, *la question de la nature de la lumière se détache alors enfin du problème de la vision et passe au premier plan.*



Anatomie de l'œil, selon Kepler

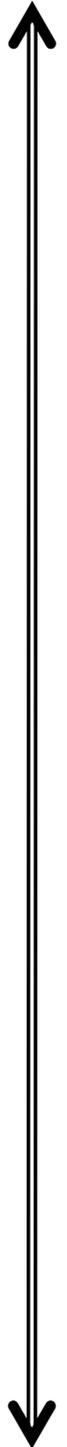
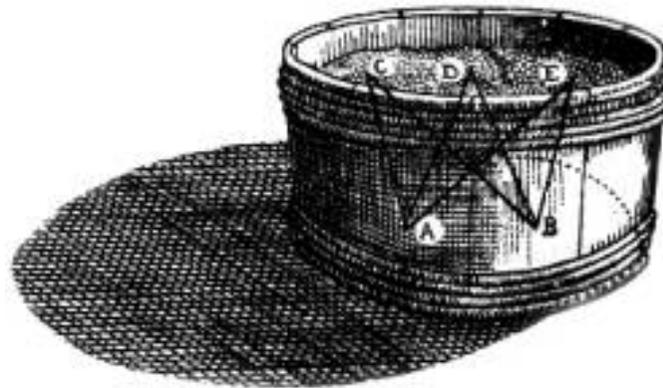
2.5 Descartes , la nature vibratoire de la lumière et la controverse avec Fermat



La lumière occupe une place centrale dans l'œuvre scientifique de *René Descartes* (1596-1650).

Contrairement à ses célèbres *Principes*, ouvrage difficile destiné à l'enseignement et rédigé en latin dans lequel Descartes livre une théorie complète de la lumière, il fait preuve d'un certain pragmatisme en procédant par *analogies*, dans un autre de ses ouvrages, écrit en français, la *Dioptrique*.

On y lit par exemple que *la lumière se propage dans les milieux comme le vin s'écoule en ligne droite entre les grappes de raisin dans une cuve remplie de vin et de grappes de raisins* (les grappes jouent le rôle de l'air ou de corps).



Cette image montre que pour Descartes, *la propagation de la lumière ne peut se faire qu'à l'aide d'un milieu.*

Dans la philosophie cartésienne, il n'y a pas de vide, mais « quelque matière fort subtile et fort fluide » qui remplit les « pores » des corps. Cette matière « s'étend sans interruption depuis les Astres jusques à nous ».

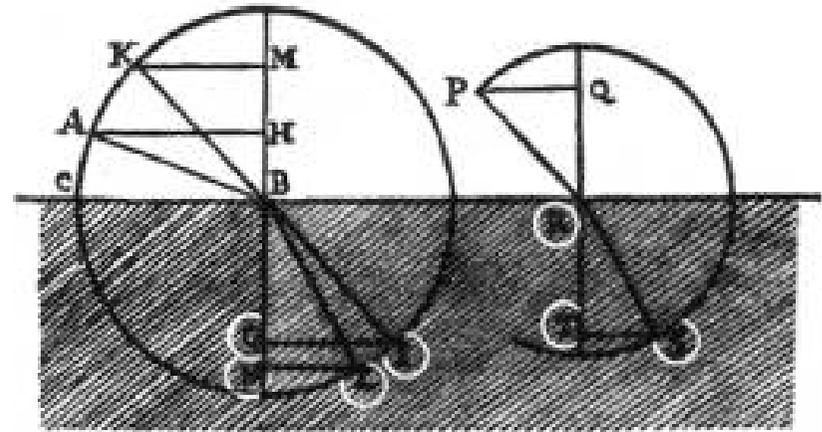
L'Univers de Descartes est incompressible et plein, et permet seulement des *mouvements tourbillonnaires* ; la matière est ainsi pressée, et cette pression qui se transmet *instantanément* à travers le milieu constitue l'essence même des phénomènes lumineux.

La lumière n'est donc pas un véritable mouvement mais une tendance au mouvement, une pression, « comme tremblante » qui, par l'intermédiaire d'un milieu, « se redouble par petites secousses ».

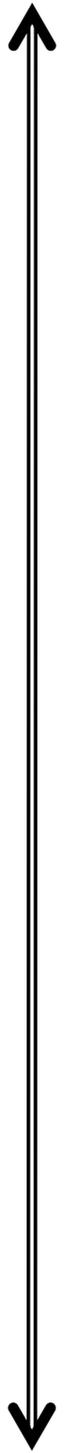
La conception de la lumière comme action spécifique est inséparable de l'idée de milieu : celui-ci, baptisé *éther*, est un *support du mouvement* mais ne participe pas au mouvement d'ensemble.

Descartes dit aussi que « les rayons de lumière ne sont autre chose que les lignes suivant lesquelles tend cette action » et que, même si la lumière consiste en une action qui se fait ressentir *instantanément*, le rayon de cette action, *le rayon de lumière*, obéit aux lois du mouvement et *peut être amorti*, c'est à dire *ralenti*. Cette *dualité* rend la théorie quelque peu incohérente. Elle porte le germe aussi de ce qui sera la source de la polémique entre Descartes et Fermat.

Pour établir la *loi de la réfraction*, le raisonnement de Descartes repose sur une *analogie mécanique* (la lumière est analogues à un flux de petites balles) et une hypothèse : *il suppose que la vitesse dans le milieu le plus réfringent est plus grande*. Devant la validité expérimentale de la relation à laquelle il aboutit (la loi de Snell-Descartes), Descartes en vient à valider cette hypothèse qu'il sait contraire à l'intuition, et à lui trouver une justification. Il écrit :



« Ce que vous cesserez toutefois de trouver étrange, si vous vous souvenez de la nature que j'ai attribuée à la lumière, quand j'ai dit qu'elle n'était autre chose, qu'un certain mouvement ou une action reçue en une matière très subtile, qui remplit les pores des corps ; et que vous considérez que, comme une balle perd davantage de son agitation, en donnant contre un corps mou, que contre un qui est dur, et qu'elle roule moins aisément sur un tapis, que sur une table toute nue, ainsi l'action de cette matière subtile peut beaucoup plus être empêchée par les parties de l'air, qui, étant comme molles et mal jointes, ne lui font pas beaucoup de résistance, que par celles de l'eau, qui lui en font davantage ; et encore plus par celles de l'eau, que par celles du verre ou du cristal. En sorte que d'autant que les petites parties d'un corps transparent sont plus dures et plus fermes, d'autant laissent-elles passer la lumière plus aisément : car cette lumière n'en doit pas chasser aucunes hors de leur place, ainsi qu'une balle en doit chasser de celles de l'eau, pour trouver passage parmi elles ».



Cette hypothèse anti intuitive fut vivement critiquée par *Pierre de Fermat* (1601-1665) qui, postulant que *la lumière se propage suivant un principe de moindre temps*, démontre que les actions lumineuses se propagent d'autant moins vite que le milieu est plus réfringent (et donc plus vite dans le vide que dans tout autre milieu), c'est-à-dire exactement le contraire de l'hypothèse de Descartes.

Fermat est très surpris de parvenir ainsi à la loi des sinus de Descartes, en étant parti d'un point de vue radicalement opposé sur la vitesse de la lumière dans les différents milieux. Il écrit à ce propos dans une lettre adressée à M. Cureau de la Chambre, médecin du roi :

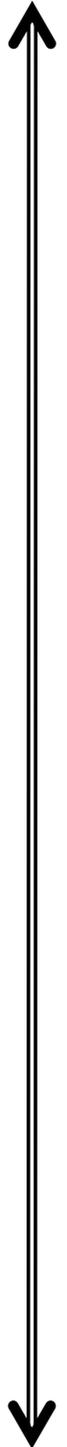
« Le prix de mon travail a été le plus extraordinaire, le plus imprévu et le plus heureux qui fut jamais. Car après avoir couru par toutes les équations, multiplications, antithèses et autres opérations de ma méthode, et avoir enfin conclu le problème ..., je trouvais que mon principe donnait justement et précisément la même proportion des réfractions que M. Descartes a établie. J'ai été si surpris d'un événement si peu attendu que j'ai peine à revenir de mon étonnement. J'ai réitéré mes opérations algébriques diverses fois, et toujours le succès a été le même, quoique ma démonstration suppose que le passage de la lumière par les corps denses soit plus malaisé que par les corps rares, ce que je crois très vrai et indispensable, et que M. Descartes suppose le contraire ».



Fermat est prêt à donner tout le mérite de la découverte des lois des sinus à Descartes, mais argumente pour qu'au moins d'un point de vue géométrique, sa démonstration ait droit de cité. Il conclut sa lettre ainsi:

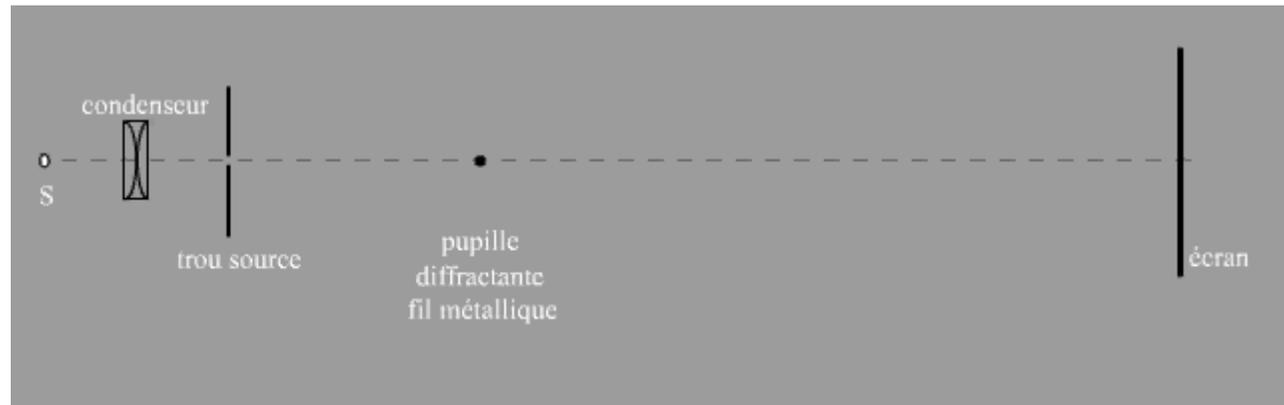
C'est à vous, Monsieur, qui êtes sans doute destiné par votre mérite extraordinaire à avoir grand commerce avec elle [la postérité], à l'informer si vous le jugez à propos, de ce célèbre démêlé ou, si vous pensez mieux placer ce petit écrit parmi vos papiers inutiles, j'y consens et tout m'est indifférent...

Quant à son hypothèse, l'avenir devait donner raison à Fermat... Pour le reste, modestie ou ironie ?



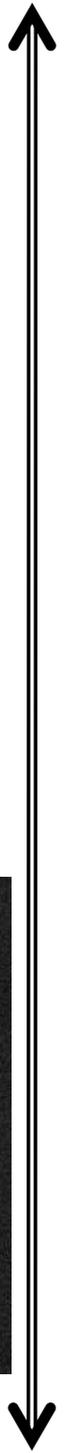
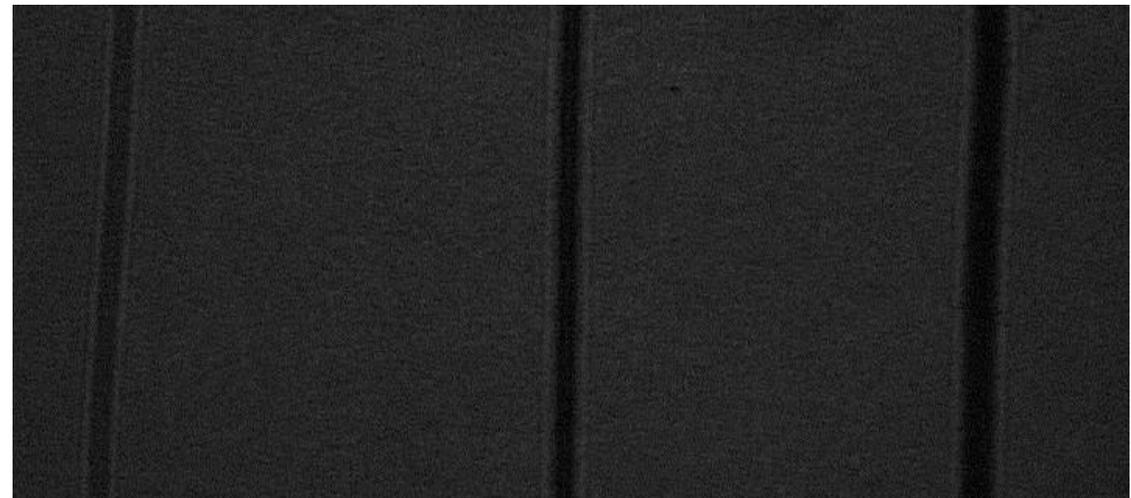
2.6 Et la lumière devint une onde...

En 1685 paraît le livre du père *Grimaldi* qui met en évidence une nouvelle propriété de la lumière : les *phénomènes de diffraction*. En traversant des ouvertures étroites, en rencontrant des obstacles très fins (fils, cheveux), la *lumière peut cesser de se propager en ligne droite* : les régions correspondant à l'ombre géométrique présentent alors des bandes lumineuses, tandis que les régions normalement éclairées montrent des raies obscures.

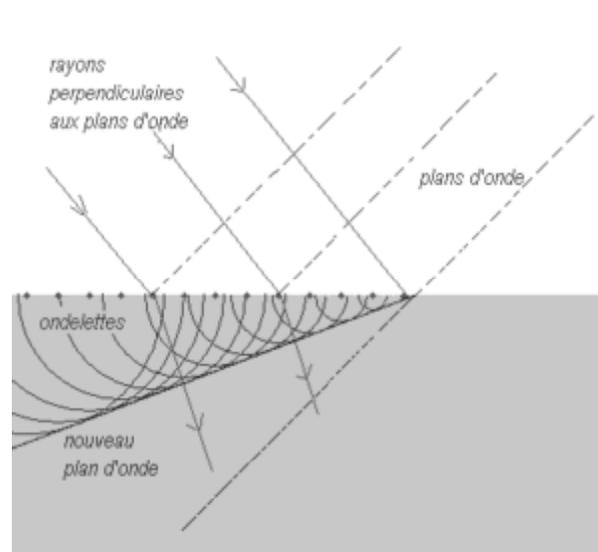


Ces phénomènes conduisent Grimaldi à supposer que *la lumière est une substance dont la propagation s'effectue de manière ondulatoire*.

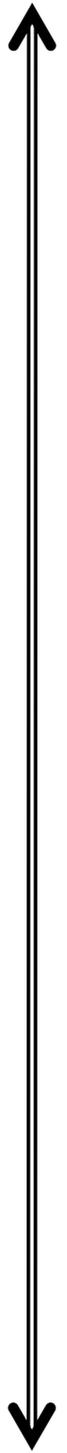
Les modalités de ces ondulations, leur formation, leur lien avec la formation des couleurs sont encore fort imprécises.



Le savant hollandais *Christiaan Huygens* (1629-1695) réussit à interpréter avec un *modèle ondulatoire* (basé sur l'utilisation d'ondelettes sphériques) les *lois de la réflexion et de la réfraction*. Sans qu'il ne le sache, sa théorie permet aussi d'expliquer les phénomènes de diffraction (mais c'est Augustin-Jean Fresnel au XIXème siècle qui le démontrera). Huygens retrouve ainsi les lois de la réflexion et de la réfraction de manière théorique. Dans le cas de la réfraction, il postule comme Fermat, et contrairement à Descartes et Hooke, *que la vitesse de la lumière dans l'eau est plus petite que dans l'air*.



La forme de l'onde (longitudinale ou transversale) et l'identité des grandeurs oscillantes sont encore loin d'être élucidées. *Robert Hooke* (1635-1703) suppose (mais pour de mauvaises raisons) que la lumière est formée d'ondulations transverses, tandis que *Nicolas de Malebranche* (1638-1715), influencé par Descartes, pense à des oscillations longitudinales, ce qui s'avèrera faux.



2.7 Les travaux d'Isaac Newton sur la lumière

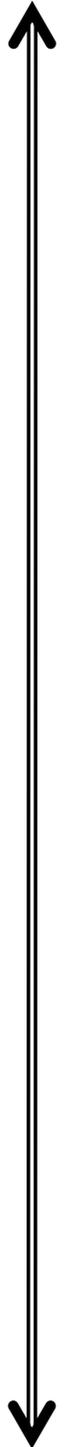


Auteur de nombreux travaux en optique, *Isaac Newton* (1642-1727) donne notamment une théorie de la réflexion et de la réfraction de la lumière fondée sur l'*attraction universelle*. Selon lui, « le mouvement progressif de la lumière n'est pas seulement moins retardé dans le milieu le plus dense », comme le voulait Descartes, « mais il est réellement accéléré, et cela par l'attraction du milieu plus dense lorsqu'il pénètre ». Dans la théorie de Newton, *la vitesse de la lumière est donc plus grande dans les milieux denses, en accord avec Descartes et Hooke et contre Fermat et Huygens*.

Son explication par l'*attraction universelle* repose clairement sur l'utilisation de *corpuscules*. Newton va toutefois éviter systématiquement de se prononcer sur la nature de la lumière et reste très prudent :

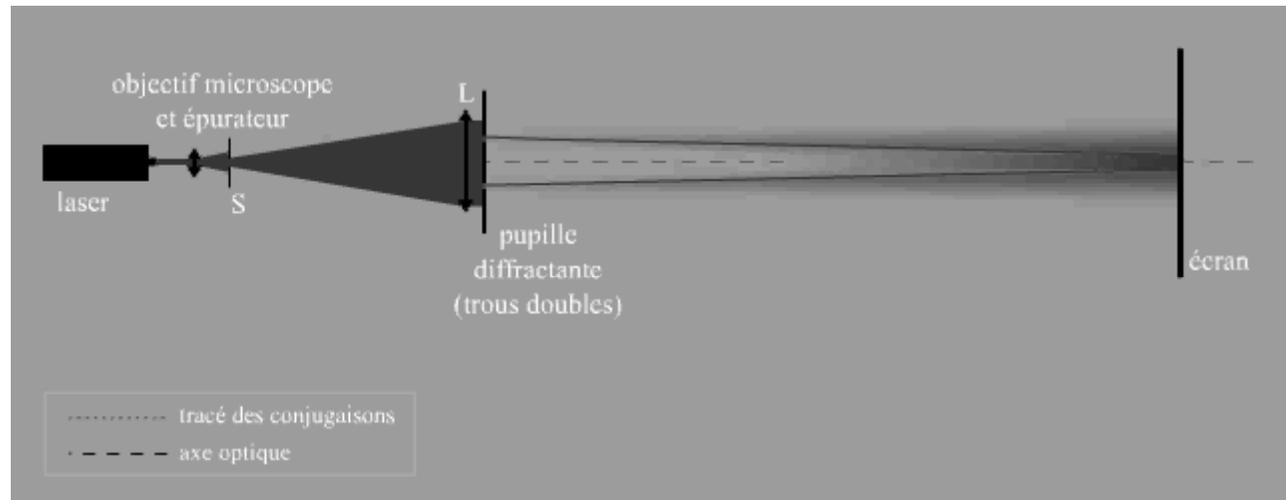
« Nous sommes certains que la lumière est une substance, mais il est plus difficile de déterminer ce qu'est cette substance [...]. Je ne veux pas mélanger ce qui est certain avec ce qui est incertain ».

Newton est d'ailleurs amené pour expliquer ces observations sur les couleurs à développer une *théorie mixte de la lumière où des corpuscules spécifiques pourraient exciter les ébranlements de l'éther*.



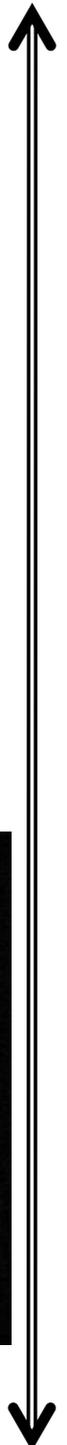
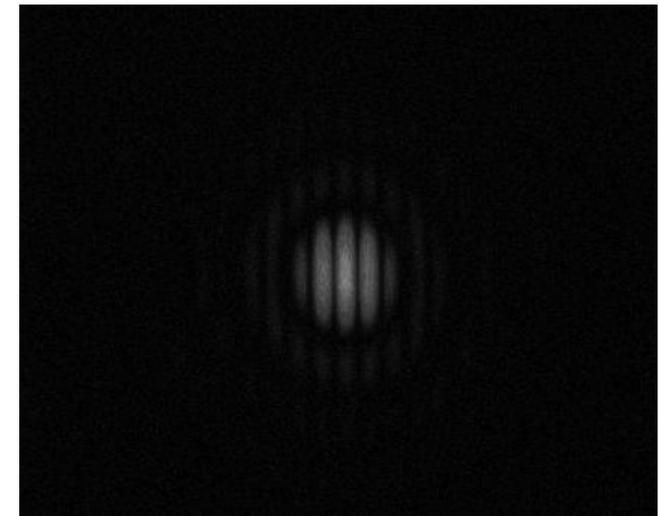
2.8 De nouvelles découvertes donnent l'avantage à la théorie ondulatoire

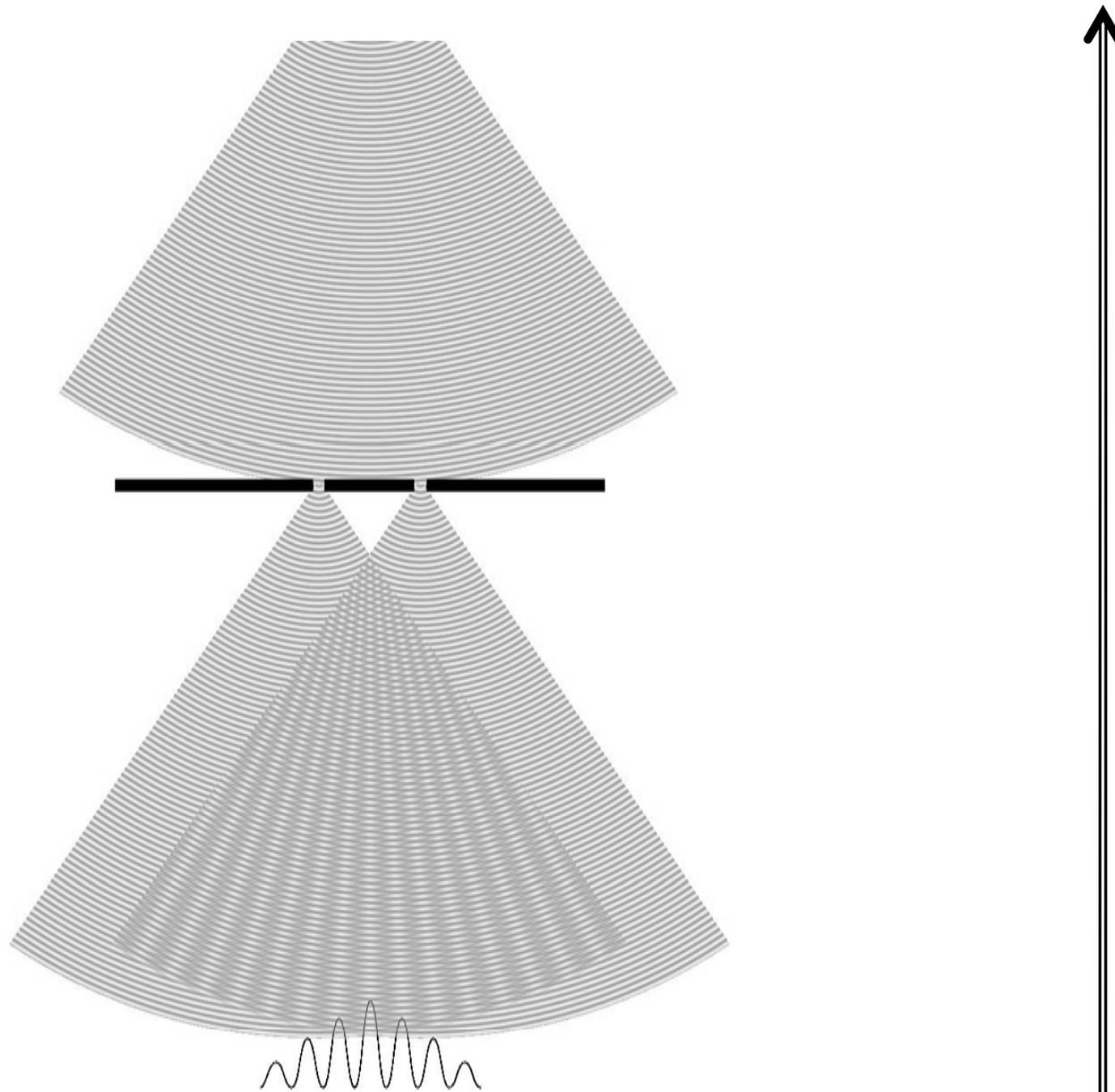
Le début du XIX^{ème} siècle est marqué par le développement de nombreux travaux expérimentaux : découverte de la *polarisation de la lumière* par *Etienne Louis Malus* (1775-1812), étude des *phénomènes d'interférence* par *Thomas Young* (1773-1829) .



Ces découvertes décisives ne permettent pas de trancher entre les hypothèses au sujet de la nature de la lumière.

Ainsi, Malus est encore favorable à une interprétation corpusculaire de type newtonien, appliquée à des particules lumineuses polaires, tandis que Young suppose, au contraire, que les interférences exigent une nature purement cinétique de la lumière.





Explication ondulatoire du phénomène d'interférences

C'est *Augustin-Jean Fresnel* (1788-1827) qui, multipliant les expériences sur les phénomènes de diffraction, montre qu'une *interprétation ondulatoire de la lumière paraît s'imposer*. De la lumière ajoutée à la lumière peut produire l'obscurité. Fresnel est l'auteur d'une *théorie ondulatoire de la lumière qui rend compte de tous les phénomènes connus à son époque*.

Jusqu'à Fresnel, la vibration lumineuse n'était généralement envisagée que comme une onde longitudinale de pression dans un fluide. Afin d'expliquer la polarisation, Fresnel introduit la *transversalité de la vibration lumineuse*.

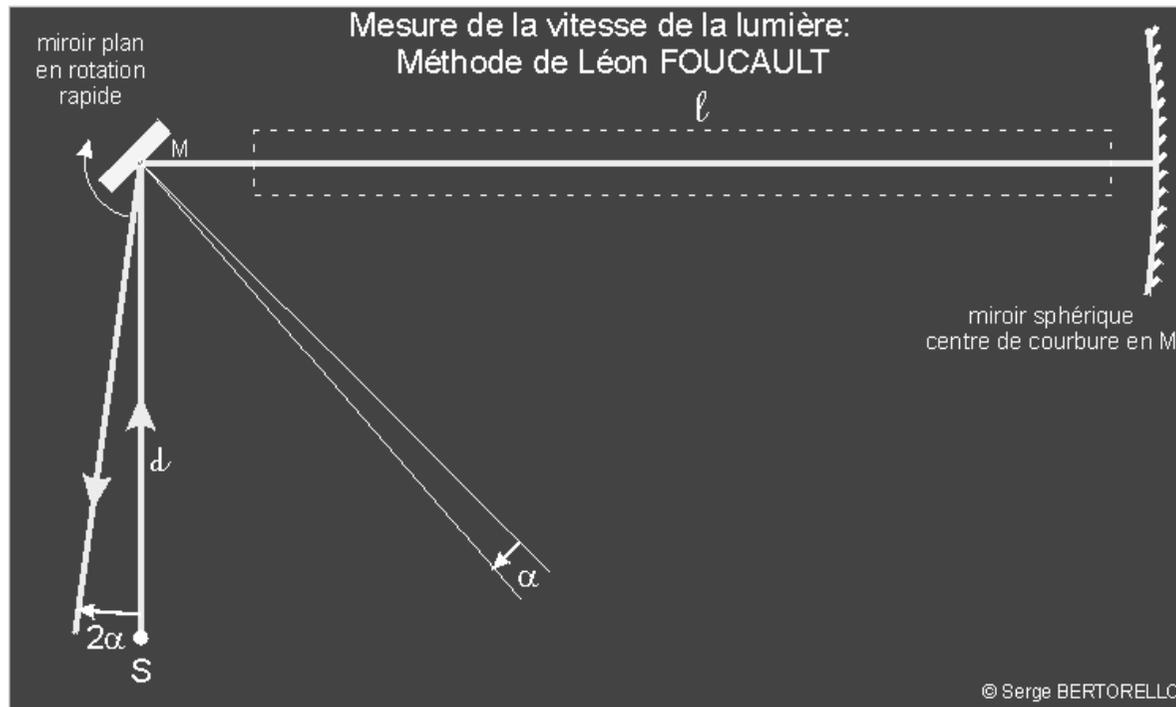
Après la séance d'avril 1819 de l'Académie des sciences, où Fresnel présente ses résultats, la *nature ondulatoire de la lumière paraît définitivement en voie de triompher*, sauf pour quelques irréductibles.



2.9 Ondes ou corpuscules ? L'expérience cruciale de Foucault

De plus, s'il en est besoin, une « expérience cruciale » vient bientôt départager les théories concurrentes : en adoptant une hypothèse corpusculaire, il faut conclure que la lumière se propage plus vite dans l'eau que dans l'air (cf. Descartes, Newton). D'après une théorie ondulatoire, ces résultats sont inversés (cf. Fermat). En 1838, Arago déclarait que « *l'une des deux théories devait forcément succomber devant le verdict de l'expérience* ».

Celle-ci est réalisée par *Léon Foucault* (1819-1868) à l'aide d'un miroir tournant, en 1850 : *la vitesse de la lumière, plus faible dans l'eau, assure le triomphe de la théorie des ondulations.*



L'écartement entre la source S et l'image retournée par le montage est inversement proportionnel à la vitesse de la lumière. Cette méthode est élégante car elle est simple à mettre en œuvre et elle se contente d'une faible distance de parcours de la lumière (quelques mètres). Elle peut donc être utilisée pour analyser le comportement de la lumière dans un milieu quelconque.

Après cette expérience, seul *J. B. Biot* soutiendra jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle les principes d'une théorie corpusculaire.

2.10 Maxwell et le champ électromagnétique

Une question reste toutefois en suspens pour les défenseurs de la nature ondulatoire : *quelle est la grandeur qui oscille dans le phénomène lumineux ?*

La synthèse entre les phénomènes électriques, magnétiques et optiques est l'œuvre de l'écosais *James Clerck Maxwell* (1831-1879). Maxwell introduit le courant de déplacement et écrit un ensemble d'équations cohérent regroupant l'électricité et le magnétisme, et prédisant l'existence d'ondes, se déplaçant très rapidement, *les ondes électromagnétiques*.

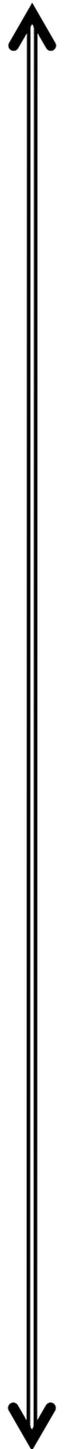


Compte tenu des caractéristiques de ces ondes il conclut que *la lumière doit être une onde électromagnétique*, ainsi que d'autres types d'ondes connues.

La lumière, de nature vibratoire, devient donc un cas particulier des vibrations électromagnétiques.

Les grandeurs qui oscillent sont un champ électrique et un champ magnétique transverses, et constamment perpendiculaires entre eux.

La théorie de Maxwell permet d'expliquer tous les phénomènes lumineux connus, et ne doit plus résoudre que le *problème de la nature du milieu (l'éther) permettant la propagation de ces ondes électromagnétiques*.

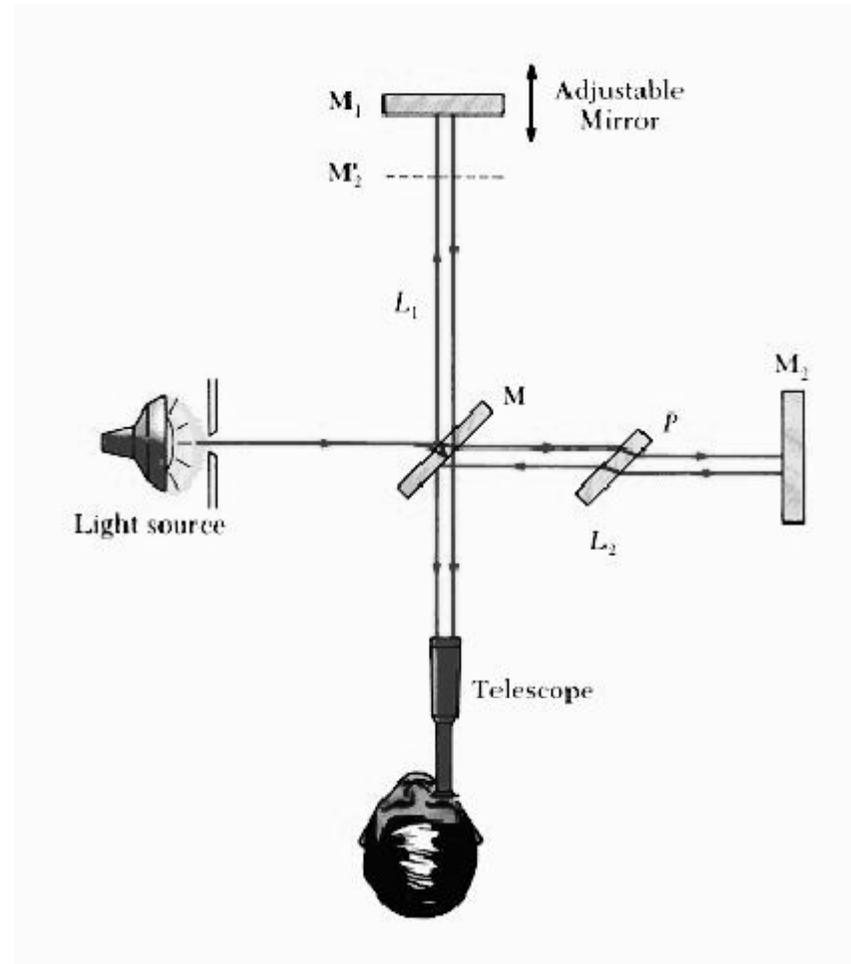


2.11 La lumière, à la base de la relativité d'Einstein

L'optique ondulatoire de Fresnel et la théorie électromagnétique de Maxwell impliquent un *mouvement de la Terre par rapport à l'éther* ce qui doit pouvoir être mis en évidence, par exemple à l'aide d'un appareil très précis appelé *interféromètre*. C'est à cette détermination que s'attache les physiciens américains *Albert Michelson et Edward Morley*.

Le problème soulevé par les *conclusions négatives de l'expérience de Michelson* en 1887 (la Terre ne se déplace pas par rapport à ce mystérieux éther) ne trouvera sa solution au sein de la « théorie de la *Relativité restreinte* » d'*Albert Einstein*. Celle-ci considère l'éther lumineux comme « superflu » mais détruit au passage les concepts de temps et d'espace absolus qui fournissaient le cadre d'étude de la mécanique newtonienne.

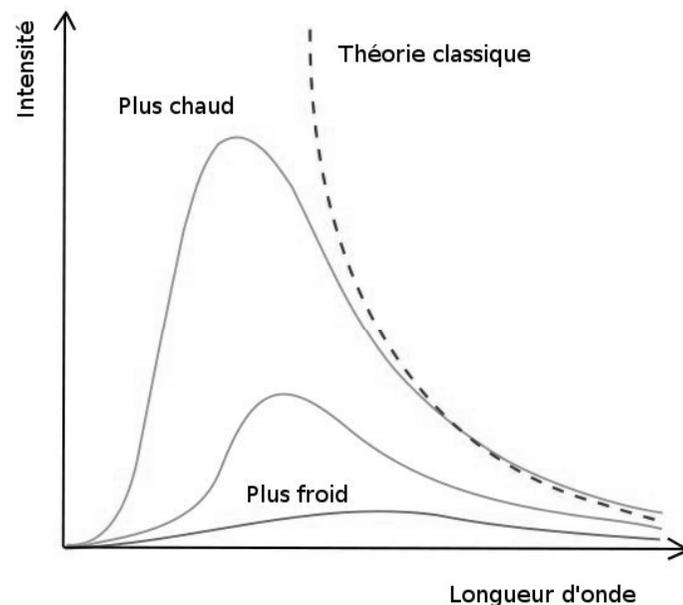
La *vitesse de la lumière apparaît dans cette théorie* comme une constante de structure de « l'espace-temps » et une constante universelle de la physique : *la lumière se déplace toujours* (c'est-à-dire quel que soit l'observateur) à la *vitesse... de la lumière !*



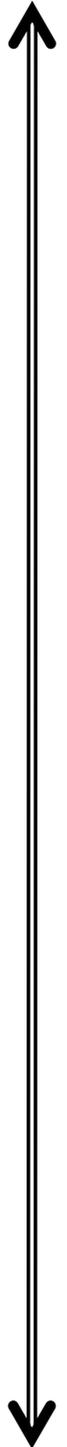
2.12 La révolution quantique et la revanche des « corpusculistes »

Enfin, par un renversement inattendu de l'histoire, la présence de discontinuités dans le rayonnement émis par le *corps noir* devait renouveler, au début du XX^{ème} siècle, *une hypothèse favorable à des agglomérats énergétiques* dans le rayonnement émis (*aspect corpusculaire*).

Le physicien allemand *Max Planck* (1858-1947) introduit comme hypothèse la *quantification des échanges d'énergie entre la lumière et la matière* et fait apparaître une nouvelle constante fondamentale en physique (la *constante de Planck*).

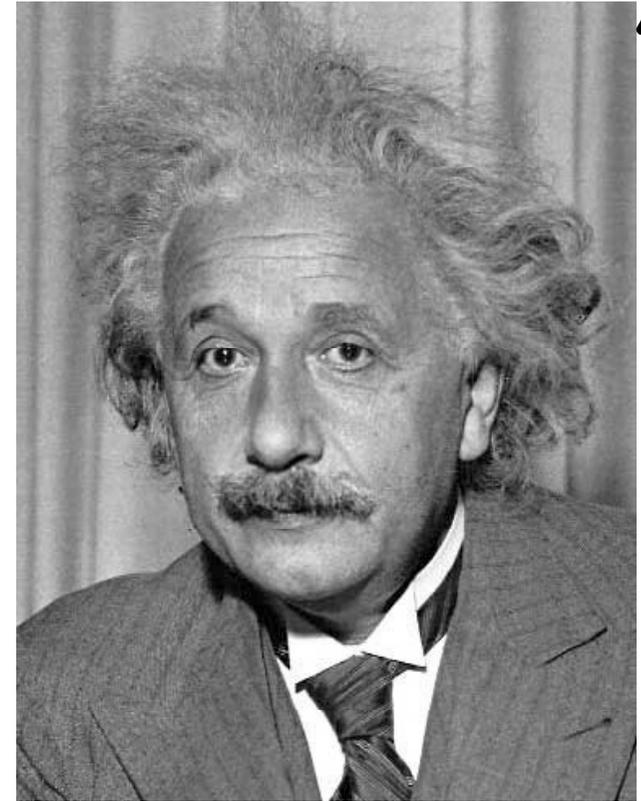


Grâce à cette hypothèse, il reproduit théoriquement les courbes expérimentales caractérisant le rayonnement émis par un corps chauffé (*théorie du corps noir*).



En 1905, *Albert Einstein* (1879-1955) publie un article dans lequel il montre que la *lumière* se comporte comme si elle était *constituée de grains d'énergie indépendants* (les *quanta*).

Contrairement à Planck, qui ne faisait porter la quantification que sur les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière, *Einstein donne une structure discrète (corpusculaire) à la lumière elle-même*. Il applique cette théorie à la description de *l'effet photoélectrique* découvert par *Heinrich Hertz* (1857-1894) en 1887. Cette description vaudra à Einstein le Prix Nobel de Physique.



Néanmoins, l'énergie de ces nouveaux « *quanta* » (paquets indivisibles d'énergie lumineuse) ou « *photons* » s'exprime nécessairement en fonction de la fréquence de l'onde associée.

Ce *double aspect corpusculaire et ondulatoire de la lumière* va être étendu, par Louis de Broglie, à toute particule matérielle (1924) et constitue un des fondements de la Mécanique Quantique qui révolutionne la Physique décrivant le monde microscopique.

Ainsi, la nature de la lumière, phénomène d'exception, après avoir été au cœur de nombreuses recherches scientifiques constitue encore la pierre angulaire de la construction des théories relativistes et quantiques de la Physique moderne.