

Chapitre 1 : petit historique de la lumière et des théories de l'optique

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)

La lumière est également un **attribut de Dieu** :

« Moi je suis la lumière du monde. Qui me suit ne marchera pas dans les ténèbres, mais aura la lumière de la vie. » (Jean 8 ; 12)

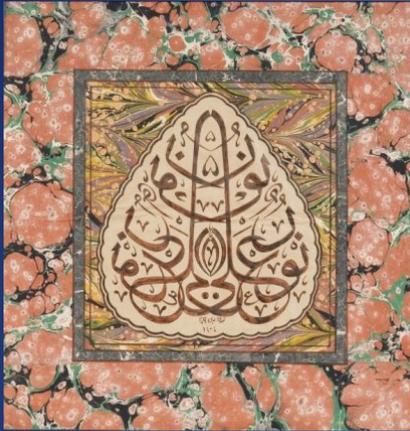


Esprit de Dieu planant sur les eaux et Création des végétaux ; dans le premier médaillon : quatre rayons lumineux partent du buste de Dieu.



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.

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



Composition symétrique
du verset 35 de la Sourate
XXIV, al-Nour, donnant :
« Nour 'ala Nour
« Lumière sur la Lumière".

« Allah est la Lumière des cieux et de la terre. Sa lumière est semblable à une niche où se trouve une lampe. La lampe est dans un (récipient de) cristal et celui-ci ressemble à un astre de grand éclat ; son combustible vient d'un arbre béni : un olivier ni oriental ni occidental dont l'huile semble éclairer sans même que le feu la touche. Lumière sur lumière. Allah guide vers Sa lumière qui Il veut. Allah propose aux hommes des paraboles et Allah est Omniscient » (Sourate XXIV An-Nur, « La lumière » verset 35)

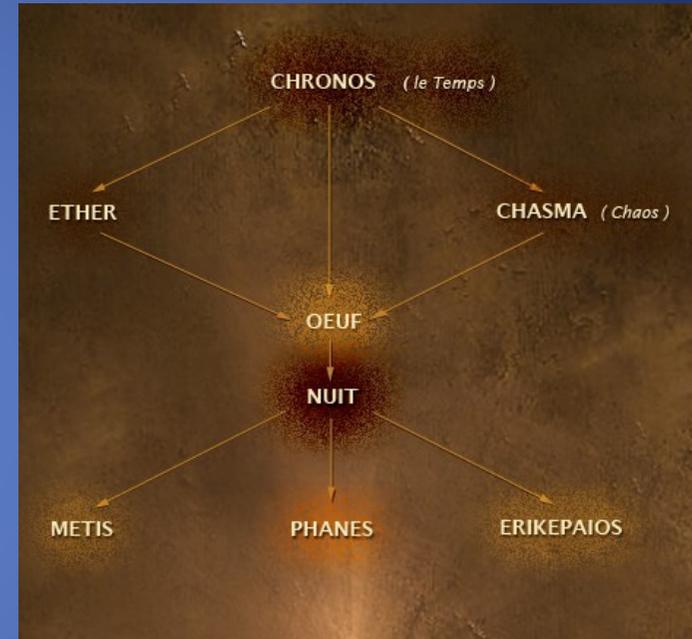


Versets 32 à 36 de la Sourate XXIV

La lumière joue toujours également un rôle majeur dans les *réécits cosmogoniques* élaborés par les différentes civilisations au fil du temps.

Par exemple, à côté de la cosmogonie traditionnelle d'Hésiode, on trouve dans la civilisation grecque une tradition inspirée des *réécits d'Orphée*, poète légendaire :

« Au commencement est Chronos, le Temps. Il engendre le Chaos (l'Infini) et l'Ether (le fini). Le Chaos est enveloppé de la Nuit. C'est sous l'action de l'Ether que s'organise lentement la matière cosmique. Celle-ci prend finalement la forme d'un œuf, dont la Nuit (Nyx) constitue la coquille. A l'intérieur de cet œuf gigantesque, dont la partie supérieure forme le ciel et la partie inférieure, la terre, naît le premier être, *Phanès, la Lumière*. S'unissant à la Nuit, il crée le Ciel et la Terre. Il engendre également Zeus »



Ainsi au commencement est Nyx, la Nuit ténébreuse, la Primordiale. Et dans cet abîme de noirceur, Nuit revêtit la forme d'un oiseau aux ailes sombres et déposa un *Œuf d'argent*, un Œuf « clair », non fécondé, dans le sein gigantesque des ténèbres.

Puis, sous l'action du Temps infini, l'Œuf se brisa, laissant surgir *Phanès* aux ailes d'or, un être extraordinaire, androgyne, d'une blancheur éclatante, et que l'on nomme aussi *Eros*, Protogonos ou Eriképaïos. Son nom de Phanès rappelle que ce fut *lui qui en premier éclaira le monde*, en révélant ce qui était dissimulé dans l'Œuf.

Un fragment du Poème de *Parménide d'Élée* philosophe grec présocratique :

« Mais puisque tout a été nommé Lumière ou Nuit, et que, suivant leurs puissances, tout se rapporte à l'une ou à l'autre, l'Univers est à la fois rempli par la Lumière et par la Nuit obscure ; elles sont égales et rien n'est en dehors d'elles ».

Αὐτὰρ ἐπειδὴ πάντα φάος καὶ νύξ ὀνόμασται
καὶ τὰ κατὰ σφετέρως δυνάμεις ἐπὶ τοῖσι τε καὶ τοῖς,
πάν πλέον ἐστὶν ὁμοῦ φάεος καὶ νυκτὸς ἀφάντου
ἴσων ἀμφοτέρων, ἐπεὶ οὐδετέρω μετὰ μηδέν.

« Rappelle toi que tout est ordre qui naît du Chaos pour parvenir à la lumière. Le tout est ordre et la lumière émerge du Chaos. »
(Tablette IX du Livre de Thot- Hermès Trismégiste)

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 »

« En bref, la lumière est la forme la plus raffinée de la matière »

Louis de Broglie (1892-1987), Prix Nobel de physique 1929

« ... il est un courrier, inimaginablement rapide, qui frappe ou quitte à chaque instant chaque point matériel, tendant au travers du Monde un prodigieux réseau de messages individuels entrecroisés et permettant par là en tous lieux une perception séparée de ces divers points, déterminant enfin par surcroît au sein de la Matière les réactions nécessaires à la Vie et à la Pensée.

Ce messenger subtil, cet Éveilleur, qui donne comme une âme à l'Univers, et découvre à nos yeux mortels un peu de la splendeur des Cieux et de la Terre, c'est la Lumière. »

Jean Perrin (1870-1942) Prix Nobel de physique 1926

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 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 Théories de la vision

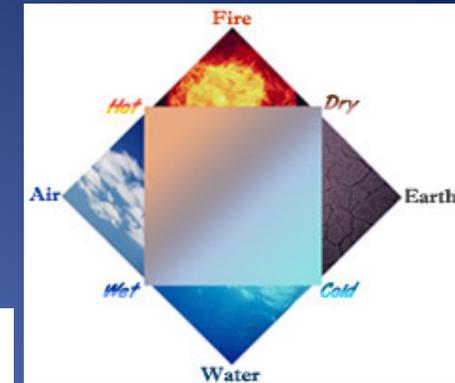
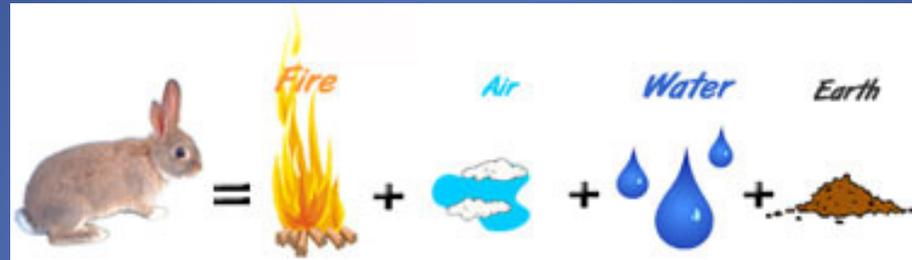
Selon la réponse à cette première question, on peut distinguer *trois types de théories antiques de la vision* : la *lumière* peut, en effet, avoir sa *source*

- ✓ *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).

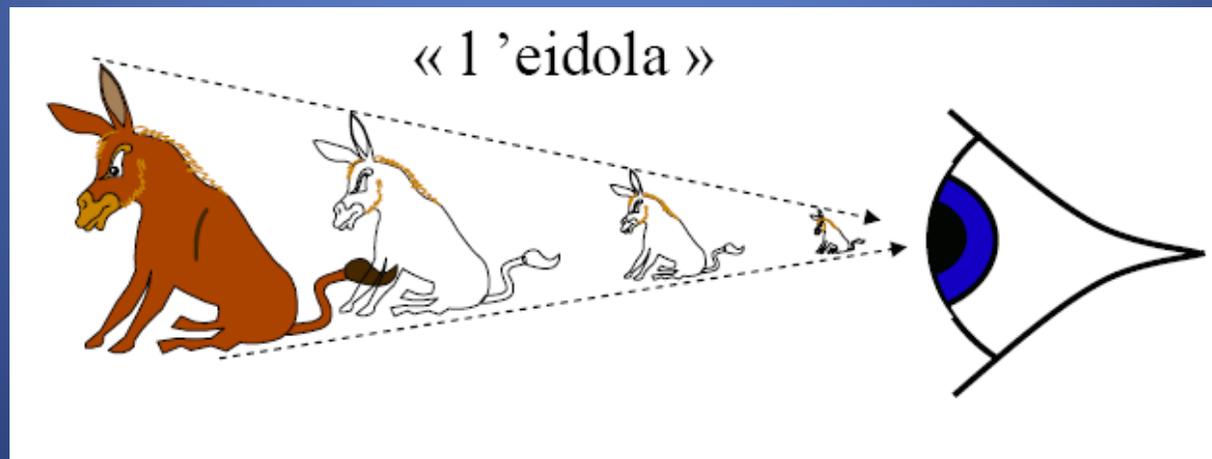
Notons que dans toutes ces conceptions, la *nature* continue ou discontinue de la lumière, son *mode de propagation* (mouvement spécifique d'un milieu ou émission de corpuscules) ne jouent qu'un *rôle très accessoire*.

2.1.1 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*.

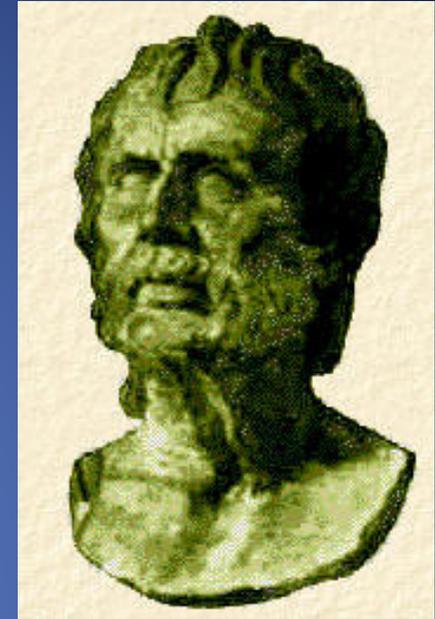
Le philosophe romain *Lucrèce* (98-55) reprend les *théories atomistes* de *Démocrite* (460-470) et d'*Epicure* (341-270).

Pour Lucrèce, 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.

Nous ne voyons pas les objets s'approcher de nous quand nous les percevons ; il faut au moins qu'ils envoient à notre âme quelque chose qui les représente, des images, eidola, espèces d'ombres ou de simulacres matériels qui enveloppent les corps, voltigent à leur surface et peuvent s'en détacher pour apporter à notre âme les formes, les couleurs et toutes les autres qualités des corps d'où ils émanent. (Lucrèce, De rerum natura)

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.



Lucrèce

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.

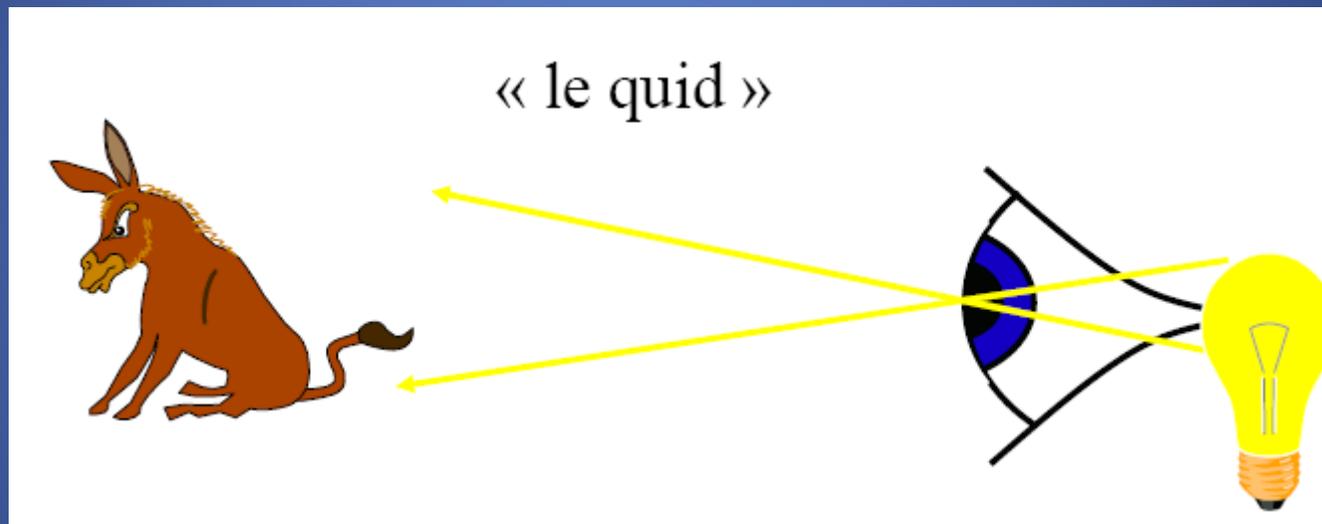
Quant au fait que l'on ne peut voir la nuit, Lucrèce invoque que :

*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).*

2.1.2 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*.



Les tenants de ce second courant, celui de l'émission, s'attachent à expliquer la vision comme *l'envoi à partir de l'œil d'une sorte d'entité invisible, un quid, dont la nature n'est jamais réellement explicitée*.

Si Hipparque, le compare à une « *main tendue* », Platon en fait le « *prolongement de l'âme* ».



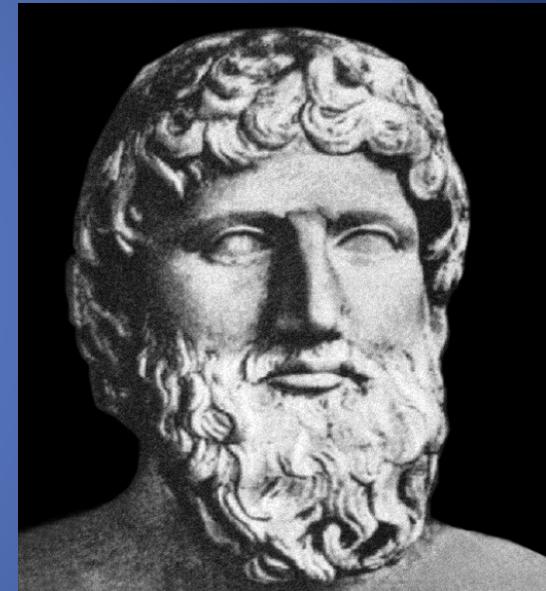
Gravure extraite de l'ouvrage du XVIII^{ème} siècle « *Oculus artificialis teledioptricus sive telescopium* » de Joannes Zahn qui pourrait illustrer la théorie du feu interne ou du feu externe.

2.1.3 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*).

2.2 Aristote et la théorie de la propagation

Aristote (384-322) expose sa théorie de la vision dans le traité *De l'Ame*. 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 la théorie du rayon visuel* ; il la rejette par un argument de bon sens :

« et si la vision était le résultat d'une émission de lumière sortant de l'œil comme d'une lanterne, pourquoi la vue ne s'exercerait-elle pas aussi dans l'obscurité ? ».

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 Raphaël.

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*.

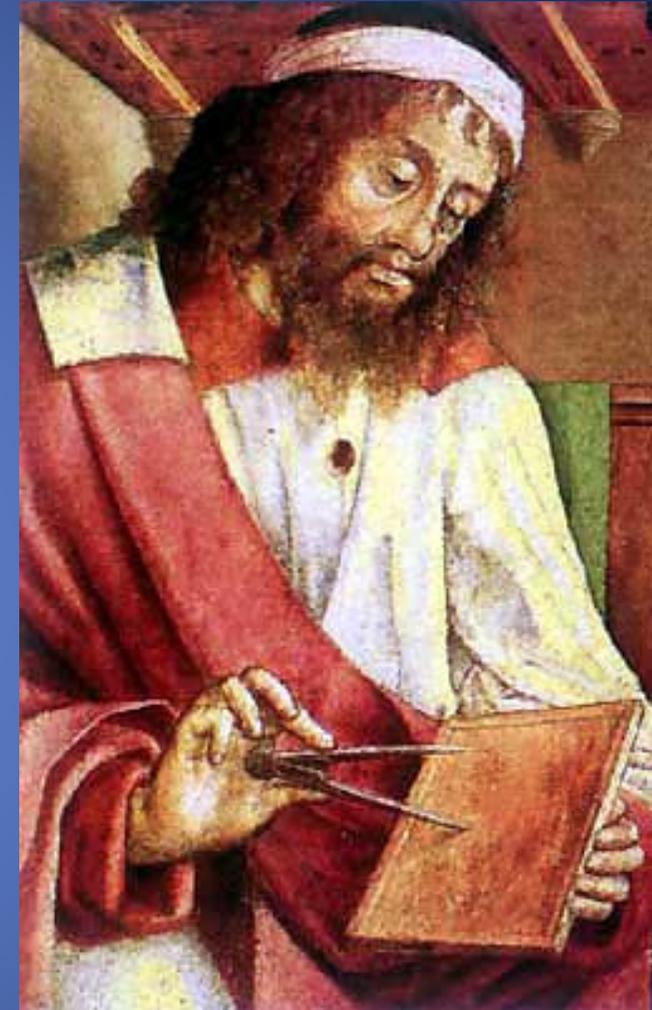
La « *mise en mouvement* » à la base de la vision constitue pour Aristote un « *ébranlement d'un milieu* » pour lequel on peut trouver l'*analogie pour le son et l'odeur*. Pour Aristote, qui compare les différents sens entre eux, la *vision se fait dans l'instant*, à la différence de l'ouïe et de l'odorat.

2.3 Euclide et la naissance de l'optique géométrique

Chez *Euclide* (III^{ème} Siècle avant J.-C.), 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 après J.-C.).



Euclide, peinture du XVIII^{ème} siècle.

Euclide géométrise l'optique : la lumière se propage *suivant des lignes droites*, au sens mathématique, sans épaisseur : les *rayons lumineux*.

Ce modèle mathématique fonde l'*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.

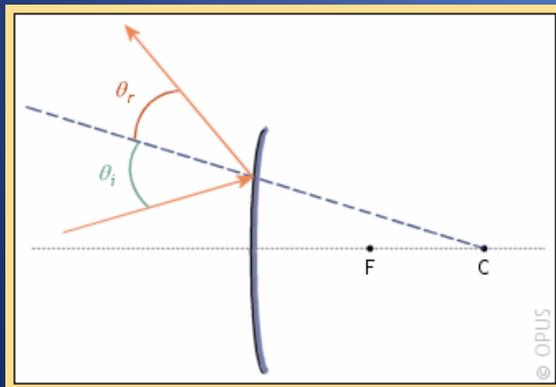
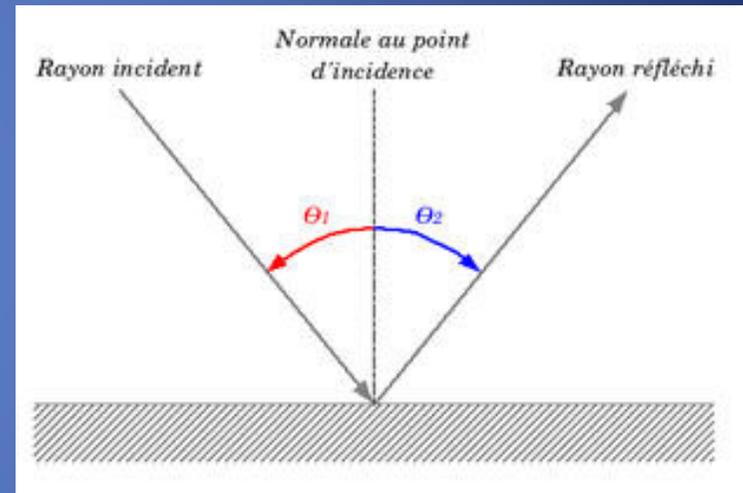


Quelles sont les propriétés de ces rayons ? Quel est leur sens de propagation ?

Euclide utilise parfois des rayons issus du Soleil, mais le plus souvent, les *rayons visuels divergent de l'œil* formant le *cône visuel* 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.*



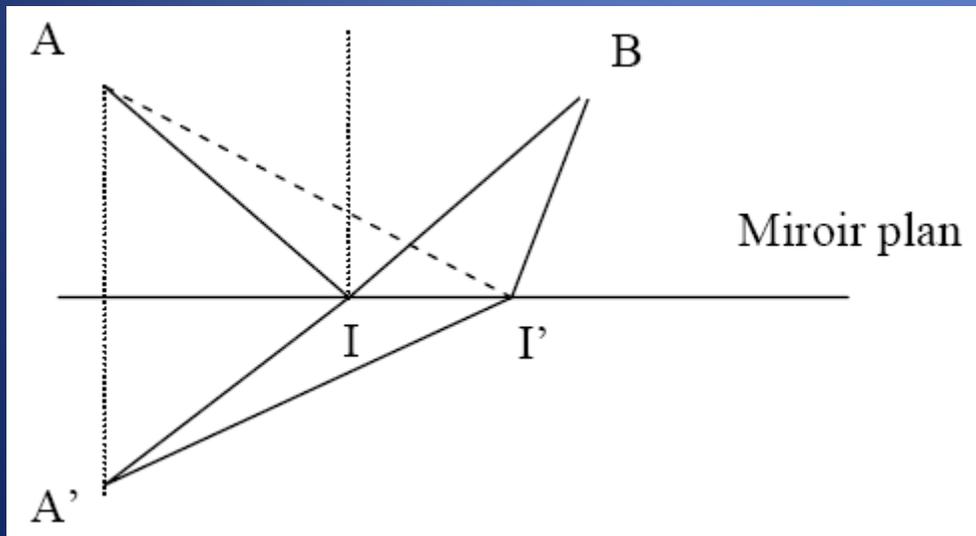
Ces lois sont généralisées à des miroirs convexes et concaves.

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

2.4 Héron d'Alexandrie : le plus court chemin

Héron d'Alexandrie (1^{er} siècle après J.C.) utilise la théorie du rayon visuel d'Euclide pour établir les *lois de la réflexion* sur la base d'un *principe général* : Héron d'Alexandrie a démontré dans son livre sur les miroirs, que *les droites brisées suivant des angles égaux sont les plus courtes de toutes celles qu'on peut mener d'un point à un autre* en les faisant se briser sur la même surface sous des angles divers.

Comme l'indique la figure ci-dessous, *le trajet AIB est plus court que n'importe quel chemin A'I'B, I' étant un point quelconque de la surface réfléchissante*. Pour le démontrer, il suffit de remarquer que le trajet A'I est égal au trajet AI, A' étant le symétrique de A par rapport au miroir. *La somme de deux côtés d'un triangle est toujours plus grande que son troisième côté, et ainsi A'IB (mesure du trajet suivi effectivement par la lumière) est plus court que A'I'B* (longueur de tout autre trajet possible, passant par un point I' différent de I).



Le raisonnement développé ici pour la réflexion de la lumière repose sur la *propagation rectiligne de la lumière*, qui *satisfait elle-même au principe de plus court chemin* : *le plus court chemin entre deux points, dans un milieu donné, est la droite.*

2.5 Galien et le rôle de l'œil

Des progrès scientifiques sensibles sont accomplis par le *médecin* grec *Claude 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*.



Statue de Galien dans le théâtre anatomique du palais de l'Archiginnasio, à Bologne.

2.6 Ptolémée et la mesure physique.

Aux alentours de 150 après J.-C., *Claude Ptolémée* accomplit un travail astronomique colossal, mettant en évidence la *précession des équinoxes*.

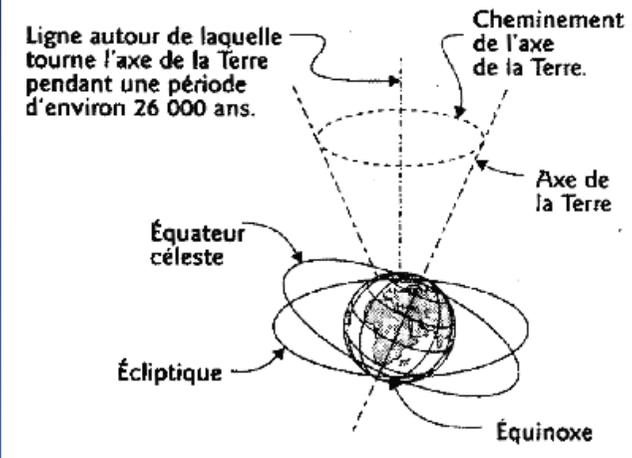
Dans le domaine de l'optique, il réalise un dispositif expérimental qui lui permet de mener une *étude systématique de la réfraction*.

Il peut ainsi noter la *valeur de l'angle de réfraction pour un angle d'incidence et un milieu donnés*.

Les valeurs données par Ptolémée sont *fiabiles à moins d'un demi-degré près en général*.

Ptolémée pensait que la *loi* reliant les angles d'incidence et de réfraction était *d'un type parabolique* ($r = a \cdot i - b \cdot i^2$ où a et b sont des constantes pour un dioptré donné) et ses mesures se trouvent de fait sur une *parabole*. Etonnamment, *Ptolémée connaissait les tables de sinus*.

Ptolémée étend le *cône visuel discret d'Euclide* en un *cône continu*.



1	Air-Eau		Air-Verre		Eau-Verre	
	2	3	4	5	6	7
i	r	$i - r$	r	$i - r$	r	$i - r$
0°	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'
10	8,0	2,0	7,0	3,0	9,30	0,30
20	15,30	4,30	13,30	6,30	18,30	1,30
30	22,30	7,30	19,30	10,30	27,0	3,0
40	29,0	11,0	25,0	15,0	35,0	5,0
50	35,0	15,0	30,0	20,0	42,30	7,30
60	40,30	19,30	34,30	25,30	49,30	10,30
70	45,30	24,30	38,30	31,30	56,0	14,0
80	50,0	30,0	42,0	38,0	62,0	18,0

3 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.

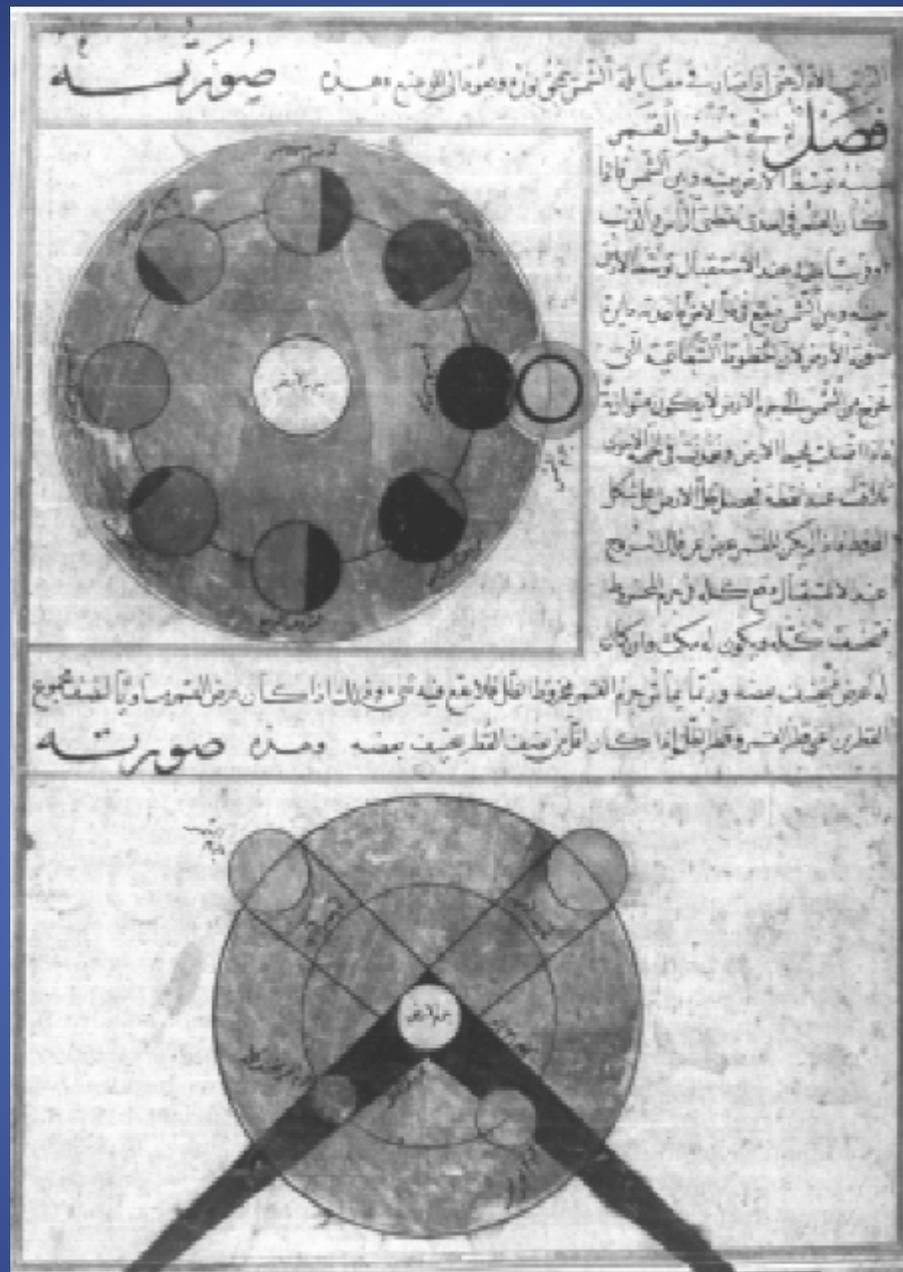
Al-Kindi dote les rayons lumineux d'une *extension transversale*. Il crée ainsi une optique des *faisceaux* lumineux.

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*.



Timbre émis par l'Iraq en 1962 représentant al Kindi



Manuscrit arabe du XIV^{ème} siècle, présentant les phases de la Lune et la théorie des éclipses.

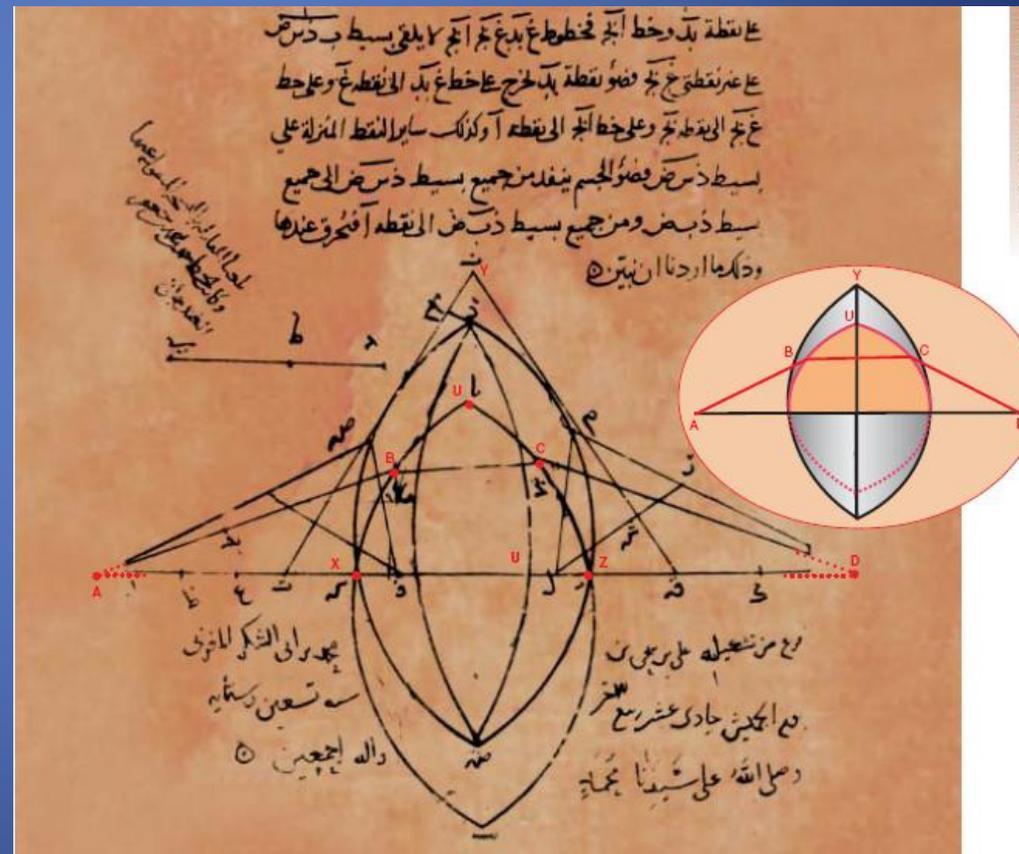
3.1 Ibn Sahl et la loi de la réfraction

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 (et donc se *réfracte*).

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





*Utilisation du soleil pour défendre la ville de Syracuse contre le siège romain,
extrait du Thesaurus opticus d'Alhazen*

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.

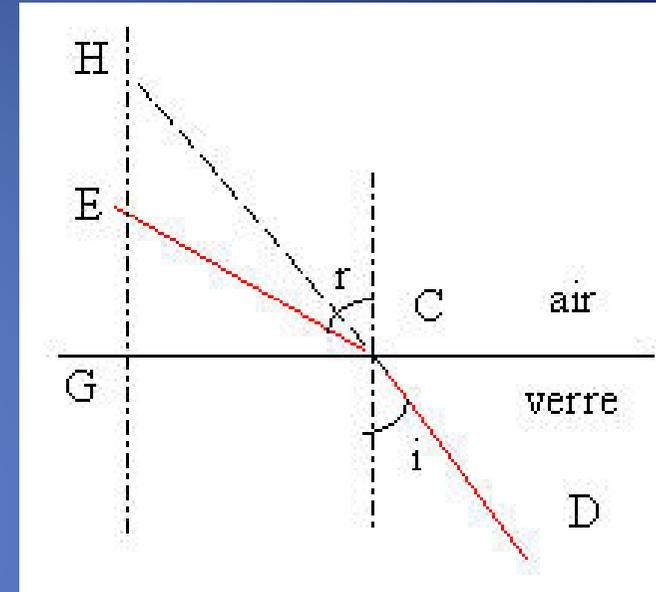
Si on change de rayon incident DC, les points H et E changent aussi, mais Ibn Sahl écrit que *le rapport CH/CE est constant pour deux milieux donnés*.

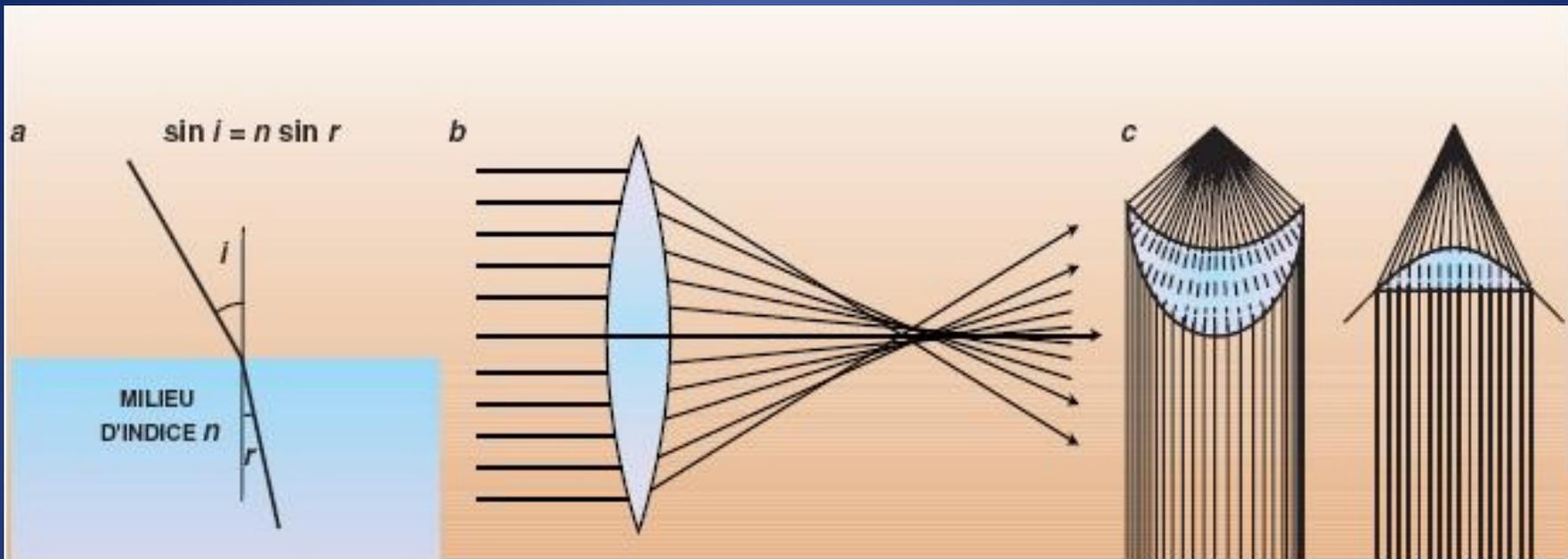
Comme on a évidemment :

$$\sin i = \frac{GC}{CH} \quad \text{et} \quad \sin r = \frac{GC}{CE}$$

cette constatation d'Ibn Sahl est *équivalente à la loi de Snell-Descartes de la réfraction*.

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*.





3. Au X^e siècle, Ibn Sahl formula la loi de la réfraction (la déviation d'un rayon lumineux qui passe d'un milieu transparent dans un autre) telle que nous la connaissons aujourd'hui (*a*). Avec cette loi, il détermina la forme des anaclastiques, c'est-à-dire les surfaces des lentilles qui concen-

trent tous les rayons incidents en un point unique. En Europe, où ce savoir avait été perdu, Kepler remarqua que ce n'est pas le cas du cercle (*b*), mais échoua à découvrir les anaclastiques. Descartes les publia finalement dans son *Discours de la méthode* en 1637 (*c*).

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

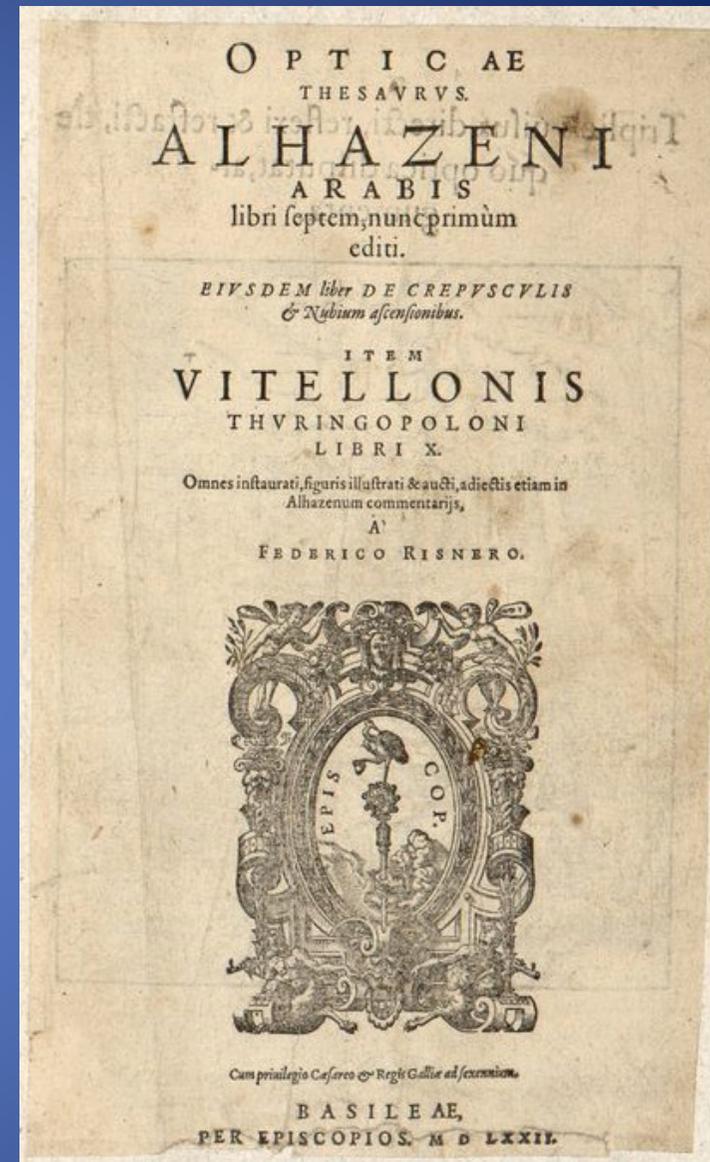
Ibn Al-Haytham (965-1039) (dit *Alhazen* en Occident) apporte quant à lui une *contribution majeure à l'optique*, dans son *Traité d'Optique*.

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 *formes* 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*.

théorie de la vision
et du rayon lumineux D'IBN AL-HAYTHAM

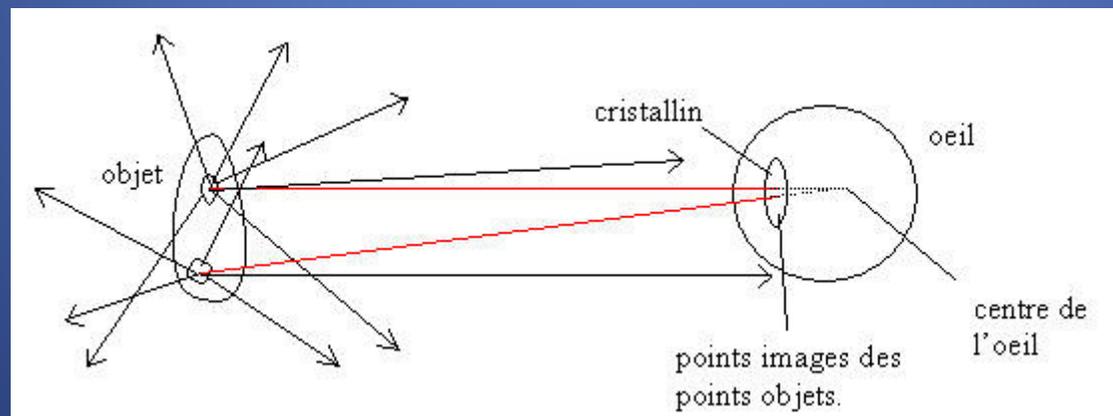


http://www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/minisites/projet_islam/elevs/anim_vision.swf

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 assurent 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 ».



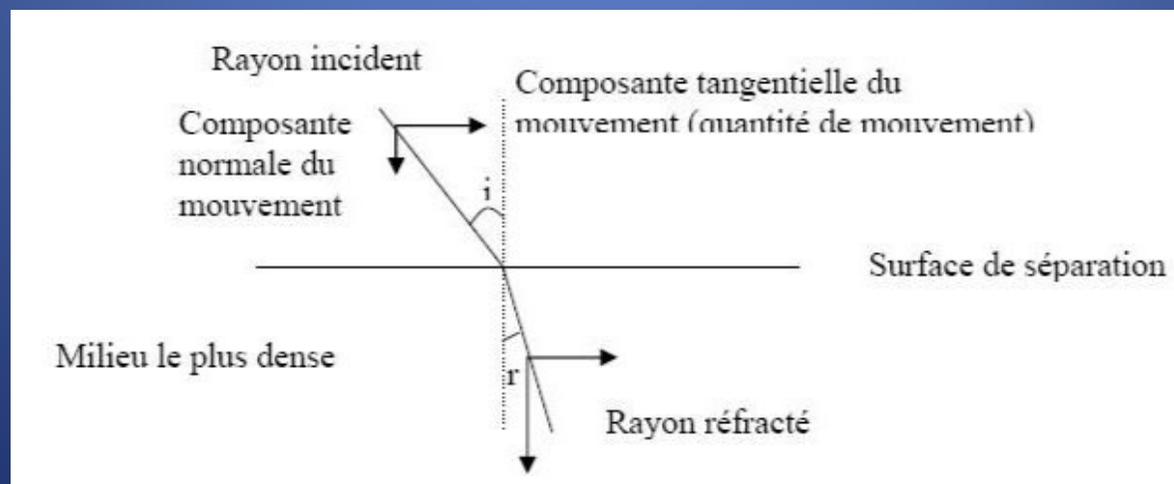
Chaque élément de la source émet de la lumière dans toute les directions en lignes droites. Les *rayons perpendiculaires à la surface de l'œil* (en rouge) *ont plus de « force »*, pour Al-Haytham, et forment l'image de l'objet dans le cristallin, organe de la vision.

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 d'arrivée 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.



4 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) surnommé *Doctor mirabilis* (« Docteur admirable ») en raison de sa science prodigieuse ; 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*.

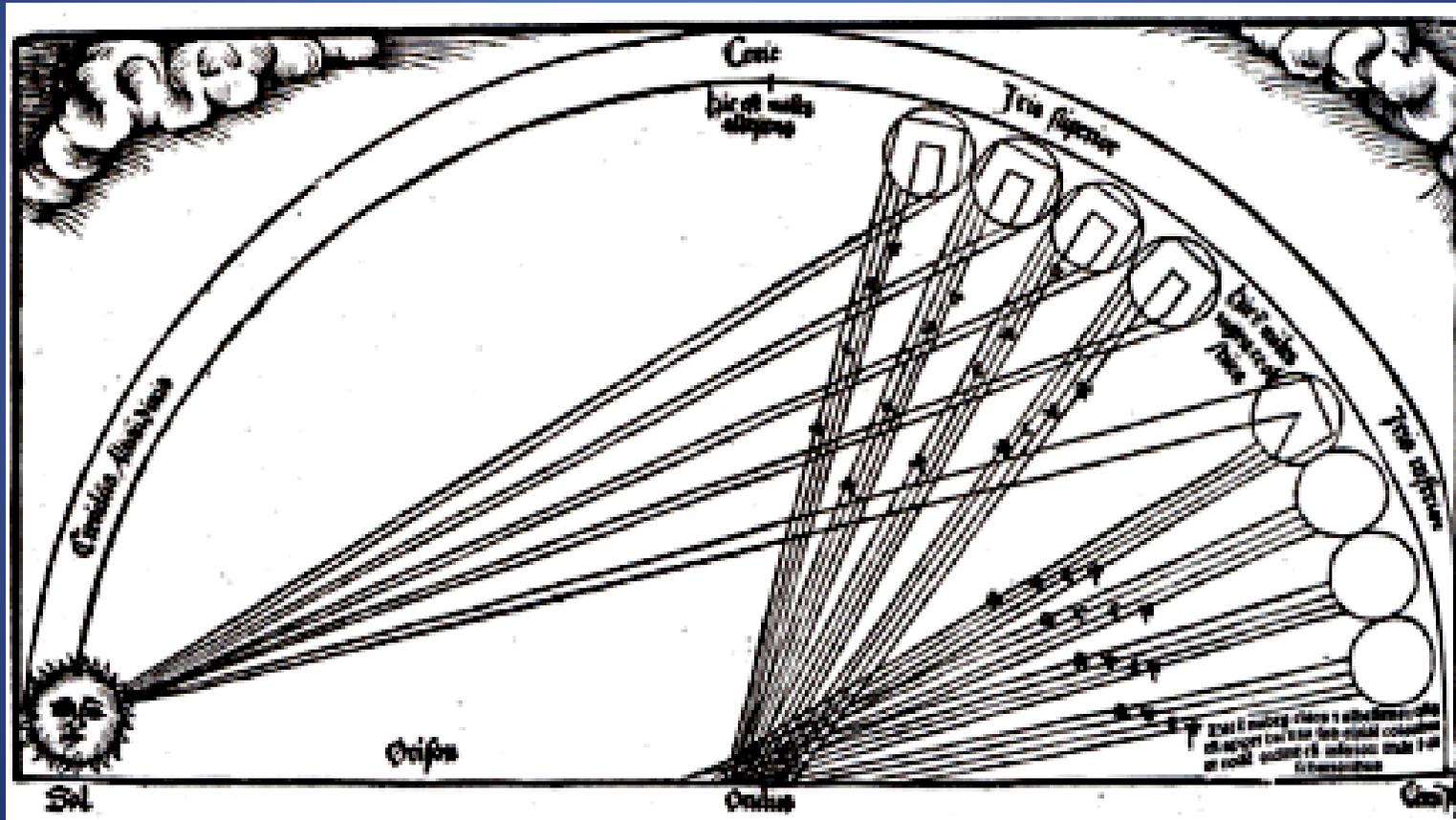
Contrairement à Démocrite, qui suggère que la vision est possible dans le vide, la théorie des espèces de Bacon, inspirée d'Aristote, est une *théorie des milieux*. Ses espèces peuvent être assimilées à des « *ondes* » *se propageant dans un milieu*.

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.

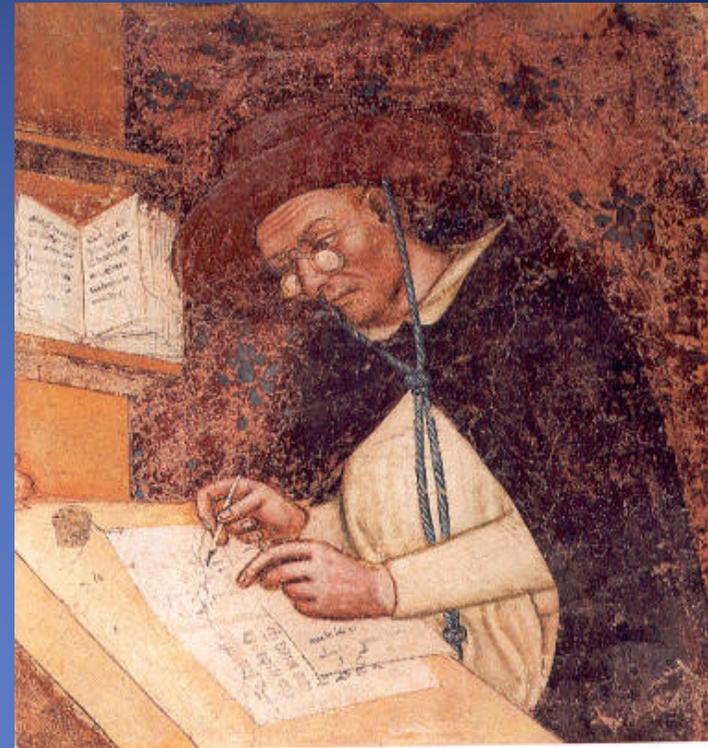
Le moine polonais *Witelo* (1220-1275) publie des *tables d'angles de réfraction en fonction de l'angle d'incidence* dans *différents milieux*.

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

*Portrait du dominicain Hugues de Saint-Cher,
par Thomas de Modène, 1352*



*Gravure de Dürer pour le livre « la Nef des fous » de
Sébastien Brant , Bâle 1494*

*Les lunettes correctrices de la vision ont été inventées en Italie
dès le XI^{ème} siècle.*