

*Les Échanges en Méditerranée en Science et en Philosophie*  
*L'exemple de l'optique ancienne et classique*

Dans le temps qui m'est imparti, je me propose de parler de la Méditerranée comme lieu d'échanges entre toutes les civilisations de l'ancien monde, celles qui encerclent ses rives, et celles qui s'en éloignent. Pour éviter les débats de nature idéologique qui souvent trahissent l'histoire des faits et des idées par un regard oblique, j'ai pensé emprunter un exemple à l'histoire d'une science. Pour cela, j'ai choisi la science physique la plus ancienne, la première mathématisée et la plus mûre, je veux dire l'optique. C'est en effet autour de la Méditerranée que l'optique s'est développée dans ses périodes anciennes et classiques, autour de cette mer qui s'offre comme un lieu, un *topos* au sens aristotélicien. Pour illustrer cette situation, quittons le terrain miné des métaphores et examinons brièvement la situation de l'historien avant de revenir à la science elle-même.

Si par exemple, de nos jours, un historien veut étudier les débuts de l'optique hellénistique, il ne manquera pas de rencontrer l'œuvre de Dioclès sur les miroirs ardents, au second siècle avant notre ère. Sa recherche exigera donc l'examen de la compilation arabe, au IX<sup>e</sup> siècle à Bagdad, de cette œuvre, la seule qui ait survécu. Si maintenant il s'attache à une période plus tardive de l'optique hellénistique, il devra consacrer la majeure partie de ses efforts à l'étude de la contribution capitale que l'on attribue à Ptolémée (II<sup>e</sup> siècle). Il lui faudra cette fois se satisfaire de la traduction latine faite au XII<sup>e</sup> siècle par l'émir Eugène de Sicile, à partir de la version arabe, elle-même faite à partir du texte grec, au IX<sup>e</sup> siècle : les deux textes, grec et arabe, sont en effet perdus. Supposons enfin que notre

historien ne s'intéresse qu'à la seule optique arabe, et qu'il soit suffisamment désinvolte pour négliger les sources grecques et les traductions arabes de celles-ci, il ne pourra cependant pas faire l'économie des traductions latines et hébraïques issues de l'arabe. Nous savons que l'un des premiers travaux en optique arabe est l'œuvre du philosophe Abū Ishāq al-Kindī. De son livre sur l'optique, il ne nous reste que la traduction latine, qui fut une référence essentielle aussi bien pour Robert Grosseteste que pour Roger Bacon et John Pecham, c'est-à-dire pour les auteurs latins à partir du XII<sup>e</sup> siècle. Mais, s'il étudie un chapitre particulier de l'optique arabe, comme celui consacré aux phénomènes atmosphériques, il rencontrera inévitablement le livre de l'Andalou Ibn Mu'ādh, *De Crepusculis*, qui n'existe que dans ses traductions latine et hébraïque – l'original arabe était perdu.

Il serait facile de multiplier de tels exemples, non seulement en optique mais dans toutes les disciplines mathématiques et philosophiques, qui tous désignent une situation spécifique, aussi bien dans le temps que dans l'espace. Si, en effet, on le compare à l'historien de l'optique d'une époque plus tardive, telle le XVIII<sup>e</sup> siècle, ou à un historien de l'optique dans une autre ère culturelle – la Chine par exemple –, l'historien des sciences et des mathématiques dans les cultures méditerranéennes, jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle, doit suivre une démarche plus contournée. Il lui faut sans répit parcourir tous les lieux ; jamais il ne peut s'appuyer sur un point fixe ; il doit rejeter, au risque de manquer totalement son objet, toute tentation de culturocentrisme et d'histoire linéaire. Mais cette condition propre à notre historien n'est, en fait, que le reflet des méandres de la constitution et de la diffusion de l'optique elle-même. Arrêtons-nous donc à l'élaboration de

cette science, et, au lieu des recherches de l'historien d'aujourd'hui, considérons le parcours du savant d'hier.

La recherche optique dans l'antiquité grecque et hellénistique se répartit essentiellement en cinq chapitres, qui parfois se superposent ou se chevauchent : l'optique au sens propre, c'est-à-dire l'étude géométrique de la perception de l'espace et des illusions de perspective ; la catoptrique, c'est-à-dire l'étude géométrique de la réflexion des rayons visuels sur les miroirs ; les miroirs ardents, étude de la réflexion convergente des rayons solaires sur les miroirs ; les phénomènes atmosphériques comme le halo et l'arc-en-ciel ; et enfin l'étude de la vision par les philosophes et les médecins. Dans les chapitres où l'on traite en même temps de la propagation de la lumière et de la vision, dominait la doctrine du « rayon visuel » : il s'agit d'un faisceau divergent, émis par l'œil, c'est-à-dire un cône dont le sommet est l'œil, et dont les arêtes sont les rayons visuels qui se propagent en ligne droite et vont parcourir les objets qui leur font obstacle. Selon cette doctrine, voir, c'est éclairer, et les conditions de la propagation sont celles de la vision. Chacune des deux problématiques – propagation et vision – renvoie immédiatement à l'autre ; or c'est précisément sur ce double mouvement de renvoi qu'ont reposé les conditions de possibilité de l'ancienne optique, mais aussi ses limites et les obstacles à son développement.

Cette doctrine du rayon visuel, selon laquelle la vision est conçue comme un acte tactile, une palpation à distance, a été développée dans le livre de l'*Optique* attribué à Euclide (actif vers 300 av. J. C.), et a trouvé sa formulation quasi-définitive dans l'*Optique* attribuée à Cl. Ptolémée (90-168 environ). Cette doctrine domine l'optique jusqu'à la fin du X<sup>e</sup> siècle, et

même plus tard. En ce sens, l'optique n'est qu'une géométrie de la perception, une géométrie du regard. Son thème principal est celui de la variation de la grandeur du visible en rapport avec la variation de sa distance de l'œil source, ou, mieux encore, de l'œil phare, et en rapport avec sa position parmi les autres objets. Dans cette optique, on se préoccupe principalement de l'objet visible, non pas comme tel, mais on s'intéresse uniquement à la question de savoir comment il apparaît à l'œil. C'est en quelque sorte une géométrie de l'apparence, où lumière et vision n'ont pas de statuts ontologiques distincts.

Dans cette *Optique*, l'œil est un phare, sommet d'un cône de rayons visuels qui éclairent les objets, et ce sont les angles et les directions de ces rayons qui déterminent l'apparence des visibles.

C'est sur cette base euclidienne qu'une science géométrisée de l'optique se constitue et trouve sa forme la plus accomplie dans l'*Optique* de Ptolémée.

C'est donc cette optique comme géométrie du regard qui fut transmise en arabe, avec la plupart des travaux grecs et hellénistiques sur les miroirs ardents, sur l'optique météorologique, ainsi que les écrits des philosophes et médecins. Cette dépendance de l'optique grecque et hellénistique et, pourrait-on même dire, d'elle seule, n'a cependant pas entravé l'émergence relativement précoce d'une recherche novatrice. Très rapidement en effet, après la transmission massive des écrits grecs, l'histoire de la discipline est devenue celle de la rectification de ces écrits, de l'accumulation de nouveaux résultats, et du renouvellement des principaux chapitres. Deux siècles ont suffi pour préparer ce qui, finalement, fut une véritable révolution, qui marquera à jamais l'histoire de l'optique, voire, plus

généralement, celle de la physique. C'est ce mouvement dialectique entre une solide continuité et une profonde rupture que je voudrais maintenant esquisser.

À la réception de l'*Optique* d'Euclide ainsi que de l'écrit d'Anthémius de Tralles sur les *Miroirs ardents*, le philosophe et savant du milieu du IX<sup>e</sup> siècle al-Kindī rédige plusieurs mémoires dans les diverses branches de l'optique. Ainsi, à la suite d'Euclide, il se donne expressément pour tâche « d'exposer l'enseignement des anciens », « de développer ce qu'ils ont commencé », et de rectifier les erreurs commises. Ainsi, dans son livre perdu en arabe mais conservé en dans sa traduction latine, le *De Aspectibus*, il veut démontrer ce qu'Euclide a seulement postulé. En effet, un quart du *De Aspectibus* est destiné à justifier la propagation rectiligne des rayons lumineux, à l'aide des considérations géométriques sur les ombres, et le passage de la lumière à travers les fentes. Une fois établie la propagation rectiligne, al-Kindī revient à la théorie de la vision. Il commence par rappeler et critiquer les principales doctrines connues depuis l'antiquité, pour finalement adopter celle de l'émission. Il n'admet cependant pas la doctrine euclidienne sans lui apporter de sérieux amendements. Le cône visuel, selon lui, et à la différence de ce que soutient Euclide, ne sera plus formé de rayons discrets, mais se présentera comme le volume de radiations continues. Cet amendement tient son importance de l'idée qui la fonde : celle de *rayon*. Al-Kindī écarte une conception purement géométrique du rayon : les rayons ne sont pas des droites géométriques, mais des impressions produites par des corps à trois dimensions.

Cette critique du concept de rayon, en elle-même importante, prépare en quelque sorte un pas fondamental qui sera franchi un siècle et demi plus tard environ par Ibn al-Haytham (mort après 1040) : la séparation entre la lumière et la droite suivant laquelle elle se propage. Mais al-Kindī doit encore expliquer la diversité de la perception selon les différentes régions du cône. Il se démarque à cette occasion à la fois de la position d'Euclide et de celle de Ptolémée, en supposant que de tout point de l'œil sort un cône visuel.

Al-Kindī étudie ensuite la réflexion des rayons visuels sur différents types de miroirs. Il consacre en outre tout un livre aux miroirs ardents. Ici également, ce livre se situe à la fois dans la continuité des savants anciens, et contre eux. Al-Kindī entend en effet remédier aux insuffisances de l'étude du savant byzantin du VI<sup>e</sup> siècle, l'architecte de Sainte Sophie, Anthémios de Tralles, qu'il complète. Celui-ci n'a-t-il pas pris pour une vérité incontestable la légende selon laquelle Archimède aurait incendié la flotte romaine, sans même démontrer que c'était possible ?

Un des résultats importants de cette recherche qui traite de la propagation et de la focalisation de la lumière est, qu'à la suite d'al-Kindī, aucun savant de renommée en optique ne négligera d'inclure l'étude des miroirs ardents dans son programme de recherche. Tel est au moins le cas pour les deux auteurs les plus importants : Ibn Sahl et Ibn al-Haytham. Il s'agit donc bien là d'un chapitre central de l'optique, et non plus, comme dans l'antiquité, d'une spécialité à part. Nous verrons du reste que cette étude mènera précisément, au X<sup>e</sup> siècle, à l'inauguration d'un nouveau chapitre : la théorie géométrique des lentilles ; et, avec Ibn Sahl, vers 980, à

l'anaclastique, une théorie que, jusqu'à une date récente, on attribuait à Descartes, Barrow et Snell.

Avant Ibn Sahl, les catoptriciens s'interrogeaient sur les propriétés géométriques des miroirs, et sur l'embrasement qu'ils produisent à une distance donnée. Tel est en somme le problème que se posaient Dioclès, Anthémius de Tralles et al-Kindī. Ibn Sahl modifie d'emblée la question, en considérant non plus seulement les miroirs, mais les instruments, ardents, c'est-à-dire ceux qui sont susceptibles d'embraser non seulement par réflexion, mais aussi par réfraction. Ibn Sahl étudie alors successivement, selon la distance de la source – finie ou infinie – et le mode d'embrasement - réflexion ou réfraction : le miroir parabolique, le miroir ellipsoïdal, la lentille plan-convexe et la lentille biconvexe. Dans chacune de ces sections, il procède à une étude théorique de la courbe, puis expose un procédé mécanique pour la tracer. Pour la lentille plan-convexe, par exemple, il commence par étudier l'hyperbole comme section conique, puis procède au tracé continu d'un arc d'hyperbole, pour ensuite reprendre l'étude du plan tangent à la surface engendrée par la rotation de cet arc autour d'une droite fixe, et enfin retrouver les lois de la réfraction. Mais, si l'on veut comprendre l'étude des lentilles par Ibn Sahl, il convient de déterminer auparavant la connaissance qu'il avait de la réfraction.

Dans un autre mémoire, qui a survécu, intitulé *Preuve que la sphère céleste n'est pas d'une transparence extrême*, Ibn Sahl applique à l'étude de la réfraction des concepts déjà présents chez Ptolémée. Mais dans cette étude la notion de milieu tient une place importante. Ibn Sahl montre que tout milieu – y compris la sphère céleste – est doté d'une certaine opacité qui le définit. Mais – et c'est là sa véritable découverte – Ibn Sahl

caractérise le milieu par un certain rapport, ce qu'il fait dans son traité *sur les Instruments ardents*. C'est précisément ce concept de rapport constant, caractéristique du milieu, qui est la pièce maîtresse de son étude de la réfraction dans les lentilles.

Ibn Sahl avait conçu et constitué un domaine de recherche sur les instruments ardents et, peut-on dire, la dioptrique de surcroît. Mais, obligé à penser d'autres coniques que la parabole et l'ellipse – l'hyperbole par exemple – comme courbe anacoustique, il a été tout naturellement conduit à la découverte de la loi des sinus, attribuée, nous l'avons dit, à Snell, Descartes et Barrow. On comprend dès lors que la dioptrique, lorsqu'elle voit le jour avec Ibn Sahl, ne traite que de ce qui touche à la propagation de la lumière, indépendamment des problèmes de la vision. L'œil n'y a pas sa place au sein des instruments ardents, non plus du reste que le sujet de la vision. C'est donc un point de vue objectif qui est délibérément adopté dans l'analyse du phénomène lumineux.

Avec Ibn Sahl, nous sommes à la veille d'une des premières révolutions en optique, sinon en physique. C'est en effet une génération à peine après Ibn Sahl qu'Ibn al-Haytham (que les latins ont appelé Alhazen) engage ses travaux. Rappelons pour mémoire que c'est de cette révolution que l'UNESCO et les Nations Unies ont célébré le millénaire en 2015, d'après la date de l'un des écrits d'Ibn al-Haytham.

Comparée aux écrits des mathématiciens grecs et arabes qui le précèdent, l'œuvre optique d'Ibn al-Haytham présente au premier regard deux traits frappants : l'extension et la réforme. On conclura d'un examen plus attentif que le premier trait est la trace matérielle du second. Personne en effet, avant Ibn al-Haytham, n'a embrassé dans sa recherche autant de



domaines, relevant de traditions diverses : philosophiques, mathématiques, médicales. Les titres de ses livres sont du reste là pour illustrer ce large spectre : *La Lumière de la lune*, *La Lumière des astres*, *L'Arc-en-ciel et le halo*, *Les Miroirs ardents sphériques*, *Les Miroirs ardents paraboliques*, *La Sphère ardente*, *La Forme de l'éclipse*, *La Qualité des ombres*, *Le Discours de la lumière*, ainsi que son magistral *Livre de l'Optique* traduit en latin au XII<sup>e</sup> siècle sous le titre *Opticae Thesaurus Alhazeni*, étudié et commenté en arabe et en latin jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle. Le *Livre de l'Optique* a en effet été étudié au XIII<sup>e</sup> siècle par Vitello, polonais vivant en Italie, au XIV<sup>e</sup> siècle par Dietrich de Fribourg, au XVI<sup>e</sup> siècle par Maurolico, en Italie, et ensuite par Kepler, Fermat et Descartes. Ibn al-Haytham a donc abordé non seulement les thèmes traditionnels de la recherche optique, mais aussi d'autres, nouveaux, pour enfin couvrir les domaines suivants : optique, optique météorologique, catoptrique, miroirs ardents, dioptrique, sphère ardente, optique physique.

Un regard plus minutieux révèle que, dans la plupart de ces écrits, Ibn al-Haytham poursuit la réalisation d'un programme de réforme de la discipline, qui l'a précisément amené à reprendre tour à tour les différents problèmes. L'acte fondateur de cette réforme consistait à faire clairement le départ, pour la première fois dans l'histoire de l'optique, entre les conditions de la propagation de la lumière et les conditions de la vision des objets. Elle a conduit d'une part à doter d'un support physique les règles de la propagation – il s'agit d'une analogie mathématiquement assurée entre un modèle mécanique du mouvement d'une balle solide lancée contre un obstacle, et celui de la lumière – et, d'autre part, à partout procéder géométriquement, par observation et expérimentation. L'optique n'a plus le

sens qu'elle revêtait naguère : une géométrie de la perception. Elle comprend désormais deux parties : une théorie de la vision, à laquelle sont également associées une physiologie de l'œil et une psychologie de la perception, et une théorie de la lumière, à laquelle sont liées une optique géométrique et une optique physique. Cette réforme a abouti, entre autres, à l'émergence de problèmes neufs, jamais posés auparavant, tels le célèbre problème d'Alhazen en catoptrique, l'examen de la lentille sphérique et du dioptré sphérique, non seulement en tant qu'instruments ardents, mais comme instruments optiques, en dioptrique ; et au contrôle expérimental, aussi bien comme pratique d'investigation que comme norme de la preuve en optique, et plus généralement en physique.

Les trois livres de l'*Optique* – du quatrième au sixième – traitent de la catoptrique. Or ce domaine, aussi ancien que la discipline elle-même, amplement étudié par Ptolémée dans son *Optique*, n'a jamais cependant été l'objet d'une étude aussi extensive que celle d'Ibn al-Haytham. Outre les trois volumineux livres de son *Optique*, Ibn al-Haytham lui consacre d'autres mémoires qui les complètent, à l'occasion de problèmes connexes, comme celui des miroirs ardents. La recherche catoptrique d'Ibn al-Haytham se distingue, entre autres traits, par l'introduction de notions physiques, à la fois pour expliquer des notions connues, et pour saisir de nouveaux phénomènes. C'est au cours de cette étude qu'Ibn al-Haytham se pose de nouvelles questions, comme le problème qui précisément porte son nom : deux points quelconques devant un miroir étant donnés, comment déterminer sur la surface du miroir considéré un point tel que la droite qui joint ce point à l'un des deux points donnés soit le support du rayon incident, alors que la droite qui joint ce point à l'autre point donné est le

support du rayon réfléchi. Ce problème, qui ne tarde pas à se compliquer, a donc été résolu par Ibn al-Haytham, et à sa suite par Huygens, Sluse et Barrow.

Le septième et dernier livre de l'*Optique* d'Ibn al-Haytham est consacré à la *dioptrique*. De même qu'il l'a fait pour la catoptrique, Ibn al-Haytham insère dans ce livre les éléments d'une explication physique – mécanique – de la réfraction. Par ailleurs, son livre se trouve complété par des mémoires, tel que son traité sur la sphère ardente, ou même son *Discours de la lumière*, où il revient sur la notion de milieu, prenant la suite d'Ibn Sahl.

Dans ce septième livre de l'*Optique*, Ibn al-Haytham commence par s'appuyer sur deux lois qualitatives de la réfraction, et sur plusieurs règles quantitatives, toutes contrôlées expérimentalement à l'aide d'un appareil qu'il conçoit et qu'il fabrique comme dans le cas précédent. Les deux lois qualitatives connues de ses prédécesseurs, Ptolémée et Ibn Sahl, peuvent ainsi s'énoncer : (1) le rayon incident, la normale au point de réfraction et le rayon réfracté sont dans un même plan ; le rayon réfracté s'approche de la normale, si la lumière passe du milieu moins réfringent au milieu réfringent ; (2) le principe du retour inverse.

Ibn al-Haytham consacre une partie substantielle du septième livre à l'étude de l'image d'un objet par réfraction, notamment si la surface de séparation des deux milieux est ou plane ou sphérique. C'est au cours de cette étude qu'il s'arrête au dioptre sphérique et à la lentille sphérique, poursuivant ainsi en quelque sorte la recherche d'Ibn Sahl, mais en la modifiant profondément ; cette étude du dioptre et de la lentille figure en

effet dans ce chapitre consacré au problème de l'image, et n'est pas séparée du problème de la vision. Pour le dioptré, Ibn al-Haytham considère deux cas de figure, selon que la source – ponctuelle et à distance finie – se trouve du côté de la concavité ou du côté de la convexité de la surface sphérique du dioptré.

Ibn al-Haytham étudie ensuite la lentille sphérique, en portant un intérêt particulier à l'image qu'elle donne d'un objet. Dans son traité sur *La Sphère ardente*, l'un des sommets de la recherche en optique classique, Ibn al-Haytham explicite et affine certains résultats sur la lentille sphérique qu'il avait déjà obtenus dans *l'Optique*. Il y revient d'autre part sur la question de l'embrassement au moyen de cette lentille. Or c'est dans ce traité que nous rencontrons la première étude délibérée de l'aberration sphérique pour les rayons parallèles tombant sur une sphère de verre et subissant deux réfractions.

Mais déjà l'expérimentation est une catégorie de la preuve en optique. Celle-ci a changé de sens pour devenir une science des phénomènes lumineux. Ce n'est plus une discipline psychologique, mais physique. Ni la réflexion, ni la réfraction, ne peuvent être tenues exclusivement comme des causes de l'erreur. Dans l'optique des anciens, celle du rayon visuel, l'image est à proprement parler un mirage, n'ayant, en l'absence de celui qui regarde, aucune existence objective, aucune raison d'être. Chez Ibn al-Haytham, au contraire, l'image acquiert un statut objectif. Cet ancrage physique et matériel de l'optique, avec les conditions épistémiques pour le réaliser, va être consolidé par les successeurs d'Ibn al-Haytham, en arabe et en latin, et surtout avec ses lecteurs du XVII<sup>e</sup> siècle : Kepler, Descartes, Huygens, principalement.

Euclide, Dioclès, Ptolémée, Al-Kindi, Ibn Sahl, Ibn al-Haytham, voilà les phares qui éclairent l'histoire de l'optique au long des siècles, autour de ce topos méditerranéen. Le développement ultérieur de la discipline, au XVII<sup>e</sup> et au XVIII<sup>e</sup> siècle, et même plus tard, ne peut se comprendre si on l'isole de cet héritage méditerranéen. L'optique future, à partir de Newton et de ses successeurs, s'inscrit en effet dans le sillage de cette histoire, qui est une partie de l'histoire universelle de l'optique. Mais la même démonstration vaut pour la géométrie, l'algèbre, la théorie des nombres, etc. : dans chacune de ces disciplines, les savants de langue arabe avaient su retrouver la route des sommets alexandrins, Euclide, Archimède, Apollonius, Menelaüs, Ptolémée, Diophante. C'est dans cette tradition royale que s'inscrivent la virtuosité et la profondeur des mathématiciens arabes. Par ailleurs, les productions savantes des mondes juifs et latins ne peuvent être comprises que dans leur liaison essentielle avec la renaissance des sciences à Bagdad, au Caire et à Cordoue, et c'est cet héritage que Descartes, Fermat et Pascal vont investir pour aller plus loin. C'est à partir de cette science antique et classique que la science moderne s'est construite, et c'est autour de la Méditerranée que cette histoire a été écrite.