

Kepler réinvente l'optique

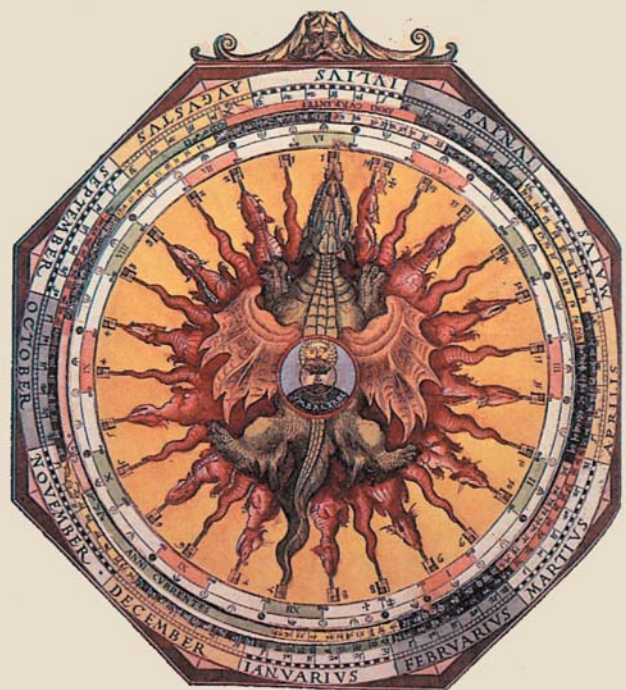
Pour réduire l'incertitude de ses mesures, Kepler, en 1603, étudie l'optique, élabore la théorie de l'image rétinienne et baptise du nom de «foyers» les points fondamentaux de l'optique et du mouvement des planètes.

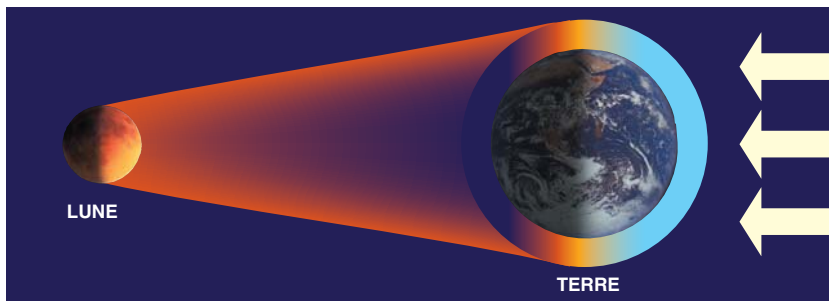
Quand, les premiers mois de 1600, Kepler commence à travailler auprès de Tycho Brahe, une série de questions inédites l'assaillent : elles portent sur l'exactitude des observations. L'astronome danois note que, pendant les éclipses, le diamètre apparent de la Lune paraît plus petit que d'habitude : plus précisément, il semble inférieur d'un cinquième au diamètre mesuré à d'autres moments où la Lune est à la même distance de la Terre. Kepler comprend alors les conséquences possibles des phénomènes optiques, en particulier pour l'interprétation des données astronomiques.

Il fut précédé dans cette voie par Tycho Brahe qui souligna la nécessité d'étudier les phénomènes liés à la «réfraction atmosphérique» (à cause de laquelle il est possible, par exemple, de voir le Soleil quand il se trouve déjà derrière l'horizon), afin d'améliorer la précision des mesures. Tycho croyait que la réfraction dépendait de la distance et de l'intensité de la source, aussi compila-t-il trois tables différentes, une pour le Soleil, une pour les étoiles et une troisième pour les planètes. Il prit une voie erronée, mais souleva, sans aucun doute, un problème important.

Les calculs astronomiques indiquent que, le 10 juillet 1600, une éclipse partielle de Soleil sera visible à Graz ; Kepler se prépare à l'événement en établissant les plans et en construisant, pour l'occasion, une chambre obscure, qui lui permettra de suivre le phénomène confortablement et d'effectuer des

Instruments servant à la prévision des éclipses de Soleil (à gauche) et de Lune (à droite), composés de quatre disques mobiles imprimés sur du carton. Ils figuraient dans l'Astronomicum Caesarium de Peter Apianus, publié en 1540.





«D'où vient la lumière rouge sur la Lune lors des éclipses totales de Lune?», s'interroge Kepler. L'éclipse de Lune est due au passage de la Terre entre le Soleil et la Lune. En traversant l'atmosphère, les rayons lumineux du Soleil sont réfractés et pénètrent dans le cône de pénombre créé par la Terre. Ainsi, la Lune reste faiblement éclairée par ces rayons. Seules les longueurs d'onde les plus longues, c'est-à-dire les plus rouges, traversent l'atmosphère, les longueurs d'onde plus courtes étant diffusées par les molécules de l'atmosphère. Ainsi, la Lune reçoit et réfléchit des rayons rouges.

mesures plus précises que celles dont il dispose. La simple observation de cet événement déclenche une avalanche de questions. Celles-ci, d'abord limitées aux éclipses, s'étendent vite à de nombreux autres phénomènes, tant de l'optique physique (théorique et expérimentale) que de la physiologie de la vue. Kepler mènera une grande partie de ce travail énorme à son terme avant d'avoir résolu l'énigme de l'orbite de la planète Mars. Ces recherches sur deux fronts auraient pu disperser l'attention de Kepler ; il n'en sera rien et les deux tâches se compléteront, mieux, se féconderont l'une l'autre.

Kepler comprend l'importance de l'optique

Kepler, comme Brahe avant lui, comprend qu'il faut tenir compte de la réfraction de la lumière par l'atmosphère pour interpréter correctement les observations ; il augmente ainsi la précision des mesures astronomiques, facilitant de surcroît ses recherches sur l'Harmonie des cieux. Mais ces travaux d'optique porteront d'autres fruits. Nous verrons que l'introduction par Kepler du concept et du terme «foyer» sera non seulement importante dans la géométrie des coniques, dans la théorie de la vision et dans l'optique géométrique, mais tout aussi utile pour «maîtriser» la course de Mars, la première planète dont l'orbite sera décrite par la célèbre première loi de Kepler (selon laquelle toutes les planètes parcourent une orbite elliptique dont le Soleil occupe un des deux foyers).

Procédons dans l'ordre. Après l'éclipse de Graz, Kepler rassemble des documents sur les observations des éclipses récentes et anciennes. Il relève un grand nombre de discordances non imputables à de simples erreurs aléatoires et décide d'élucider, pour les éliminer, toute une série de phénomènes, allant de la propagation de la lumière à la réflexion et à la localisation des images, de la réfraction

Deux photographies d'éclipses totales : à gauche, une éclipse de Soleil et à droite, une éclipse de Lune. Par un hasard étonnant, le Soleil et la Lune ont le même diamètre apparent vu de la Terre.

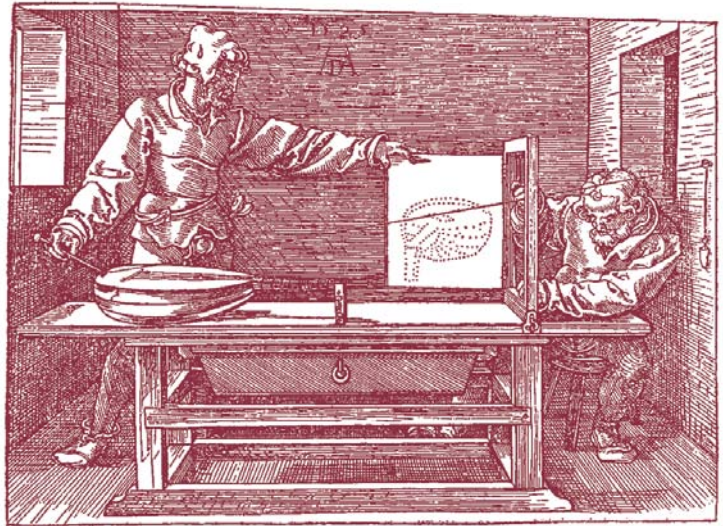


propagation de la lumière par des lignes droites (les rayons) pour expliquer des phénomènes plus complexes : il utilise ainsi ces méthodes, que nous nommons aujourd'hui l'optique géométrique, pour décrire la réflexion sur des miroirs, la localisation des images, la réfraction au passage entre différents milieux, etc.

Dans le deuxième chapitre, Kepler étudie la chambre obscure et en reconstitue l'histoire, d'Aristote à Witelo et à Tycho. Il raconte les vaines tentatives pour expliquer le phénomène qui renverse les images sur l'écran. Il décrit les diverses utilisations de cet instrument en astronomie, dont la possibilité de réaliser des mesures plus précises des éclipses de Soleil.

La technique utilisée par Kepler reprend une méthode imaginée par Albrecht Dürer pour sa théorie des ombres, consignée dans le traité *Unterweisung der Messung* (ou *Instruction sur la manière de mesurer*) de 1525. D'un livre (ou d'un luth, voir l'illustration ci-contre), qui symbolise la source lumineuse, l'on tend, vers un même point, plusieurs fils qui représentent les rayons lumineux, et l'on observe la figure résultante sur un plan situé avant ou après le point de convergence des fils. La figure est à l'endroit dans le premier cas, et à l'envers dans le second. Ainsi, dans une chambre obscure, l'ouverture, lorsqu'elle est suffisamment petite, sert de point de convergence des rayons lumineux, ce qui explique pourquoi l'image admirée sur le fond de la chambre est à l'envers.

Le mystère de la formation des images dans la chambre obscure résolu, Kepler marque la différence entre deux types d'«images», qu'il nomme respectivement *imagines* et *picturae*. Cette distinction est fort intéressante, surtout en raison de ses conséquences futures. Revenons un instant à notre époque et considérons l'image d'une diapositive projetée sur un écran. Celle-ci n'apparaîtra clairement que pour une seule position de l'écran par rapport au projecteur : en pratique, afin d'éviter d'avancer et de reculer l'écran, on modifie le réglage optique du projecteur. En revanche, l'image d'un livre dans un miroir apparaît toujours clairement, quelle que soit la distance entre le livre et le miroir. Dans les deux cas, on parle d'«images». Les deux situations, avant Kepler, étaient équivalentes, car les mécanismes sous-jacents n'avaient pas encore été compris ; de nos jours, la distinction semble même superflue. Néanmoins, pour Kepler, cette différence est cruciale. Il choisit donc deux termes différents, traitant dans un cas d'*imagines rerum* et, dans l'autre, de *picturae*. En partant de l'observation des *picturae* qui se forment sur l'écran d'une chambre obscure, il rassemble les informations nécessaires pour comprendre comment se fait la «mise au point» d'une image et élabore, quelques pages plus loin, une théorie de la vision adéquate.

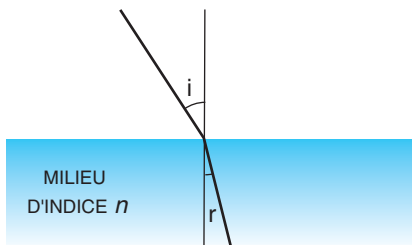


Dans le traité *Instruction sur la manière de mesurer*, Albrecht Dürer décrit une méthode pour dessiner correctement les images et les ombres en perspective : il tend des fils entre un point fixe d'un mur (à droite) et divers points de l'objet à représenter, et reporte sur sa toile l'intersection de chaque fil avec un plan qu'il a choisi. Kepler applique cette méthode à la chambre obscure, utilisée pour observer les éclipses.

Ce dessin, tiré du *De radio astronomico et geometrico liber* de Gemma Frisius, daté de 1557, explique comment observer une éclipse à l'aide d'une chambre obscure.

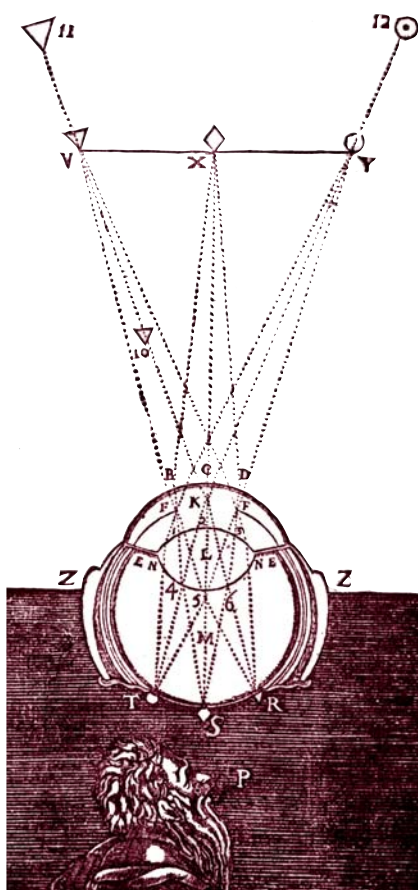


Sic nos exactè Anno 1544. Louanij eclipsim Solis obseruauimus, inuenimusque deficere paulò plus quam dextantem, hoc est 10. vncias, siue digitos vt nostri loquuntur : Fuitque medium deli-



Kepler étudie les lois de la réfraction pour améliorer les mesures astronomiques et suppose que l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence ($i = n r$). La loi exacte ($\sin i = n \sin r$) sera formulée par Descartes et Snell. Quand les angles sont petits, la loi de Kepler est utilisable.

Le modèle, proposé par Kepler, de la focalisation des images en diverses parties de la rétine de l'œil est reproduit dans la Dioptrique de Descartes (1633).



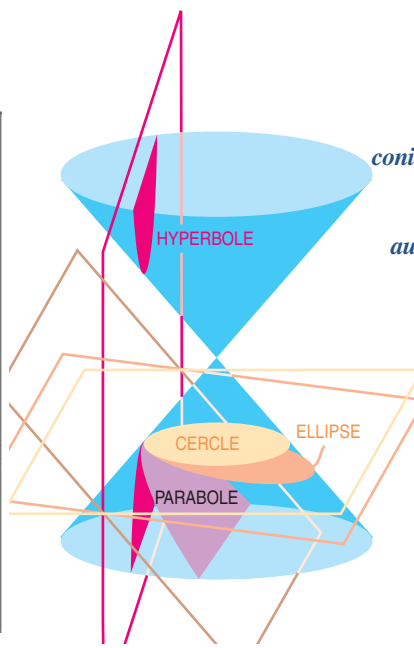
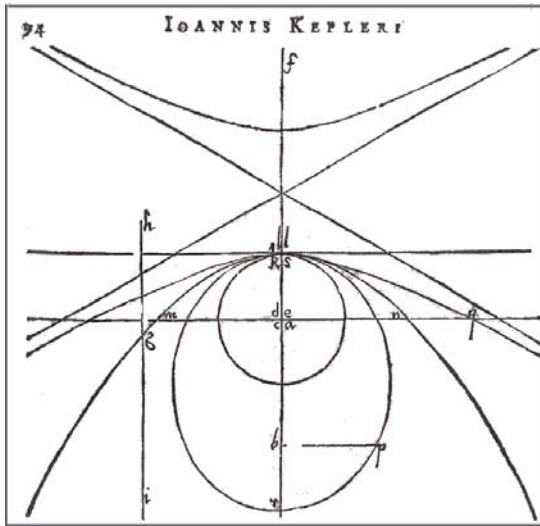
Dans le troisième chapitre, Kepler étudie les images produites par des miroirs plans et courbes et, en particulier, cherche une loi qui exprime l'angle de réflexion d'une image donnée sur un miroir donné. Au passage, inspiré par les miroirs courbes, Kepler évoque les sections coniques et, en quelques lignes, montre comment une transformation permet de passer de manière continue de la droite à l'hyperbole, à la parabole, à l'ellipse et au cercle. Il ébauche, en outre, une théorie de la localisation des images, selon laquelle les deux yeux effectuent une triangulation pour reconstituer la distance exacte des images : pour la première fois, un scientifique reconnaît l'importance de la vision stéréographique. L'astronome réussit même à expliquer comment, en modifiant le trajet optique des rayons émis par une source donnée, l'on peut induire l'œil à «croire» qu'il voit un objet dans un lieu différent de celui où il se situe réellement : il introduit ainsi, de manière naturelle, le concept d'«image virtuelle».

Le chapitre consacré à la formation des images est suivi d'un quatrième chapitre qui traite de la réfraction dans différents milieux. Kepler tente d'établir une loi qui exprime l'angle d'incidence en fonction de l'angle de réfraction. Le résultat qu'il donne n'est qu'approximatif : il détermine en effet que l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence, ce qui est proche de la vérité pour les petits angles (inférieurs à 30 degrés). La loi correcte de la réfraction, exprimant la proportionnalité des sinus, ne sera découverte que quelques années plus tard par Snell et Descartes.

En étudiant ensuite la réfraction dans les lentilles, Kepler observe que, dans une lentille sphérique, les rayons convergent «mal» : ils ne convergent pas en un point, en raison du phénomène dont le nom moderne est aberration sphérique. Kepler examine donc d'autres formes de lentilles possibles et s'intéresse à la famille des coniques. Ces courbes sont dotées de certains points caractérisés par une propriété particulière qui attire l'attention de Kepler : en ces points, qui ne portent pas encore de nom et qu'il décide de dénommer «foyers», convergent tous les rayons émis par un autre «foyer» de cette courbe (voir schéma page ci-contre). Ainsi, si l'on place une source lumineuse en l'un de ces points, l'image sera parfaitement claire à l'autre foyer. Le cercle que, depuis des années, Kepler pensait être la forme parfaite en astronomie, est défavorisé : doté d'un foyer unique, son centre, le cercle ne présente pas d'autre point d'où l'on observe l'image parfaite d'une source située en ce foyer, contrairement à l'ellipse, par exemple.

Les balbutiements d'une théorie de la vision

Désormais, Kepler a rassemblé tous les instruments nécessaires ; il aborde, au chapitre v, la théorie de la vision. Comme toujours, il commence par fournir un résumé critique des théories passées et contemporaines. Outre Alhazen et Witelo, Kepler évoque les textes classiques d'Euclide et de Pecham, tandis que, parmi ses contemporains, il cite à plusieurs reprises Giovanni Battista Della Porta. Selon certains spécialistes, dont l'Italien Vasco Ronchi, les idées de Kepler sont si proches de celles de Francesco Maurolico que cela en devient douteux : Kepler aurait-il eu accès au chef d'œuvre du scientifique sicilien, *Photismi de lumine et umbra*? Cet ouvrage ne sera pourtant publié qu'en 1611, 36 ans après la mort de l'auteur et 7 ans après l'impression de l'*Optica*. Les *Photismi* sont truffés d'informations précieuses, écrites, sans être publiées, bien avant que Kepler ne commence à s'intéresser à l'optique. Maurolico explique le fonctionnement de la chambre obscure et montre que le cristallin (l'humeur cristalline) de l'œil est une lentille biconvexe qui a la propriété de modifier la direction des rayons. Il explique la myopie et l'hypermétropie, identifie les lentilles qui corrigent ces deux défauts et décrit (pour la première fois dans un texte scientifique) non pas des lentilles sphériques de laboratoire, mais des verres de lunettes communs. Toutefois, Maurolico est encore loin de comprendre le mécanisme de la vision, que parce qu'il soutient que la perception des images survient dans le cristallin, tant parce qu'il imagine que chaque objet émet un rayon unique, dirigé vers l'œil de l'observateur. Ces deux points

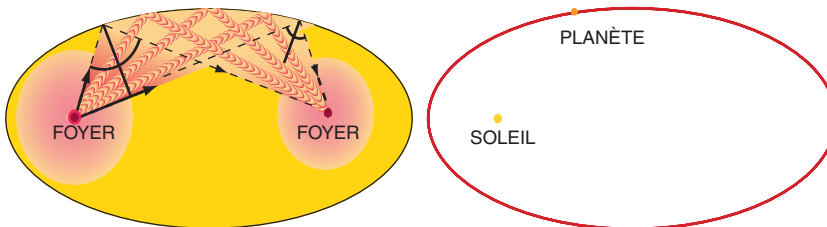


Kepler étudie les propriétés des coniques, famille des courbes à foyers, et observe qu'une transformation permet de passer de l'hyperbole au cercle, via la parabole et l'ellipse. Une méthode consiste à couper un cône avec un plan. En variant l'orientation du plan, on obtient les différentes coniques.

sont les plus problématiques de l'optique de la fin du XVI^e siècle : comment se transmet une « chose » de la réalité extérieure jusqu'à nos organes de la vision et comment se passe la traduction de cette « chose », de l'organe sensoriel au cerveau ?

Même Della Porta, alors que les neuf livres de son *De refractione* de 1593 se révèlent fondamentaux pour l'optique des sphères de verre et des lunettes, ne répond pas correctement à ces questions. Populaire grâce au *De magia naturalis*, œuvre où sont contées les merveilles produites par la chambre obscure, il ne manque pourtant pas d'idées : il a déjà amélioré la chambre, en plaçant une lentille de verre devant le petit orifice d'entrée. L'une de ses intuitions, comprise par Kepler, est d'établir une analogie entre la chambre obscure et l'œil humain, mais il ne réussit pas à élaborer un modèle sensé du mécanisme de la vision.

La perception de l'image par l'œil pose un problème que la supposition classique des perspectivistes – notre œil ne perçoit que les rayons qui lui sont parfaitement perpendiculaires – ne résout pas. L'affirmation, réfutée par l'expérience quotidienne, est en effet indéfendable et même les perspectivistes y renoncèrent. Un désordre total semble ainsi régner dans l'œil : lorsque l'on se



Étudiant les lentilles, en particulier celles de forme conique, Kepler décide de nommer « foyers » les points où convergent tous les rayons émis par un autre « foyer » de cette courbe. Kepler comprend que les foyers de l'ellipse ont des propriétés singulières, à la fois pour la propagation des rayons lumineux et pour la trajectoire des planètes.

Kepler et l'optique

En 1857, l'historien des sciences Poggendorff évoquait, dans l'un de ses cours, la contribution de Johannes Kepler à l'optique. Le jeune astronome Schiaparelli, qui était dans l'auditoire, prit les notes suivantes : Avec ses *Paralipomena ad Vitellionem* (1604), [Kepler] est sans aucun doute le fondateur de la Dioptrique mathématique. Dans cette œuvre, il donne à la loi de la réfraction la forme $i - i' = n i + m / \cos i$, où i est l'angle d'incidence, i' l'angle de réfraction, et m et n deux constantes. Le premier, il affirma que la vision était produite par une image formée sur la rétine ; il expliqua la myopie, la presbytie et l'optique des lunettes. Il étudia le rayonnement et expliqua pourquoi, dans les éclipses

lunaires, la partie lumineuse du disque semblait posséder un diamètre supérieur. Il avait des conceptions exactes sur la réfraction astronomique, alors que Tycho croyait encore qu'elle dépendait de la distance. En 1611, il publia sa *Dioptrique*, où la loi de réfraction est indiquée sous une forme plus correcte $i = m i'$ qui, pour les petits angles, est suffisamment exacte. Il calcula que le coefficient de réfraction de l'eau était $3/2$. Il mesura la réfraction à l'aide de cubes de verre ; il connaissait l'aberration sphérique et savait que seuls les miroirs paraboliques donnent des images exactes. Il inventa le télescope astronomique et montra comment redresser les objets en ajoutant une lentille.

limitait aux rayons perpendiculaires, on obtenait une correspondance parfaite entre les points de la réalité visible à un observateur et les points d'un hypothétique «écran sensible» placé à l'intérieur de l'œil. Si, en revanche, une infinité de rayons sont émis par tous les objets, comment le cerveau se fait-il une idée de ce qu'il regarde? En chaque point de la partie réceptrice de l'œil arrivent une infinité de stimulations, dont chacune est produite par un objet réel différent...

Quant au deuxième problème, l'identification de la partie réceptrice de l'œil qui transforme les stimulations externes en un message transmis au cerveau, il semble résolu : le récepteur ne peut être que le cristallin. À l'époque de Kepler, cette position est défendue par Della Porta, mais l'idée est vieille de plusieurs siècles, déjà présente dans l'œuvre d'Alhazen, et dans celle d'André Vésale, qui a publié en 1543 le *De humani corporis fabrica*.

Les anatomistes eux-mêmes n'ont pas encore les idées claires et les deux autorités en matière de physiologie oculaire auxquelles Kepler recourt défendent des idées opposées : alors que son cher ami Johannes Jessen est encore attaché à la théorie du cristallin, Felix Platter émet une hypothèse nouvelle, selon laquelle l'image est perçue par la rétine. Ce scientifique se fonde sur une observation assez simple : la rétine, à la différence du cristallin, est physiquement liée au nerf optique. Platter est un anatomiste et ne se préoccupe pas des conséquences de son affirmation. Toutefois, cette théorie pose un problème «philosophique» : d'après la démonstration géométrique du trajet des rayons, l'image arriverait sur la rétine inversée et retournée, alors qu'il paraît évident que nous percevons une réalité «droite». Kepler, auquel l'observation de Platter ôte tout doute sur la fonction de la rétine dans la réception de l'image, est effectivement perplexe, à tel point qu'il se demande si les rayons ne se croisent pas une seconde fois avant d'atteindre la rétine, de manière à redresser l'image. Il surmonte finalement son malaise en considérant qu'il doit être possible à notre cerveau de «redresser» l'image reçue à l'envers. Il élabore alors la «théorie de l'image rétinienne» qui, par la suite, constituera le fondement de l'optique physiologique moderne.

Dans une lettre adressée à Mästlin en décembre 1601, Kepler, après avoir soutenu que la compréhension des observations astronomiques découle de celle du mécanisme de la vision, remarque que l'œil possède, lui aussi, une petite ouverture (la pupille) et que, dans l'observation des éclipses, il doit être soumis aux mêmes erreurs que celles qui apparaissent après le passage de la lumière à travers un orifice.

Kepler fait là un premier pas dans son projet d'établir, sur les traces de Léonard de Vinci et de Della Porta, une analogie parfaite entre l'œil et la chambre obscure. Il entre dans chaque détail nécessaire pour expliquer les diverses étapes du mécanisme de la vision. Ne se considérant pas une autorité dans le domaine anatomique, il préfère exploiter les résultats des deux illustres scientifiques cités précédemment, Felix Platter et Johannes Jessen. Pour clarifier son discours, il reproduit, outre certains dessins géométriques, une table du *De corporis humani structura et usu* publié par Platter en 1583. Cette étude des œuvres d'anatomie lui fournit de nombreuses pistes nouvelles : ainsi, il se rend compte que l'humeur cristalline, généralement décrite comme plate à l'arrière, possède une forme ronde évidente. Kepler est prêt à passer de l'anatomie de l'œil à une analyse géométrique du mécanisme de la vision.

La géométrie de la vision

Imaginons une source constituée d'un seul point lumineux : elle émet des rayons dans toutes les directions. L'infinité de rayons interceptés par l'œil forment un cône dont le sommet est situé au point source. Les rayons subissent une légère diffraction lorsqu'ils traversent la cornée et constituent un nouveau cône dont la base est la surface du cristallin. Le modèle original des perspectivistes, où seul le rayon qui frappe l'œil perpendiculairement est pris en compte, n'inclut pas le problème de la diffraction, car le rayon intercepté frappe le cristallin en un point

La chambre obscure était connue des Arabes depuis le IV^e siècle. Léonard de Vinci, dans le Codex Atlanticus, la compare à l'œil. Comme la chambre obscure, l'œil est une petite boîte sombre capable de capter les images «au travers d'un petit orifice rond». Sur la paroi face à l'orifice, l'image est reproduite inversée, ce qui trouble les scientifiques de l'époque, qui préfèrent croire que l'image se forme sur le cristallin. En revanche, ce «problème» ne gêne pas Kepler, qui pense que le cerveau est capable de renverser l'image inversée pour qu'elle nous apparaisse droite.



unique, et ne constitue pas la base d'un cône. Kepler refuse l'idée que notre œil ne reçoive que les rayons parfaitement perpendiculaires et qu'il «rejette» ceux dont la direction diffère de manière infinitésimale. Son hypothèse pose cependant, à ce stade, un autre problème : les différentes bases des cônes produits par plusieurs sources se superposent et devraient nous empêcher de distinguer les positions des divers objets. Kepler décide alors de suivre les rayons diffractés jusqu'à la rétine et comprend que les rayons du cône convergent sur la rétine en un nouveau sommet. Ainsi, la correspondance est rétablie : chaque sommet-source correspond à un sommet sur la rétine. L'idée des cônes n'est pas originale, et Alhazen a déjà modélisé l'objet réel comme la base d'un cône dont le sommet se trouverait dans l'œil. Kepler sait toutefois l'appliquer de façon... lumineuse.

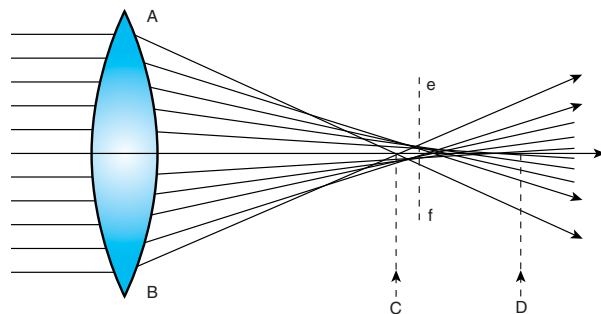
En outre, Kepler observe que, lorsque la source est distante, cas où l'on considère que les rayons interceptés sont parallèles, ces rayons ne convergent plus en un seul point, à cause d'un phénomène connu aujourd'hui sous le nom d'«aberration sphérique», qui engendre une tache floue, la «caustique». Kepler comprend que le problème s'atténue lorsque les rayons traversent une ouverture étroite, qu'il compare immédiatement à la pupille ; cette dernière sert de diaphragme de sorte que, en rétrécissant la pupille, on allonge la profondeur de champ, c'est-à-dire la profondeur de la région observée qui apparaît correctement mise au point. Cette optique sera parfaitement élucidée par Gauss en 1820.

Un autre commentaire de Kepler concerne la forme de la partie postérieure du cristallin, qui lui paraît hyperbolique. Il soutient qu'elle est préférable à la forme sphérique, car, comme il l'a démontré dans le cas des lentilles, l'hyperbole diminue les aberrations en «allongeant» le champ de vision.

La voie tracée par Kepler n'est pas immédiatement praticable par ses contemporains. Les deux grandes œuvres d'optique qui suivront, le *De lumine* du père Grimaldi, publié en 1655, et *La lumière* de Marin Cureau de La Chambre, de 1662, mentionneront encore les «espèces», remettant au goût du jour ces anciens «simulacres» évoqués par Avicenne (980-1037), petites images en miniature qui sortaient des corps et parvenaient à l'œil, suscitant la sensation de voir les objets. L'idée keplérienne de l'image rétinienne semble oubliée. En outre, le fait que Kepler se soit inspiré des nouveautés de Della Porta, qui a mauvaise presse au point d'être accusé de charlatanisme, a embarrassé la communauté scientifique ; l'un de ses membres, Filippo Salviati, écrit même à Galilée qu'il est surpris de voir une personne aussi rationnelle que Kepler éprouver de la gratitude envers cette espèce de sorcier.

Insistons : en travaillant dans un secteur tel que l'astronomie, dont la structure n'est pas encore figée, Kepler a trouvé un cas où le cercle et la sphère ne sont pas les figures parfaites auxquelles la physique se réfère habituellement, par dogme. Il a compris un concept fondamental, la convergence des rayons en un point particulier, qu'il nomme foyer, point où il est possible d'observer clairement l'image d'une source située dans un autre foyer. Il a rendu inutile la théorie des «espèces» et ne se préoccupe que de rayons, de points objets et de points images.

L'*Optica* est imprimée en 1604, l'année où Kepler parvient à caractériser l'orbite de Mars, où il abandonne le cercle en faveur d'une conique, l'ellipse, et où il identifie à son foyer la position du Soleil (que Plutarque, si cher à Kepler, avait appelé le «Foyer de l'univers»).



Des rayons lumineux parallèles qui traversent une lentille ne convergent pas exactement en un seul point, mais en plusieurs points proches situés sur l'axe de la lentille. L'image (dans le plan ef) d'une source ponctuelle éloignée est, à cause de cette «aberration sphérique», une tache floue, la «caustique».

L'anatomie de l'œil telle que la décrit Felix Platter dans une illustration de son De corporis humani structura et usu.

