Module de démonstration pour l'intégration de repères culturels dans l'enseignement des sciences aux niveaux secondaire et collégial

LA CAMERA OBSCURA ET L'ÉVOLUTION DES IDÉES « LUMINEUSES »

Conception

Isabelle Arseneau, Centre de démonstrations en sciences physiques
et *Nathalie Bacon*, Université Laval,
avec la participation de *Mathieu Riopel*, Cégep Garneau

Réalisé dans le cadre du Programme de collaboration universités-collèges (2013-2015)

Vincent Richard, professeur
Faculté des sciences de l'éducation,
Université Laval

Marcel Lafleur, directeur
Centre de démonstration en sciences physiques, Cégep Garneau

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté des sciences de l'éducation

CENTRE DE DÉMONSTRATION EN SCIENCES PHYSIQUES

2015

Table des matières

Introduction et éléments de définition 3

A) Un module de démonstration autour de la camera obscura : intérêt et objectifs 3
B) Une définition de la camera obscura comme point de départ 4

Fiche 1 : Étude de la vision, de l'œil et *camera obscura* 5

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de la vision et de l'œil 5
1. Compréhension de la vision au temps des Grecs : 5
2. La vision chez les astronomes arabes et les théories d'Ibn al-Haytham 6
3. La Renaissance de la « vision du monde » 8
B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche 11
C) Quelques pistes sur les idées de science évoquées 11
D) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles 12

Fiche 2 : Étude de la lumière, de l'astronomie et *camera obscura* 13

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de la lumière et de l'astronomie 13
1. L'optique dans l'Antiquité grecque 13
2. L'optique au Moyen Âge 14
3. L'optique à la Renaissance 16
B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche 18
C) Quelques pistes sur les idées de science évoquées 19
D) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles 20

Fiche 3 : Perspective, art et *camera obscura* 21

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de la perspective et des liens avec l'art 21
1. Les origines de l'idée de perspective 21
2. L'invention de la perspective 22
3. La *camera obscura* et l'art hollandais au XVIIe siècle 24
4. La *camera lucida,* un autre instrument optique utilisé dans la peinture 25
B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche 26
C) Quelques pistes sur les idées de science évoquées 27
D) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles 27

Fiche 4 : Image, observation et *camera obscura* 28

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de l'image et de l'observation 28

1. L'optique et « l'observation de la nature » chez les Grecs 28
2. Les théories d'Alhazen et l'observation au Moyen Âge 28
3. La représentation du réel et l'invention de la perspective 29
4. La *camera obscura* et l'idée d'observation 31
5. La *camera obscura* et l'art hollandais 32

B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche 33

C) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles 34

Annexe 1 : Les démonstrations liées à la camera obscura 35

1. L'expérience en chambre noire 35
2. Les trois cartons perforés 36
3. La boîte-sténopé 37
4. Le modèle de l'œil 38
5. La « boîte noire » 38
6. La boîte de projection « Batman » 39
7. La camera obscura avec rétroprojecteur 40
8. La camera lucida 40
9. La camera obscura – réplique en bois 41
10. La boîte de carton coulissante (avec lentille et écran semi-transparent) 42
11. Photographie-sténopé 42

Annexe 2 : Références utiles 45

1. Sur les références historiques de la camera obscura: 45
2. Sur les idées de physique : 45
3. Sur la physiologie de l'oeil: 45
4. Sur les procédés photographiques : 45
5. Sur l'idée d'observation en science : 45

Introduction et éléments de définition

A) Un module de démonstration autour de la camera obscura : intérêt et objectifs

Le module de démonstration présenté ici s'intéresse à la *camera obscura*, un appareil qui a permis de mieux comprendre la lumière, les images et la vision à travers l'histoire. Le module s'articule autour de quatre fiches d'accompagnement portant sur différents thèmes – l'œil et la vision, la lumière et l'astronomie, la perspective dans les arts, l'image et l'idée d'observation – et présentant des montages de démonstration pouvant illustrer concrètement certains phénomènes « lumineux ». Ces fiches s'adressent aux enseignants de sciences, qui pourront les utiliser, en tout ou en partie, pour planifier une situation d'apprentissage. Les fiches visent à appuyer et à inspirer l'enseignant de sciences désirant introduire une perspective culturelle dans ses cours. Dans ce but, les quatre fiches intègrent plusieurs repères historiques. Ces éléments ne sont toutefois pas présentés comme des savoirs encyclopédiques où les dates et noms sont listés de manière exhaustive. Ils sont introduits dans la mesure où ils permettent de faire comprendre les aspects suivants :

- Prendre conscience que les idées de ceux dont l'histoire a conservé les noms sont issues certes de leurs réflexions et de leurs travaux, mais également des idées des autres qui les ont précédés ou qui leur ont été contemporains. Ces idées parfois excellentes, parfois partiellement vraies ou complètement fausses, en ont parfois suscité d'autres plus justes, plus appropriées, plus utiles ou simplement différentes.

- Prendre conscience que ce que l'on sait aujourd'hui, toutes ces idées sur la propagation de la lumière, sur les couleurs, sur le fonctionnement de l'œil et le rôle du cerveau dans la vision a pris beaucoup de temps à être compris. Ces connaissances qui semblent acquises et comprises aujourd'hui ne l'ont pas toujours été, tout comme les conséquences qu'elles ont pu avoir. Ce que l'on sait aujourd'hui peut sembler fini, suffisant, mais n'est qu'une page de ce que nous aurons compris et saurons demain.

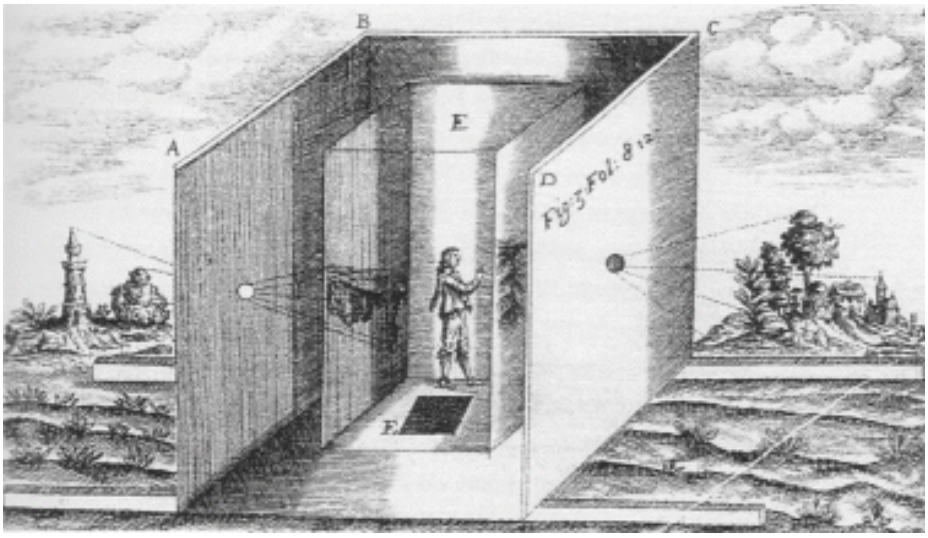
- Prendre conscience que certaines de ces représentations ou conceptions peuvent encore exister, parfois partiellement, dans la population et parmi les étudiants qu'ils fréquenteront.

- Prendre conscience que certains cherchent, développent des connaissances et les communiquent, que certains les vulgarisent, cherchent comment mieux les enseigner, que certains les enseignent et que d'autres les apprennent pour les utiliser dans la société. Les idées ne cessent d'évoluer et de se répandre, mais elles demeurent des constructions humaines. Autrement dit, derrière chaque idée, il y a des hommes et des femmes qui se questionnent.

Deux **annexes** sont présentées à la suite de ces fiches. La première décrit les différentes démonstrations et leurs caractéristiques qui sont associées à différents thèmes abordés dans les textes; la deuxième propose différents liens et ressources bibliographiques pour ceux qui désirent aller un peu plus loin.

B) Une définition de la camera obscura comme point de départ

La *camera obscura*, ou chambre noire, est une pièce complètement sombre et fermée, où la lumière n'entre que par un trou minuscule (un sténopé), auquel on peut éventuellement appliquer un verre[1] (une lentille), et qui laisse passer les rayons (lumineux) des objets extérieurs jusqu'au mur opposé couvert d'un écran ou d'un papier blanc. Elle permet de voir au-dedans ce qui se présente au-dehors.



Arthanase Kircher, Camera obscura transportable, gravure, in Ars Magna Lucis et Umbrae, Rome. 1646.
[Source image : http://thedelightsofseeing.blogspot.ca/2010/10/pinhole-photography-and-camera-obscura.html]

L'intérêt de la *camera obscura,* c'est qu'un regard humain peut voir sur l'écran une image qui se forme et se déforme; ce qui importe, c'est l'expérience de l'enfermement dans l'obscurité, suivie de l'apparition plus ou moins progressive de la lumière. Cette expérience est autant spatiale que temporelle. Dans le cas d'un « boîtier », ce qui fait son intérêt est son utilisation photographique. Il est intéressant de noter que le terme « chambre noire » évoque à la fois un appareil et une pièce d'habitation : la chambre à coucher.

On retrouve dans l'histoire de nombreuses variantes de cette « chambre noire ». Par exemple, Kepler parle de *camera clausa* (chambre close) alors qu'Ibn al-Haitham (ou Alhazen) utilise l'expression de « lieu obscur » : *locus obscurus*. Cela dit, le terme *camera obscura* est assez ancien et ne peut être attribué à une personne en particulier, même s'il semble que cette expression se soit imposée au cours du XVIIe siècle.

Tous ces repères historiques seront abordés dans les quatre fiches qui suivent, qui sont complémentaires entre elles. Il est important de noter que plusieurs informations historiques contenues dans ces fiches ont été tirées de l'ouvrage de Martine Bubb (2010)[2].

1. La première mention de l'ajout d'une lentille biconvexe daterait de 1550.
2. Bubb, M., (2010). *La camera obscura : philosophie d'un appareil*. Éditions L'Harmattan.

Fiche 1 : Étude de la vision, de l'œil et *camera obscura*

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de la vision et de l'œil

1. Compréhension de la vision au temps des Grecs

La théorie du feu visuel : *Empédocle (v. 490 à 435 av. J.-C.), Platon (v. 423 à 347 av. J.-C.)*

La théorie du « flux visuel provenant de l'œil » est couramment associée à l'école pythagoricienne et en particulier à Alcméon de Crotone pour qui l'œil « contient » du feu qui jaillit lorsque l'œil est touché. Selon cette théorie, la lumière part de l'œil et y revient. Plus particulièrement, l'œil émettrait des *quid* allant « reconnaître » les objets et reviendraient ensuite vers nous pour nous informer de ce qu'ils ont détecté. C'est une idée qui sera reprise par Empédocle pour qui la vision se fait grâce à la lumière issue de l'œil. Platon développera largement cette idée du feu intraoculaire. Pour lui, la vision résulte de la rencontre entre l'émanation de l'objet et le « corps simple et homogène » qui, lui, est formé par la fusion de l'émanation oculaire et de la lumière du jour. À travers cette rencontre, les « mouvements », produits par des particules de différentes tailles (que Platon associe aux différentes couleurs), sont transmis à l'esprit et produisent des sensations (la vue et la pensée). L'argument de base repose sur le fait qu'on peut voir un objet lorsqu'on « pose » le regard sur lui, autrement dit que c'est l'action de regarder qui fait voir. Pour ces penseurs, ça semble être une évidence : les yeux fermés, on ne voit rien, puisque les rayons (*quid*) ne peuvent plus sortir!

L'*eidola* des atomistes : *Démocrite (v. 460 à 370 av. J.-C.), Épicure (v. 342 à 270 av. J.-C.), Lucrèce (v. 98 à 55 av. J.-C.)*

Pour les atomistes, l'Univers est composé d'innombrables unités matérielles indivisibles. Pour eux, ce sont les objets qui émettent de petites répliquent d'eux-mêmes : les *eidola*, perçus comme des émanations d'atomes, des émanations « matérielles » transmises depuis l'objet jusqu'à l'œil. Ces émanations, semblables à des voiles colorés, impalpables, « se détachent de la surface des corps, s'élancent dans l'air en conservant leurs formes, entrent en nous, reproduisant les objets extérieurs, sous des grandeurs proportionnellement réduites[3]. » Pour Démocrite, s'il suffisait à nos yeux de lancer des rayons, comme la théorie du flux visuel le soutenait, nous verrions même dans le noir, ce qui n'est évidemment pas le cas. Cela dit, cette théorie des *eidola* suscita plusieurs questions et objections, par exemple : comment se fait-il que les images n'interfèrent pas entre elles? Comment l'image d'une montagne peut-elle passer par le petit trou de la pupille?

Les qualités sensibles de l'œil vues par *Aristote (v. 384 à 322 av. J.-C.)*

Aristote considère que l'œil possède une double nature : comme corps physique, il accueille les images sur la surface sensible que constitue la rétine; comme entité sensible, il transforme les effets colorés en impressions sensorielles et visuelles, de la même façon que la cire prend l'empreinte des objets sans être affectée, dans son essence, par la nature de cet objet. La théorie d'Aristote est majoritairement « intromissionniste », puisqu'il conçoit l'œil comme « récepteur » et non comme « émetteur », ce qui ouvrira la voie à la *camera obscura* des astronomes arabes. Pour combattre la théorie rivale, soit que l'œil émettrait un *quid*, Aristote soutient comme Démocrite que nous devrions voir la nuit. Aristote s'est aussi questionné sur l'origine des couleurs. Il a remarqué, comme d'autres esprits curieux, que le blanc est bien plus éblouissant que

3. Lucrèce, *De rerum natura*. Citation reprise de la traduction de H. Clouard. *De la nature*, Paris, Garnier.

le noir. Ils proposent alors une explication reposant sur l'éclat de la lumière, soit qu'une couleur donnée repose sur l'éclat des « ingrédients » qui composent son mélange. La noirceur aurait elle aussi un impact sur la couleur, puisque lorsqu'il fait noir, les couleurs de l'objet semblent s'estomper, voire disparaître.

Dans cette perspective, Thierry de Frieberg, au 13e siècle, imagine que la combinaison de clarté et d'obscurité peut expliquer les couleurs. Selon lui, comme le blanc constitue le pôle le plus brillant, et le noir le pôle le moins brillant, il suffit de rajouter un peu de noirceur au blanc pour obtenir le jaune, moins brillant que le blanc, et encore un peu plus pour obtenir le rouge, puis le bleu et le violet. Aujourd'hui, il est reconnu que notre œil est moins sensible au bleu, ce qui nous fait apparaître de manière moins éclatante cette couleur. Nous savons aussi que les cônes, les cellules photosensibles responsables de la vision des couleurs, ont besoin de beaucoup de lumière pour être activés. Enfin, nous savons maintenant que le noir est en fait une absence de lumière, ce qui était difficile à concevoir à l'époque. Qu'est-ce qu'il y a de différent entre une page blanche et une page noire si ce n'est la couleur et l'éclat?

La vision tactile d'*Euclide (v. 300 av. J.-C.)*

Euclide a été le premier à élaborer une théorie systématique de l'optique basée sur les rayons visuels, qui présuppose que c'est de l'œil que partent les rayons : l'œil voit en émettant un flux visuel, le long de lignes unidimensionnelles, et atteint ainsi les objets visibles, théorie qui trouve son origine chez Platon. Chez Euclide, nous retrouvons cette théorie de la vision alliée à la notion de la réalité des formes géométriques. Les lignes délimitent un champ de vision comme si elles étaient des rayons réels. Ce n'est qu'au Moyen Âge que cette théorie sera scientifiquement invalidée par les savants arabes, mais elle laissera des traces jusqu'à la Renaissance. Pour Euclide, les rayons se rejoignent pour former un « cône visuel » dont la pointe se situe dans l'œil (comme origine du flux, mais sans localisation précise) et la base dans le champ de la vision. Il raisonne en mathématicien, à partir d'un point « idéal », mais ne s'aventure pas sur le terrain de l'anatomie. Il remarque simplement que le rayon central est « le plus clair ». La vision est donc réduite à un « sens tactile », puisque les rayons opèrent un contact physique avec l'objet. Ainsi, à l'opposé d'Aristote, la question de la couleur n'est pratiquement jamais abordée, voire ignorée, de même que le problème de la vision binoculaire.

L'anatomie de la vision selon *Galien (v. 129 à 200)*

Galien aborde le phénomène de la vision comme un médecin, pour qui l'œil est en quelque sorte un prolongement du cerveau qui s'effectue par l'intermédiaire des nerfs optiques. Le nerf est un conduit qui doit permettre à un fluide visuel, envoyé de l'encéphale, de se répandre sur le cristallin, le rendant ainsi apte à être impressionné par la lumière. La structure de l'œil est décrite assez précisément, mais située de manière erronée, surtout pour le cristallin. Cela peut s'expliquer par le fait que les expériences de dissection ont été conduites, à cette époque, en faisant cuire les yeux dans l'eau bouillante au préalable!

2. La vision chez les astronomes arabes et les théories d'Ibn al-Haytham

Même si les conditions théoriques de la *camera obscura* étaient posées avec Aristote et sa théorie de l'intromission, il faut attendre le Ve siècle pour en voir apparaître une utilisation concrète. En effet, certains décrivent le Moyen Âge, particulièrement en Europe, comme une période de stagnation intellectuelle sur le plan de l'optique. Ce seraient des moines, à l'époque gardiens des connaissances, qui se penchent sur le phénomène de la *camera obscura* à la suite des démonstrations d'Ibn al-Haytham (v. 965-1041), aussi connu sous le nom d'Alhazen. Leurs

démonstrations ont le mérite d'articuler pour la première fois la théorie aristotélicienne « intromissionniste » et la pratique qui lui correspond : les expériences en chambres noires.

Notons toutefois que la théorie d'Alhazen se situe entre deux théories : l'intromissionniste (celle des philosophes de la nature, celle selon laquelle la lumière est émise par les objets et pénètre dans l'œil) et l'extramissionniste (celle des mathématiciens, celle selon laquelle l'œil émet de la lumière « divine »); il apporte cependant son soutien à la théorie intromissionniste. Pour lui, même une théorie erronée peut contenir une part de vérité. Selon lui, les deux modèles sont équivalents d'un point de vue mathématique. Néanmoins, il est vain de nier leur opposition fondamentale au niveau de la physique. Ce qui est intéressant de souligner, c'est qu'Alhazen contredit clairement les théories de la vision de Ptolémée, d'Euclide et de Pythagore, théories selon lesquelles l'œil envoie des rayons visuels à l'objet de la vision. Selon lui, les rayons ont leur origine dans l'objet et non dans l'œil. L'œil n'émet plus la lumière, il la reçoit.

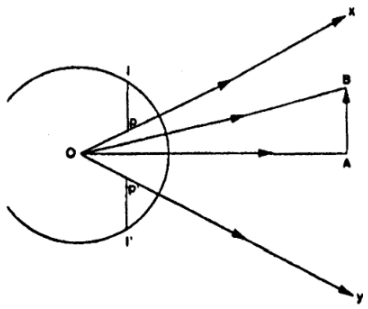


Figure 1 – La vision selon Ptolémée

O	sommet du cône visuel
II'	iris
pp'	pupille
xOy	cône visuel
AÔB	angle sous lequel est vu le segment AB

Le cône de rayons visuels se suffit à lui-même. Les Anciens ne traçaient ni la figure de l'œil, ni le trou de la pupille. Ils ne figurent ici que pour faciliter la comparaison avec la théorie de l'intromission d'Ibn al-Haytham.

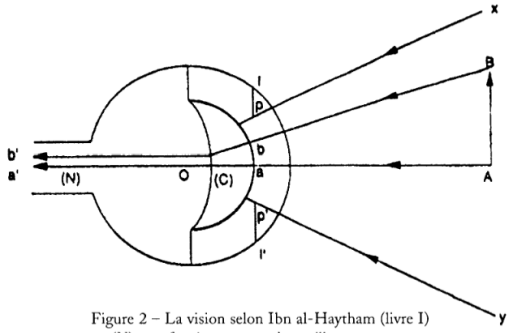


Figure 2 – La vision selon Ibn al-Haytham (livre I)

(N)	nerf optique	pp'	pupille
O	centre de l'œil	II'	iris
(C)	cristallin	AB	objet

Aa, Bb, etc. Rayons lumineux utiles (normaux à la cornée et à la face antérieure du cristallin).
a'b' forme sensorielle de l'objet se propageant dans l'humeur vitrée et le nerf optique.
(La face postérieure du cristallin pourrait aussi être plane ou légèrement convexe. Mais toujours située dans la partie antérieure du globe oculaire, elle transmet par réfraction les formes parallèlement à l'axe de l'œil). – Grâce à la ségrégation des seuls rayons lumineux utiles, on retrouve le vieux cône visuel antique, mais il a changé de sens.

La vision selon Ptolémée et selon Alhazen. Gérard Simon. Sciences et savoirs aux XVIe et XVIIe siècles. Presses universitaires du Septentrion, p. 15, 1996. [Source image : https://lise.oca.eu/spip.php?rubrique34]

C'est, entre autres, la description de la *camera obscura* qui lui aurait permis de démontrer et de balayer la théorie pythagoricienne qui prévalait à l'époque et qui accordait un sens tactile à l'œil, comme s'il était un bâton aveugle. Son meilleur argument appuyant la théorie des philosophes de la nature (intromissionniste) est celui-ci : quand on regarde un point très lumineux, comme le soleil, celui-ci brûle les yeux. La lumière part donc de l'objet extérieur pour se réfléchir dans l'œil, qu'elle blesse. Pour Alhazen, la lumière possède une existence propre. Une expérience simple de « persistance rétinienne » (terme anachronique, puisque le rôle de la rétine n'a pas encore été reconnu à cette époque) permet de s'en rendre compte : il suffit de fixer assez longtemps l'image d'un ciel lumineux à travers une lucarne puis de se tourner vers la partie obscure de la pièce : l'image persistera. Cela prouve que nous *voyons* la lumière, donc que nous ne l'émettons pas. De même, on peut montrer très simplement que les objets de la vision existent dans l'espace et non dans nos yeux ou dans nos têtes, en fermant puis en ouvrant nos yeux. Il n'est donc pas nécessaire de faire appel à la géométrie pour le comprendre. Une simple observation suffit parfois à démolir des siècles de théories!

La théorie visuelle d'Alhazen est celle du point par point. Chaque point à la surface de l'objet lumineux serait, selon lui, une source indépendante de rayonnement qui se propage aussi loin que la transparence du médium le permet. Ce qui en résulte est une sphère de propagation con-

tinue dans laquelle chaque rayon correspond à une trajectoire rectiligne, au cours de laquelle la *lumen* est transmise. Selon cette théorie punctiforme, l'œil serait bombardé simultanément de rayons provenant de toutes les directions. Cette idée représente un problème en soi : comment l'œil peut-il donc tirer un sens cohérent d'impressions visuelles si désordonnées et confuses? Le savant tente d'apporter une réponse au problème en suggérant que les rayons qui touchent le cristallin verticalement produisent une plus grande impression; les autres sont ignorés en fonction de leur relative faiblesse. Le cristallin assume donc un rôle de filtre, puisqu'il sélectionne, à partir d'un chaos d'impressions, celles qui forment un cône de rayonnement dont la pointe se situe dans le centre de l'œil, afin de former une image cohérente.

La référence la plus explicite dans l'œuvre d'Alhazen à la *camera obscura* se situe dans son *Traité consacré à l'éclipse*, qui s'interroge sur les rayons lumineux. Il jette les bases physiques de la vision en termes de rayons lumineux colorés, décrit la structure de l'œil, d'un point de vue anatomique et physiologique, et souligne la variabilité des conditions dans lesquelles se forme la vision. La méthode qu'utilisa Alhazen est inductive et très largement empirique : on y trouve peu d'hypothèses et de déductions, sauf celles qui concernent la géométrie de l'œil, un peu idéalisée, puisque le cristallin serait censé, selon lui, sélectionner les rayons.

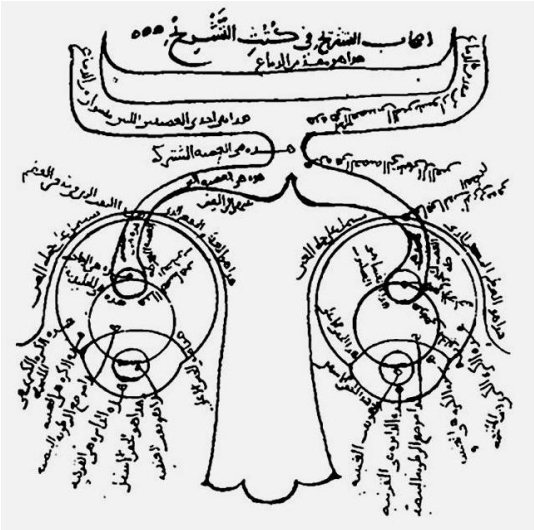


Schéma des deux yeux par Alhazen, extrait du plus ancien manuscrit de son œuvre, rédigé par son gendre, 1080. [Source image : http://www.laviedesidees.fr/Perspectives-croisees-entre-orient.html]

Cela dit, un élément qui a échappé à Alhazen est l'explication du renversement de l'image. C'est peut-être qu'en tant qu'astronome, il se serait surtout attardé à observer les astres, qui de par leur « sphéricité » apparaissent identiques à l'envers ou à l'endroit. Nulle part dans ses écrits il n'est question de « paysages ». Il ne fait donc pas de la *camera obscura* un modèle pour rendre compte de la théorie visuelle (le rôle de la rétine, entre autres, qui renverse l'image). Cependant, bien qu'Alhazen ait de la difficulté à admettre le phénomène de renversement, il comprend qu'en théorie, la forme d'un objet devrait se retrouver renversée par le croisement des rayons au centre de l'œil, mais il élude la question, puisque nous voyons droit! Par des acrobaties théoriques, Alhazen fait se former l'image sur le cristallin. Il néglige aussi le problème de la réfraction, dont il n'a que des connaissances approximatives, et le problème du renversement est ainsi évité.

3. La Renaissance de la « vision du monde »

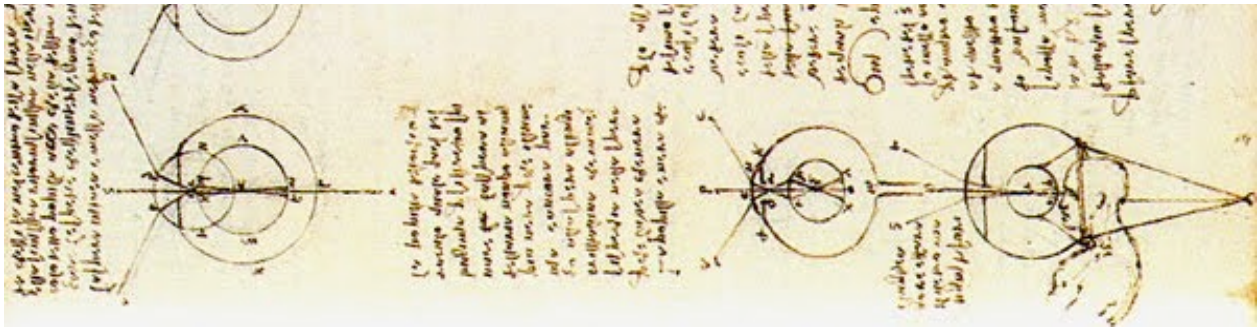
L'œil comme *camera obscura*

Inventée au XVe siècle par Brunelleschi et Alberti, l'invention de la « perspective artificielle »[4] va révolutionner la vision du monde, la conception de l'espace, et marquer une rupture radicale avec le Moyen Âge. Léonard de Vinci (1452-1519), parfois décrit comme le symbole de l'homme de la Renaissance, a eu une contribution significative dans le domaine de l'optique, notamment sur la compréhension de l'œil et de la vision. Sa perspective est loin d'être uniquement albertienne. Les problèmes qui ne sont pas liés à la perspective stricte l'intéressent beaucoup,

4. Pour davantage de précisions sur l'invention de la perspective, se référer à la fiche 3 : Perspective, art et *camera obscura*.

comme l'anatomie de l'œil. Il en aurait d'ailleurs fait la première « empreinte » grâce à du blanc d'œuf coulé à l'intérieur et devenu solide à la chaleur. La recherche de Léonard de l'éclairage idéal (celui d'un demi-jour diffus), pour l'œil et la peinture, coïncide avec ses travaux sur la pupille. Il entrevoit, bien avant Galilée, le rôle du cristallin lors de la dilatation et de la contraction de la pupille selon la quantité de lumière reçue. Il étudiera l'œil jusque dans ses troubles de réfraction, en insistant sur la presbytie et l'utilisation de lunettes.

Les observations de Léonard de Vinci sur l'œil s'inscrivent dans la vision principalement intromissionniste : les rayons sont conçus comme partant des objets et non de l'œil. L'œil est comparé à une chambre noire; plus particulièrement, c'est l'image de l'œil qui est comparée à la *camera obscura*. De Vinci serait le premier (v. 1490) à avoir construit un œil artificiel en verre et en métal sur le modèle de la *camera obscura*. Si l'anatomie de l'œil qu'il proposa est assez primitive, il n'en demeure pas moins que le fait d'assimiler l'œil à une chambre noire représente une innovation technique importante. En commençant par étudier l'œil comme un système optique, Léonard se mettra sur la voie, bien avant les autres, de considérer l'œil comme une *camera obscura*, qui aura permis par exemple de confirmer la théorie d'un rayonnement pyramidal.

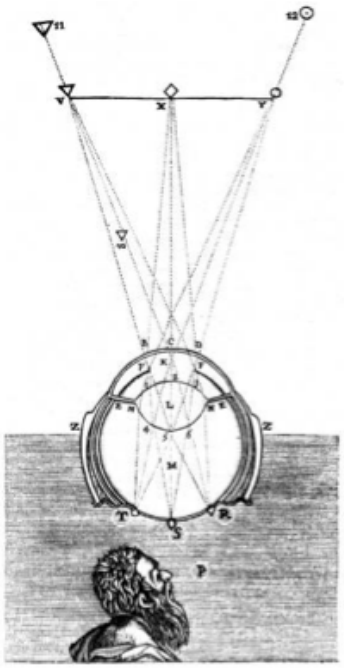


Léonard de Vinci, L'œil est une camera obscura, v. 1492
[Source image : http://dessindrawing.blogspot.ca/2011/08/il-et-camera-obscura.html]

Le rapprochement entre l'œil et la *camera obscura* est somme toute génial, mais de Vinci butera tout de même, comme plusieurs autres, devant le problème du renversement de l'image. Bien qu'il connaisse la raison de ce renversement, soit l'intersection des rayons, cette question ne sera pas résolue. Il faudra attendre jusqu'en 1604 pour que Kepler impose l'idée que l'image se forme renversée sur la rétine et non sur le centre de la sphère cristalline ou encore sur la pupille comme l'imagine Léonard. Celui-ci refuse l'idée de l'image renversée sur la rétine, car il veut respecter la rectitude de l'image et l'absolutisme des lois physiques. Il n'imagine à aucun moment que le cerveau soit capable de redresser les images, ce qui est surprenant, quand on sait qu'il écrivait « à l'envers », de la droite vers la gauche, sans probablement utiliser de miroir pour se relire.

Une théorie révolutionnaire, une approche expérimentale *: Kepler (1571-1630)*

Kepler réinvente l'optique en élaborant notamment la théorie rétinienne largement inspirée de sa pratique de la *camera obscura* et restructure les connaissances de l'époque dans son *Optica*, une œuvre en deux parties, terminée en 1603. Kepler avoue cependant être troublé par le problème du renversement de l'image. Il songe, comme Léonard de Vinci, à la possibilité d'une seconde intersection dans l'œil, mais note que même une image « droite » dans l'œil aurait le même effet qu'une image de miroir. Pour Kepler, la seule solution à ce problème serait, pour l'image, d'être à la fois inversée et renversée sur la rétine, avant d'être redressée dans le cerveau (conscience). Kepler élabora cette théorie rétinienne, fondatrice de l'optique physiologique moderne, qu'il n'illustre pas (c'est dommage) de dessins. Cependant, la figure de *La Dioptrie* de



« L'image se forme sur la rétine, l'âme l'interprète » *René Descartes, La Dioptrie, illustration de la théorie rétinienne, 1637.* [Source image : http://www.lumen.nu/rekveld/wp/?p=3521]

Descartes, publiée trente ans après, rend assez bien compte de cette théorie du champ visuel qui se transforme en « peinture inversée et renversée » sur la rétine, même si la philosophie cartésienne de Descartes est finalement à l'opposée de celle de Kepler.

Pour Kepler, la vision se fait à partir de « la peinture des choses visibles » sur la surface « blanche et concave de la rétine ». Une image se peint, comme sur le fond de la *camera obscura*. Bref, on peut supposer qu'ayant passé des heures innombrables à observer des images renversées dans une *camera obscura*, Kepler ait « accepté » que notre rétine reçoive de la même façon les images à l'envers. Pour la première fois dans l'histoire, on trouve une vraie « image optique » dans l'œil, image dont l'existence est indépendante de l'observateur, simplement formée par la convergence de rayons lumineux sur une surface. La force de la découverte de Kepler réside donc dans le fait de couper un champ qui était unifié jusqu'alors. Sa méthode consiste à séparer le problème physique – la formation de l'image rétinienne – des problèmes psychologiques de la perception et de la sensation.

Newton (1642-1727) et son approche expérimentale

Le traité *Opticks* (1704) de Newton sur la lumière et les couleurs est purement expérimental. De nouveau, nous voyons apparaître l'expérience récurrente de la *camera obscura*. Le problème du renversement de l'image y est évoqué par Newton comme s'il s'agissait d'un fait accidentel. Pour lui, il ne fait aucun doute que l'image se forme « sur la tunique qu'on nomme rétine dont le fond de l'œil est tapissé ». Newton remarque d'ailleurs, dans son étude sur l'anatomie de l'œil, que les images que l'on peut voir sur la rétine sont propagées par le mouvement « le long des nerfs optiques jusqu'au cerveau » et deviennent la cause de la vision. Par cette remarque, Newton quitte le champ strictement expérimental en tentant de répondre à ces deux questions : « Comment l'image se forme-t-elle sur l'œil? » et « Comment voyons-nous au moyen de l'œil? ».

Notons en terminant que c'est à partir du XVIIe siècle, notamment avec l'utilisation dans la peinture de la *camera obscura* chez les Hollandais, qu'on remarque de plus en plus que c'est l'œil qui sera vu comme une chambre noire et non l'inverse. Pendant longtemps, c'était plutôt la *camera obscura* qui était comparée à l'œil. Un fait intéressant à propos de cette comparaison entre l'œil et la *camera obscura* est que Nicéphore Niepcé (1765-1833), un des inventeurs de la photographie, appelle ses négatifs des « rétines »!

B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche

Sur le thème de l'œil et de la perception sensible de la lumière, plusieurs démonstrations pourraient être utilisées pour illustrer l'une ou l'autre des idées évoquées. Les caractéristiques des montages, incluant une photo, ainsi que leur utilisation, sont détaillées dans le tableau des démonstrations présenté en annexe. Voici celles que nous proposons.

Les trois cartons perforés (voir tableau démonstration 2)

Cette démonstration constitue un excellent déclencheur. Elle montre un phénomène contre-intuitif et permet de situer l'hypothèse fondamentale de l'optique géométrique, soit que la lumière voyage en ligne droite et qu'elle provient des objets lumineux (comme le soleil) et non de l'œil, comme le supposaient certains penseurs de l'Antiquité qui défendaient la théorie du « feu visuel ».

L'expérience en chambre noire (voir tableau démonstration 1)

Cette démonstration est intéressante pour faire vivre l'expérience en chambre noire, comme ont pu le vivre les Alhazen, Kepler ou Newton. Elle permet généralement de susciter chez le participant une vive émotion par l'immersion dans le noir et l'apparition progressive de l'image. Elle démontre qu'une image se forme lorsque la lumière passe à travers un sténopé et qu'elle est inversée. La chambre noire est un montage d'une apparente simplicité qui a pourtant permis des découvertes majeures en optique et en astronomie, et ce, à travers les siècles. Comme cette démonstration demande de l'espace et d'avoir préalablement pris le temps de construire ce dispositif, **les boîtes-sténopés** (voir tableau démonstration 3) pourraient être utilisées pour illustrer ce phénomène de formation d'une image « projetée ».

Le modèle de l'œil (voir tableau démonstration 4)

Ce montage se trouve déjà dans plusieurs établissements scolaires, mais il est possible d'en acheter un chez un fournisseur de matériel scientifique. Ce montage permet de situer la contribution de Léonard de Vinci dans l'élaboration du modèle de l'œil, qui domine encore aujourd'hui. **La boîte coulissante** (voir tableau démonstration 10) pourrait aussi être mise en relation avec ce modèle de l'œil pour parler de la formation d'une image « optique » réelle, c'est-à-dire qui se forme par le passage de la lumière dans une lentille, comme celle se formant sur la rétine de l'œil. Ce montage permet aussi de faire le lien entre un appareil photo et un modèle de l'œil.

C) Quelques pistes sur les idées de science évoquées

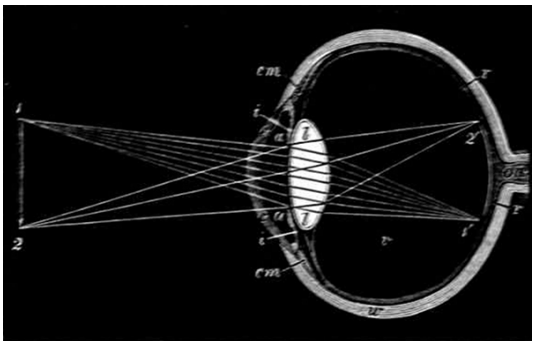
Conceptions communes

- L'idée d'un rayon partant de l'œil pour aller chercher l'information visuelle.
- Image sur l'iris ou le cristallin.

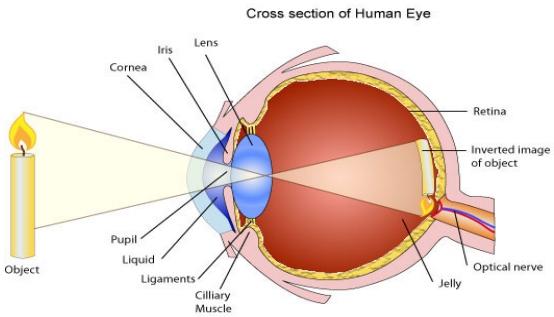
Quelques points d'attention

- L'œil laisse passer la lumière, mais n'émet pas de lumière.
- En l'absence complète de lumière, notre œil ne perçoit absolument rien.
- Trajet de la lumière (source-objet-œil) : la lumière depuis la source lumineuse se diffuse sur l'objet, les rayons entrent dans l'œil et sont réfractés par la cornée, le cristallin et l'humeur aqueuse, l'image est inversée sur la rétine. Il y a formation d'une image optique (une image « réelle » formée par une lentille), image dont l'existence est indépendante de l'observateur. Les rayons lumineux convergent sur une surface, la rétine.

- Comme dans un appareil photo, la lumière qui entre dans l'œil doit passer au travers d'un système de lentilles avant d'atteindre une surface sensible à la lumière (la rétine). Comme l'appareil photo est muni d'un diaphragme, l'œil est muni d'un iris qui contrôle la quantité de lumière qui pénètre par la pupille. Comme pour l'appareil photo, la profondeur de champ (profondeur de mise au point) est supérieure lorsque l'ouverture de la pupille est petite. Donc, plus il y a de lumière, plus l'acuité visuelle sera bonne et plus les objets nous apparaîtront définis.
- À cause de sa forme biconvexe, le cristallin forme une image inversée sur la rétine. Mais le cerveau interprète ces images et il les redresse. Même en portant des lunettes qui renversent de nouveau l'image, le cerveau s'y adapte en moins d'une journée et remet les images à l'endroit.
- La rétine de l'œil a pour tâche de transmettre l'image (la lumière) au cerveau par le nerf optique. Diverses cellules rétiniennes vont transformer l'image en impulsions électriques que le cerveau pourra comprendre. L'image que la rétine transmet au cerveau est étonnante :
    - elle est inversée;
    - elle est presque entièrement monochrome (en noir et blanc);
    - elle est très floue (1/20e de l'acuité centrale);
    - elle présente une zone noire qui correspond à l'extrémité du nerf optique : la tache aveugle;
    - elle est sans cesse en mouvement, car l'œil n'est jamais immobile;
    - elle est nette seulement dans une zone centrale appelée la macula;
    - la macula présente une zone centrale qui analyse la couleur : la fovéa.
- **Attention :** l'œil humain n'est pas une *camera obscura* ou un appareil photo. La vision n'est pas aussi simple qu'un enregistrement de lumière sur un support photosensible. Le cerveau doit donner un sens aux données visuelles que l'œil lui transmet et doit construire une image cohérente de la réalité.



[Source image : http://www.gutenberg.org/files/37589/37589-h/37589-h.htm]



[Source image : http://www.passmyexams.co.uk/GCSE/physics/use-of-lenses-for-correcting-vision-eyesight.html]

D) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles

- Comment voit-on? Comment perçoit-on la lumière? Comment percevons-nous le monde qui nous entoure? Comment se sont construites les théories de la vision?
- Pourquoi a-t-on longtemps comparé un œil à une *camera obscura* ou, de nos jours, à un appareil photo?
- Quelles sont les caractéristiques des images (nature et sens) qui se forment sur la rétine de l'œil?

Fiche 2 : Étude de la lumière, de l'astronomie et *camera obscura*

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de la lumière et de l'astronomie

1. L'optique dans l'Antiquité grecque

Aristote, philosophe de la nature

L'attention que porte Aristote (v. 384 à 322 av. J.-C.) pour l'optique n'est pas séparée de sa passion pour l'astronomie. Par exemple, Aristote affirme qu'on pourra garder le dessin du Soleil et de la Lune saisi à travers n'importe quel orifice. Il fait d'ailleurs une allusion à ce phénomène au milieu de ses trente-huit livres des *Problèmes* : « Tout objet placé en face d'une boîte entièrement fermée et percée d'un trou se reflète, renversé sur le fond de cette boîte. » Aristote fait ici référence davantage au sténopé (petit trou) qu'à la *camera obscura*. Il est fidèle à une pensée fondée sur les données expérimentales, naturalistes, et se distingue ainsi de son maître Platon qui, sur le même sujet, propose une vision mythique de la *camera obscura* comme caverne.

Aristote décrira les interstices entre les feuillages qui font apparaître le reflet (l'image) du Soleil. Il décrira aussi une petite boîte en lien avec ce phénomène, mais il ne mentionnera aucune pièce qui accueille une présence humaine. La *camera obscura* construite à l'échelle humaine n'apparaîtra en effet qu'avec les astronomes arabes. Cela n'empêche toutefois pas Aristote de noter des faits optiques d'importance, comme la propagation de la lumière en ligne droite, qui sera démontrée plus tard par Alhazen. Il s'intéresse aussi aux réflexions et aux miroirs, et démontre ainsi son intérêt pour la science, mais aussi pour les techniques de l'optique.

Euclide (v. 300 av. J.-C.) remarque aussi le phénomène de la propagation de la lumière en ligne droite. Ses remarques à ce sujet, dans son traité *Optique* (v. 300 av. J.-C.), seront d'ailleurs fondamentales pour toute compréhension future de l'image captée, et son traité servira de référence au moment de la Renaissance.

Images du soleil au travers des arbres, dans Cours de physique de A. Ganot, Paris, 1868

2. L'optique au Moyen Âge

Cela dit, même si les conditions théoriques de la *camera obscura* étaient posées avec Aristote et sa théorie de l'intromission[5], il faut attendre le Ve siècle pour voir apparaître une utilisation concrète de ce dispositif dans le monde arabe, principalement pour l'observation des astres. Notons que la *camera obscura* a permis de suivre l'évolution d'une éclipse sans la fixer, en regardant, dans la direction opposée au Soleil, l'image qui se forme sur l'écran. Le premier témoignage d'un tel dispositif, en Europe latine, n'apparaît qu'au début du VIIe siècle. Ce serait des moines, à l'époque gardiens des connaissances, qui se penchent sur le phénomène de la *camera obscura*, à la suite des démonstrations d'Ibn al-Haytam (ou Alhazen). Des démonstrations qui ont le mérite d'articuler pour la première fois la théorie aristotélicienne « intromissionniste » et la pratique qui lui correspond : les expériences en chambres noires.

Les théories d'Alhazen

Ibn al-Haytham (v.965-1041) est considéré comme le père de l'optique moderne. Avec ses recherches en optique, en mathématiques, en physique, en astronomie et en médecine, il développa une méthode scientifique qui le conduisit à faire des expériences sur la propagation de la lumière et des couleurs. La référence la plus explicite dans son œuvre de la *camera obscura* se situe dans son *Traité consacré à l'éclipse*, qui s'interroge sur les rayons lumineux. Il jettera les bases physiques de la vision en termes de rayons lumineux colorés. La précision et la clairvoyance de ses analyses ont valu à *De aspectibus* une popularité croissante en Occident, mais malgré l'intérêt que son œuvre suscite, elle ne sera publiée qu'en 1572 par Friedrich Risner, dans son *Opticae Thesaurus*, qui contribuera à rendre l'enseignement d'Alhazen accessible. Son œuvre influença d'ailleurs aussi bien de Vinci, Della Porta, Huygens que Kepler. Il devint un incontournable pour ceux qui se soucient de la *camera obscura* et plus largement d'optique.

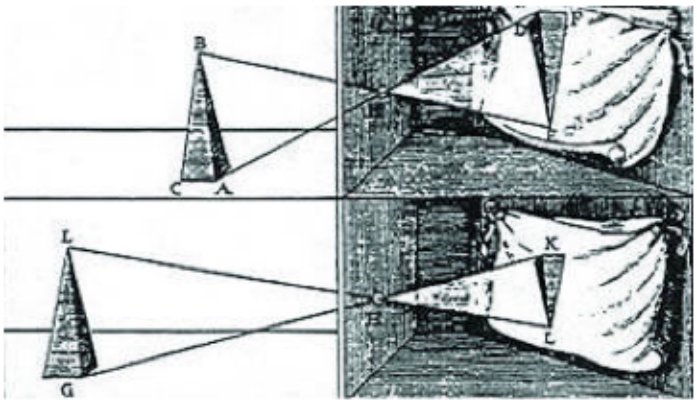
Pour Alhazen, la lumière possède une existence propre. Cela dit, Alhazen ne réalisera pas que la couleur *est* lumière. Pour lui, la couleur n'est qu'une abstraction théorique : plus la structure interne de l'objet est dense, plus la résistance à la lumière est grande. Lumière et couleur pourraient être ainsi comparées à des projectiles lancés à grande vitesse; leur intensité et leur impact sur des surfaces opaques ou transparentes varieraient avec la distance et l'angle de contact (Descartes reprendra aussi cette analogie). La théorie d'Alhazen sur la propagation de la lumière est celle du point par point. Chaque point à la surface de l'objet lumineux serait, selon lui, une source indépendante de rayonnement qui se propage aussi loin que la transparence du médium le permet. Ce qui en résulte est une sphère de propagation continue dans laquelle chaque rayon correspond à une trajectoire rectiligne, au cours de laquelle la *lumen* est transmise.

Alhazen fera aussi d'autres observations, notamment pour répondre au phénomène suivant : comment expliquer que le soleil, vu à travers un trou en forme de petit triangle, apparaisse triangulaire sur l'écran si celui-ci se trouve près du trou, alors qu'il apparaît rond lorsqu'il s'en trouve éloigné? Il répondait en terme de cônes de lumière émanant de façon indépendante de chaque point du corps lumineux, en notant que la forme du disque solaire qui apparaît à une certaine distance de l'ouverture est en fait formée de triangles superposés. Il découvrit aussi une « formule » mathématique sur les conditions à réunir pour obtenir une image distincte d'un objet vu à travers une ouverture circulaire :

$$m_a / m_b \leq d_a / d_b$$

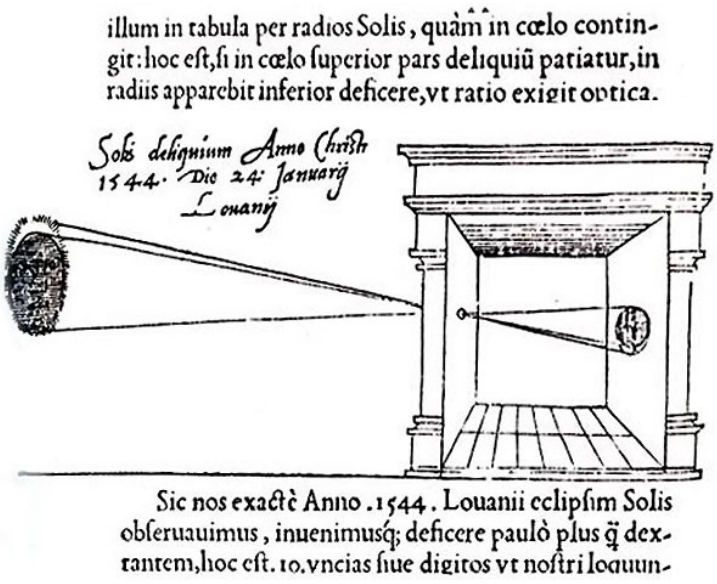
5. Voir à ce sujet la fiche 1 : Étude de la vision, de l'œil et *camera obscura.*

Cela dit, un élément a échappé à Alhazen : l'explication du renversement de l'image. C'est peut-être qu'en tant qu'astronome, il se serait surtout attardé à observer les astres, qui de par leur « sphéricité », apparaissent identiques à l'envers ou à l'endroit. Ce sera Guillaume de Saint Cloud, en 1290, qui remarqua le renversement et précisera que la tache lumineuse est d'autant plus grande que l'écran est éloigné de l'ouverture, et qu'elle est plus faible si l'écran est plus proche.



Jean François Niceron, La Perspective Curieuse, 1652
[Source image : http://www.precinemahistory.net/1650.htm]

On doit à Alhazen le premier usage raisonné de la *camera obscura*. Il fut le premier scientifique à faire l'observation d'une éclipse du soleil et de la lune dans une chambre noire munie d'une petite ouverture. Lors de son expérience, il établit une relation proportionnelle entre le diamètre de l'ouverture et l'objet observé : ce fut la première formule du sténopé. Cette invention de la *camera obscura* n'a pas été aussi éclatante que l'invention de la perspective, et les retombées n'ont pas été ni immédiates ni évidentes, mais elles n'en ont peut-être pas moins transformé notre vision du monde! En effet, il semblerait, selon les écrits d'Alhazen, que ce serait la *camera obscura* qui serait à l'origine de l'observation de la propagation de la lumière en ligne droite. Ce sont les observations astronomiques d'éclipses qu'a réalisées Alhazen qui ont permis de démontrer que c'est le soleil entier qui éclaire, contrairement à une croyance répandue qui voulait que ce soit simplement le centre du soleil qui rayonne. Quand le soleil est partiellement éclipsé et qu'il reste une partie visible, la lumière rayonne depuis cette partie visible. Cette réalité n'est pas manifeste en temps normal. Le moment de l'éclipse permet en quelque sorte de « voir » les lignes droites et de conclure à une théorie du « point par point », comme décrite plus haut, c'est-à-dire qui rayonne de partout et non d'un point privilégié. Alhazen ira jusqu'à décrire cette ligne droite comme ressemblant un peu à un fil qui s'étendrait et qui relierait l'objet à son reflet. Sa remarque est frappante tant elle fait penser à la perspective, inventée quatre siècles plus tard, et qui repose justement sur une sorte de « filature ».

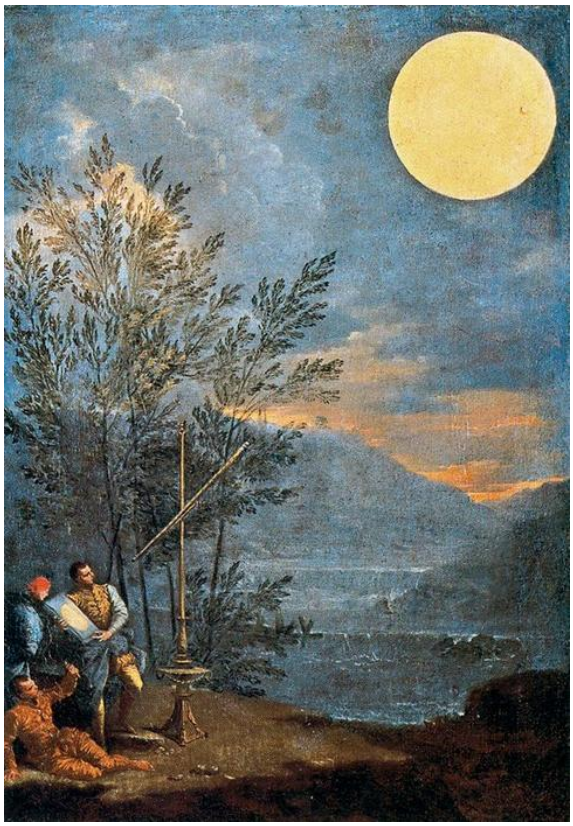


[Source image : http://documentation.flypix.info/LE%20STENOPE/FLYPIX_Document_LE_STENOPE.html]

3. L'optique à la Renaissance

Le rôle de **Léonard de Vinci** (1452-1519) dans la compréhension de l'optique n'est pas négligeable, même si dans ce domaine sa connaissance des maîtres anciens est assez limitée (il avait de la difficulté en latin et accordait un privilège certain aux processus autodidactes!). Cela dit, il renoue avec les astronomes médiévaux lorsqu'il fait, comme eux, usage de la *camera obscura* (ou au moins du sténopé) pour observer les éclipses et les étoiles, en insistant sur la capacité de « filtrage » et d'obscurcissement de ce dispositif.

Kepler (1571-1630) réinventera l'optique en élaborant notamment la théorie rétinienne largement inspirée de sa pratique de la *camera obscura* et restructure les connaissances de l'époque dans son *Optica*, une œuvre en deux parties, terminée en 1603. Pendant ses études en astronomie, Kepler s'initie au système ptoléméen et copernicien avant de devenir l'assistant de Tycho Brahé à la Cour de Prague. Tous deux observent avec fascination les éclipses. Toutes sortes d'appareils sont utilisés dans ce but d'observation, dont la *camera obscura* à laquelle il ajouta des lentilles, ainsi qu'un dispositif similaire qui permettait lui aussi de protéger les yeux du rayonnement solaire, dispositif qui apparaît dans un tableau de Donato Creti, où l'on voit Kepler observer les taches solaires et projeter sur une feuille l'image du soleil capturée au travers d'un long tube dont l'extrémité est percée d'un orifice.



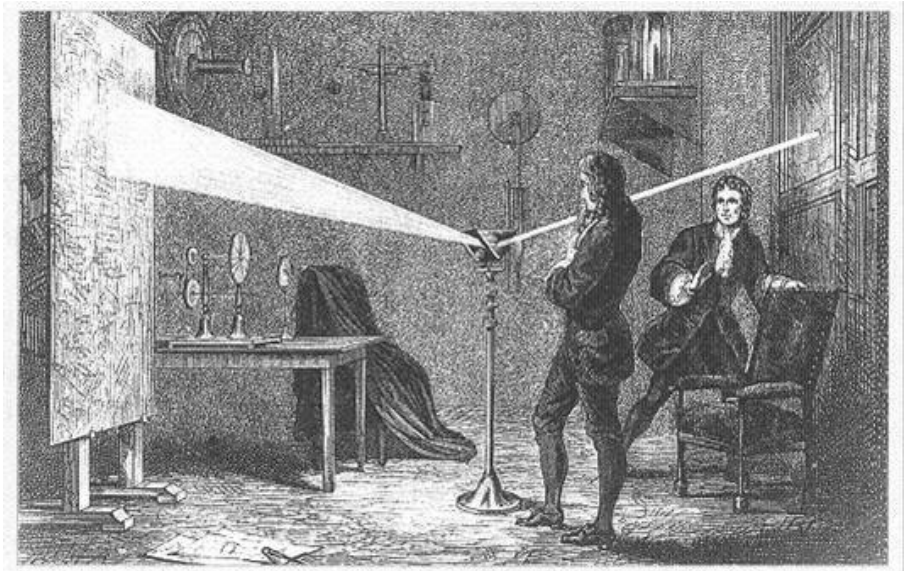
Donaldo Creti, *Observations astronomiques*, 1711. [Source image : http://it.wahooart.com/@@/8LHRN5-Donato-Creti-Osservazioni-astronomiche.-Il-Sole]

L'éclipse représente pour Kepler une source d'inspiration autant scientifique que littéraire. Il diffusera, par exemple, les idées coperniciennes grâce à un récit fantastique d'un voyage sur la Lune.
Par contre, les qualités imaginatives de Kepler ont souvent été passées sous silence par les savants « rationalistes » modernes, qui étaient aveuglés par leur scientisme. Grâce à la *camera obscura* et à la lunette astronomique, Kepler fera des découvertes majeures en optique qui auront des répercussions importantes sur tout un pan de la culture populaire et intellectuelle de l'époque.

Newton (1642-1727), de même que Descartes, était philosophe en plus d'être le physicien, mathématicien et astronome anglais bien connu. Son Traité *Opticks* (1704) sur la lumière et les couleurs est purement expérimental. De nouveau, nous voyons apparaître l'expérience récurrente de la *camera obscura*. C'est cette expérience qui ouvre le traité; c'est dire son importance : « un trait de lumière solaire entre dans une chambre fort obscure par un trou oblong ». Les observations de Newton sont très précises, par exemple au sujet de la pénombre qui se forme autour de l'image dans une *camera obscura*, un trait caractéristique de la vision que sous-tend la chambre noire.

La description de la chambre noire faite par Newton trahit sa qualité d'astronome pour qui prime l'observation du soleil. Son approche très scientifique, avec protocoles d'expériences très rigou-

reux, nous rappelle les expériences d'Alhazen. Les expériences de Newton sont par contre plus sophistiquées qu'au Moyen Âge, car elles font intervenir prisme, télescope, deux trous ou plus, et prennent en compte la diffraction. Cela dit, malgré les siècles, du Moyen Âge à aujourd'hui, la relation astronomie/*camera obscura* fonctionne toujours…



Newton en train de réaliser l'expérience des couleurs (1666). (Gravure du XIXe siècle.)

[Source image : http://www.astroclubmarsan.net/nvxsite/atelierspectro.htm]

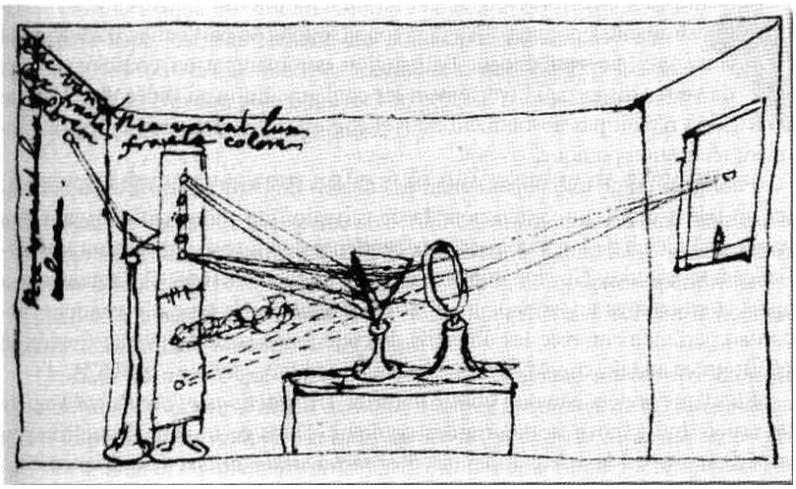
Sur la question des couleurs, certaines idées circulent depuis l'Antiquité : le blanc est associé à la pureté, au Bien, à Dieu, et le noir aux ténèbres et au mal. Même à la Renaissance, la question de la couleur demeure très intrigante pour les chercheurs de l'époque. Il faudra attendre Newton pour que cette conception des couleurs progresse vraiment à cet égard. Et encore! Le « côté noir de la Force » inspire toujours jeunes et moins jeunes! D'autres penseurs, ayant remarqué que la lumière qui traverse un prisme se déploie en arc-en-ciel, croient que la lumière s'altère, se dégrade et s'affaiblit lorsqu'elle traverse un milieu transparent comme le verre. Plus l'épaisseur du verre traversé est grande, plus la lumière perd de sa clarté et de son éclat. Le violet, par exemple, est la couleur la plus déviée et est moins éclatant que le rouge, car l'épaisseur du verre traversée est plus grande, du moins c'est ce qu'on croyait à l'époque jusqu'à ce que Newton soit « forcé » de faire ses expériences en chambre noire.

Cette partie de l'histoire de Newton est d'ailleurs assez surprenante. En 1665, la peste éclate en Europe. L'Université de Cambridge décide alors de renvoyer chez eux les professeurs et les étudiants, dont le jeune Isaac Newton alors âgé de 23 ans. Celui-ci profite donc de ses vacances « forcées » pour s'enfermer dans sa chambre dont les fenêtres étaient complètement obstruées, mais où la lumière ne pouvait pénétrer que par une petite fente pratiquée dans un des volets. Newton va donc réaliser dans sa « chambre noire », avec du matériel très simple, une série d'expériences sur la réfraction et la dispersion de la lumière qui bouleverseront les idées de l'époque sur la lumière qui couraient depuis 1500 ans!

Parmi ces expériences, Newton décide d'isoler à l'aide d'une fente un rayon bleu issu d'un premier prisme et le dirige vers un second afin de vérifier ce qui arrive à ce faisceau de lumière d'une seule couleur. Selon la théorie aristotélicienne, la couleur bleue aurait dû « s'affaiblir » au cours du passage dans le deuxième prisme, pour se rapprocher du violet ou du noir. Cependant, ce n'est pas ce que Newton observa à son grand étonnement : la couleur bleue est restée la

même. Il y avait donc quelque chose qui clochait dans la théorie sur la lumière qui était alors reconnue. Il poursuivit donc ses expériences et fit passer à travers un second prisme, inversé par rapport au premier, tous les rayons dispersés. Il se retrouva avec un faisceau de lumière blanche en recombinant de la lumière prétendument dégradée. Le faisceau avait retrouvé sa pureté initiale; autrement dit, Newton a mélangé de l'impur pour obtenir de la pureté… Peu de temps avant, Galilée avait eu très chaud pour moins que cela!

Ainsi donc, même si ses travaux apportent des éclaircissements majeurs sur le comportement et la composition de la lumière, Newton attendra plus de six ans avant d'en divulguer les résultats dans sa correspondance avec Oldenburg (1672). Par contre, il ne publiera ses découvertes qu'en 1704 dans son fameux traité *Opticks*. À 23 ans, Newton n'est pas encore le grand NEWTON, et il était risqué pour lui de contester les théories sur les couleurs ayant cours depuis des siècles…



Dessin réalisé par Newton où il illustre le dispositif qu'il a utilisé pour faire ses expériences.
[Source image : http://steph923.free.fr/newton/optique.htm]

B) Les montages de démonstration pouvant être associés à cette fiche

Sur le thème de la compréhension de la lumière, notamment en lien avec l'observation de certains phénomènes astronomiques comme les éclipses, plusieurs démonstrations pourraient être utilisées pour illustrer l'une ou l'autre des idées évoquées. Les caractéristiques des montages, incluant une photo, ainsi que leur utilisation sont détaillées dans le tableau des démonstrations présenté en annexe. Voici celles que nous proposons.

Les trois cartons perforés (voir tableau démonstration 2)

Cette démonstration constitue un excellent déclencheur. Elle montre un phénomène contre-intuitif et permet d'illustrer un des premiers dispositifs de l'histoire qui a permis d'observer le soleil, ou du moins une image de celui-ci. Cette démonstration pourrait aussi permettre, par exemple, de mesurer le diamètre du soleil en classe grâce aux proportions de triangles semblables.

$$\frac{Hauteur\ de\ l'objet}{Distance\ de\ l'objet} = \frac{Hauteur\ de\ l'image}{Profondeur\ de\ la\ chambre\ noire}$$

L'expérience en chambre noire (voir tableau démonstration 1)

Cette démonstration est intéressante pour faire vivre l'expérience en chambre noire, comme ont pu le vivre les Alhazen, Kepler ou Newton. Cette démonstration permet généralement de susciter chez le participant une vive émotion par l'immersion dans le noir et l'apparition progressive de l'image. Une telle chambre noire aurait permis d'observer les éclipses et les taches solaires, par exemple. Ce montage permet aussi de distinguer la différence entre une image « projetée » (formée par le passage de la lumière dans un sténopé) et une image « optique » (formée par la focalisation de la lumière par une lentille). Comme cette démonstration demande de l'espace et

d'avoir préalablement pris le temps de construire ce dispositif, **la boîte-sténopé** (voir tableau démonstration 3) et la **boîte coulissante** (voir tableau démonstration 10) pourraient aussi être utilisées pour illustrer ces phénomènes de formation d'images.

La boîte de projection « Batman » (voir tableau - démonstration 6)

Ce montage permet d'illustrer les caractéristiques de l'image « projetée » lorsque la lumière passe à travers un sténopé. Il est possible d'observer comment certains paramètres font varier la résolution et la taille de l'image projetée sur un écran. Il est possible de faire varier :

- Le diamètre du sténopé;
- La distance entre l'écran et le sténopé;
- La distance entre l'objet lumineux et le sténopé.

C) Quelques pistes sur les idées de science évoquées

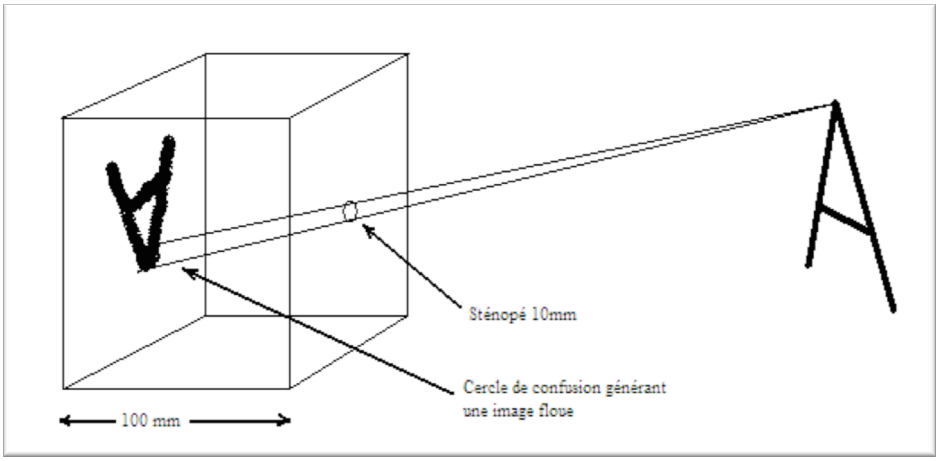
Conceptions communes

- La projection sera du même sens que l'objet. (L'inversement de l'image sur la rétine a été difficile à expliquer et long à accepter.)
- L'image d'un objet voyage comme un tout. (En cachant une partie de la lentille, on devrait perdre une partie de l'image.)

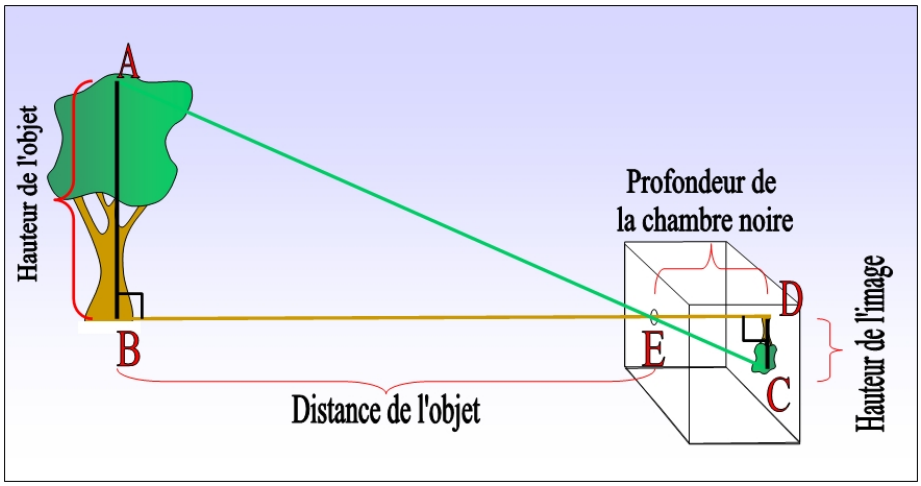
Caractéristiques de l'image formée avec un sténopé

- La définition (ou résolution) de l'image « projetée » dépend du diamètre d'ouverture du sténopé. Un sténopé trop étroit ne laissera pas passer suffisamment de lumière ou produira une figure de diffraction. Un sténopé trop large créera une projection intense, mais la résolution sera faible, puisque les cônes de lumière sont (trop) larges.
- **Attention :** le sténopé fournit une représentation ou projection de l'objet, et non pas une « image optique » comme on l'entend généralement en physique. Le sténopé laisse passer un cône de lumière issu de chaque point de l'objet. La projection de cet objet sur l'écran est produite par la superposition des cercles de confusion ou cônes de lumière diffusés par chaque point de l'objet; ce n'est donc pas une « image optique ».
- Ce dispositif permet de voir le mouvement, soit une « image » (ou projection) de l'extérieur en temps réel et d'illustrer le phénomène de la propagation de la lumière en ligne droite.
- De façon générale, ce dispositif atténue l'intensité lumineuse de la scène; il est donc idéal pour observer une scène ou un objet très éclairé, comme le soleil. La luminosité de l'image est inversement proportionnelle au carré de la distance trou-écran. Sur un écran plat, il y aura moins de lumière en périphérie. Pour une intensité plus uniforme, l'écran doit décrire un cercle autour du sténopé.
- La taille de la projection est proportionnelle à la distance sténopé-écran. La tache lumineuse est d'autant plus grande que l'écran est éloigné de l'ouverture, et elle est plus petite si l'écran est proche.
- La taille de la projection est inversement proportionnelle à la distance objet-sténopé. Si l'objet est éloigné du sténopé, la projection de cet objet apparaîtra petite sur l'écran. Inversement, si l'objet est près, il apparaîtra grand sur l'écran.
- Un grand angle de vue (110 degrés) est limité par la qualité du sténopé, surtout par son épaisseur (perte d'intensité aux grands angles, vue de la fermeture relative de l'ouverture).
- La qualité de la projection dépend donc de la qualité du sténopé.
- Il n'y a pas de déformation optique (aberration).

- La profondeur de champ est infinie, donc il n'y a aucune mise au point à faire.
- Sans écran, on ne peut pas voir l'image.



[Source image : http://www.servicecamerapro.com/f-lens.html]



[Source image : http://bv.alloprof.qc.ca/physique/generalites-en-physique/les-phenomenes-lumineux/les-appareils-optiques/le-stenope-et-la-chambre-

D) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles

- Quelles sont les différences entre une image « projetée », produite par un sténopé, et une image « optique », formée par une lentille?
- D'où vient la lumière? Qu'est-ce qu'est la lumière?
- Qu'est-ce que la couleur? D'où viennent les couleurs des objets que l'on observe?

Fiche 3 : Perspective, art et *camera obscura*

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de la perspective et des liens avec l'art

1. Les origines de l'idée de perspective

Chez les Grecs, on ne peut pas employer le terme de « perspective » à proprement parler, car c'est une invention de la Renaissance. On peut noter cependant que l'« optique » est chez les Grecs un domaine assez constitué. La philosophie de l'époque était d'abord théorique, mathématique. Seul Aristote accordait plus d'importance à la nature et à l'expérience qu'aux idées. Aristote est fidèle à une pensée fondée sur les données expérimentales, naturalistes, et se distingue ainsi de son maître Platon, qui propose une vision « mythique » et mathématique du monde. Comme pour Euclide, l'optique est mathématique, mais elle est aussi technique. Chez Euclide, nous retrouvons une théorie de la vision alliée à la notion de la réalité des formes géométriques. Les lignes délimitent un champ de vision comme si elles étaient des rayons réels. On doit à Euclide l'image de la « pyramide visuelle ». Pour celui-ci, les rayons se rejoignent pour former un « cône visuel » dont la pointe se situe dans l'œil (comme origine du flux, mais sans localisation précise) et la base, dans le champ de la vision. Cette image de la « pyramide visuelle » est évidemment centrale dans la construction de l'idée de perspective, bien qu'il faudra attendre la Renaissance pour son « invention » dans le champ artistique. Ptolémée fait d'ailleurs une observation pertinente dans le champ artistique lorsqu'il remarque que les peintres de fresques utilisent des couleurs plus claires pour représenter les objets lointains[6].

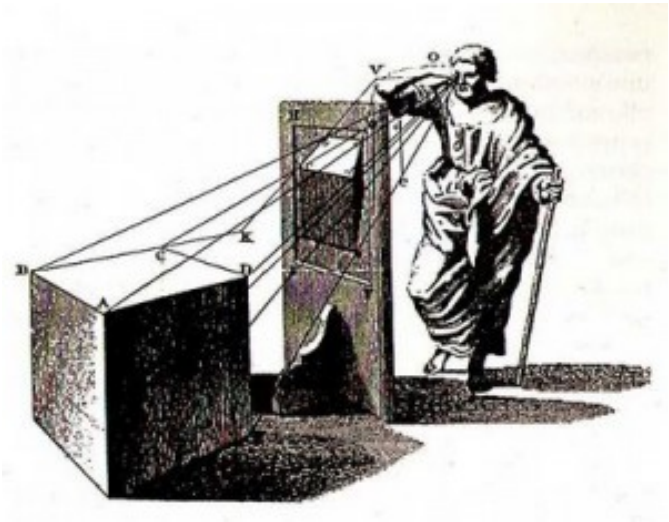


Image de la « pyramide visuelle ». [Source image : http://arpc167.epfl.ch/alice/WP_2010/studioguaita/?cat=42&paged=4]

L'optique médiévale, parce qu'elle est plus centrée sur l'observation et l'expérience que l'optique grecque, et qu'elle invite à l'utilisation de différentes techniques et de différents appareils, jouera un rôle éminent dans le développement d'un pan important de l'art occidental, surtout hollandais, dès la Renaissance. Les observations d'Alhazen sur le moment de l'éclipse lui ont permis en quelque sorte de « voir » les lignes droites et de conclure à une théorie du « point par point »[7], c'est-à-dire qui rayonne de partout et non d'un point privilégié. Alhazen ira jusqu'à décrire cette ligne droite comme ressemblant un peu à un fil qui s'étendrait et qui relierait l'objet à son reflet. Une remarque qu'il a tenu et qui est frappante tant elle fait penser à la perspective, inventée quatre siècles plus tard, et qui repose justement sur une sorte de « filature ».

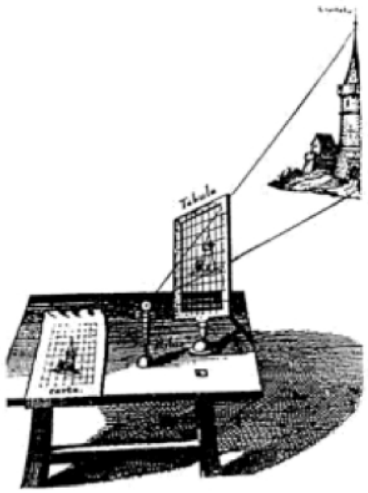
6. Notons toutefois que la perspective atmosphérique, proprement dite, n'est pas encore inventée à cette époque, bien que certaines intuitions concernant la perception des distances s'en approchent.
7. Comme décrite dans la fiche 2 : Étude de la lumière, de l'astronomie et *camera obscura*.

2. L'invention de la perspective

La *perspectiva artificialis*[8], inventée au XVe siècle par Brunelleschi et Alberti, va révolutionner la vision du monde, la conception de l'espace, et marquer une rupture radicale avec le Moyen Âge. Perçue comme emblématique de la Renaissance, elle concernera tous les domaines de la pensée, principalement la peinture et l'architecture, mais aussi la géométrie et la philosophie. La perspective[9] est donc une invention qui a comme enjeu de donner le sentiment de profondeur de l'espace sur une simple surface. Elle n'a pas grand-chose en commun avec l'optique, ou perspective naturelle, tel qu'on a pu la découvrir dans les travaux antiques et médiévaux.

Gentile da Fabriano, *Vierge et l'enfant sur trône*, v. 1395-1400. [Source image : http://www.insecula.com/oeuvre/O0032677.html]

La perspective « troue » l'espace. Deux dimensions doivent suffire à donner la sensation de la troisième, le sentiment d'ouverture et d'infini, ce que cherchaient peut-être à représenter les fonds d'or opaques des peintures du Moyen Âge, bien que cet « infini » n'était pas l'espace (qui est propre à la perspective), mais bien Dieu.



Robert Fludd, *Une peinture comme une coupe transversale de la pyramide visuelle*, 1618

La peinture est à la fois un donné (la nature) et un réel de l'homme construit. Alberti dira qu'« aucune chose peinte ne peut paraître égale à une chose vraie, si celle-ci n'est pas à une distance spécifique. » Il faisait ici référence aux lois de la perspective. Alberti établit une quasi-égalité entre peinture et réel, et il parle des « miracles de la peinture », qui seraient probablement associés à l'image de la *camera obscura* qu'Alberti utilisera comme instrument de « démonstration » de la perspective. Ses démonstrations ont été décrites par plusieurs comme étant, dans l'art de peindre, « des choses inouïes et incroyables pour ceux qui les virent exécuter. Il les leur montrait, enfermé dans une boîte, par un petit trou[10]. » Il semble qu'elles étaient si bien faites que les profanes craignaient d'observer des choses vraies et naturelles et non des choses peintes.

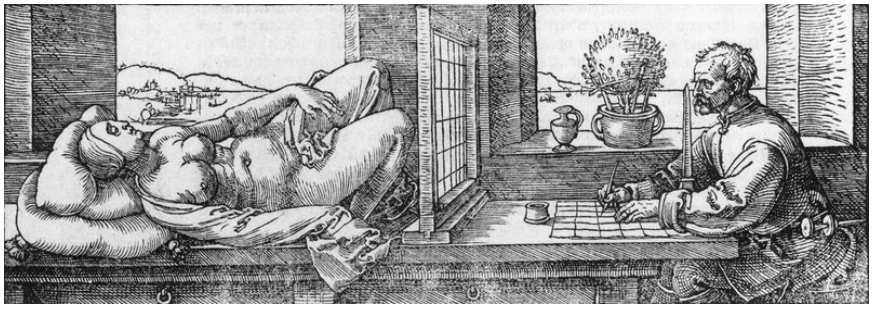
De son côté, Brunelleschi fit aussi des démonstrations avec la perspective qui ont contribué à redéfinir la conception du monde, qui n'était alors plus *lisible* comme la Bible du Moyen

8. La perspective des peintres, qui se différencie de la *perspectiva naturalis*, celle de l'optique antique et médiévale. Il est d'usage de définir la *perspectiva artificialis* comme « perspective » tout court, et la seconde par « optique » traditionnelle.
9. Par exemple, les perspectives axonométrique, cavalière ou orthogonale.
10. Description faite par A. Bonucci dans la *Vita anonima*, 1843.

Âge, mais *visible*. Ses expériences avec la *camera obscura* tendent par contre à « montrer » plutôt qu'à « démontrer » au sens mathématique. Son expérience est plutôt expérimentale et ouvre la porte à une démonstration géométrique en bonne et due forme.

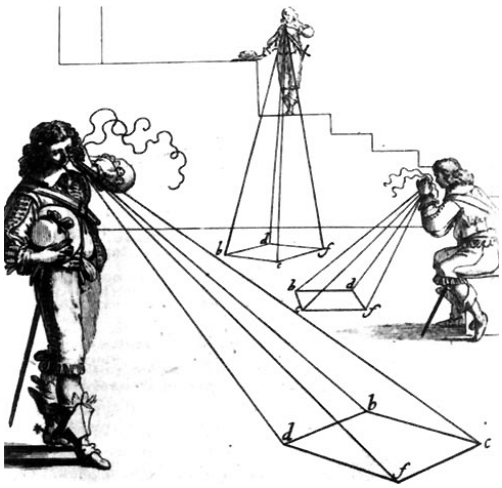
La peinture est décrite par Alberti comme une section du cône visuel, ou l'image de la « pyramide visuelle », qui a sa pointe dans l'œil, sa base étant ce que l'on voit. Entre la pointe et la base, les « rayons visuels » tissent une pyramide. Il en est d'ailleurs de même pour l'image de la *camera obscura* qui intercepte les rayons visuels sur le plan de son écran et forme ainsi une peinture « naturelle ». La nature de la peinture perspective est donc « textile », comme son support privilégié qui est la toile, un assemblage de fils.

Cette gravure de Dürer atteste la contrainte de la technique de la perspective, qui montre le peintre pris dans un véritable carcan, restreint à dessiner les contours du modèle devant lui en le considérant à travers un écran transparent et quadrillé, l'œil rivé à un viseur. Cette technique pour peindre la perspective nécessite une grande fixité, voire une immobilité totale, car elle n'autorise qu'une coupe à la fois.



Albrecht Dürer, *Le dessinateur de la femme couchée*, v. 1525. [Source image : http://sites.univ-pro-vence.fr/pictura/GenerateurNotice.php?numnotice=A4426]

Saussure dira de la perspective que c'est un système serré, un réseau très dense de contraintes, mais qui n'en autorise pas moins une nouvelle liberté. Les « perspecteurs » peuvent évoluer à leur gré sur le terrain en promenant leur propre « pyramide visuelle ».



La construction perspective donne une définition plus minimaliste de la peinture : point, ligne, surface, ce qui correspond au plan-section de la pyramide visuelle. La force et la nouveauté de cette définition, c'est qu'elle est pragmatique : elle écarte les considérations symboliques, philosophiques, poétiques, qui risquaient de faire un retour au Moyen Âge en accordant un privilège au sens et non aux formes :

- le point est un signe qui ne peut être divisé;
- les points liés sont une ligne;
- plusieurs lignes réunies, comme les fils d'une toile, forment une surface.

Abraham Brosse, *Manière universelle de M. Desargues de pratiquer la perspective*, 1648.
[Source image : http://usfarcdstudio2spr2011.blogspot.ca/2011/02/images-for-constructing-with-lines.htm]

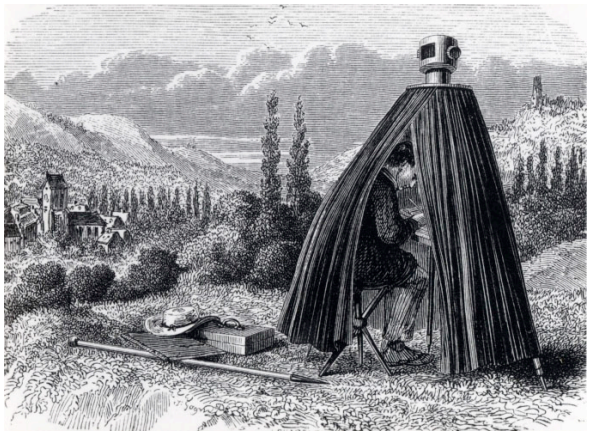
Si la perspective a bien été inventée par Alberti et Brunelleschi, elle atteindra des sommets avec Léonard de Vinci (1452-1519) qui, à la fois, peintre, ingénieur et philosophe, n'établit pas de séparation nette entre art et technique, science et observation. Léonard constatera aussi que la seule perspective linéaire est insuffisante pour représenter le réel, et fait donc intervenir la perspective atmosphérique comme moyen de rendre compte de la transformation des couleurs dans le lointain, de la perte de netteté des objets. La recherche de Léonard de l'éclairage idéal, pour l'œil et la peinture, celui d'un demi-jour diffus, coïncide avec ses travaux sur la pupille. Sa perspective est donc loin d'être uniquement albertienne. Sa peinture est d'ailleurs pleine de clairs-obscurs, comme la Vierge aux Rochers, qui laisse deviner sa fascination pour les grottes, ces chambres noires…

Léonard de Vinci, La Vierge aux rochers, v. 1483-1486.
[Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/La_Vierge_aux_rochers]

3. La *camera obscura* et l'art hollandais au XVIIe siècle

Si les Italiens sont les « inventeurs » de la perspective dans leurs peintures, il est intéressant de montrer que, à la suite de Kepler, la *camera obscura* est devenue l'appareil de la peinture hollandaise. La *camera obscura* n'a pas besoin de tout un attirail pour émerveiller : elle le fait pour ainsi dire par elle-même. C'est cette simplicité qui séduit les Hollandais. La *camera obscura* serait l'expérience type de l'art hollandais à « l'âge de l'observation ». La nouvelle esthétique hollandaise s'appuie sur le principe de la *camera obscura*, qui est différent de la perspective « artificielle ». Elle renvoie à une vision du monde fondée sur la géométrisation de l'espace, mais aussi sur sa pure visibilité. La perspective et la *camera obscura* ont par contre ceci en commun : elles rompent avec la théologie médiévale et ouvrent toutes deux sur un espace, non pas sacré, mais objectivable, physiquement et mathématiquement.

La « peinture » de la *camera obscura* a la particularité d'être beaucoup plus mouvante et souple que celle des « perspectivistes ». Plus on recule, plus on voit de « gros plans » et inversement. On peut donc naviguer et s'arrêter sur des détails, un mode de vision qui semble davantage s'approcher de « la vision naturelle », qui est plus mobile. L'image qu'elle produit se situe donc entre peinture et projection cinématographique, à cause du mouvement et de la durée qu'elle introduit.



Camera obscura portative pour dessein, 1868.
[Source image : http://www.endlesslines.free.fr/ghost/ghostpages/ghostchasselon1.htm]

Au XXe siècle, avec l'avènement de la photographie, beaucoup de commentateurs compareront la peinture de Vermeer (1632-1675) avec une image photographique. L'usage de la *camera obscura* chez Vermeer n'est pas totalement prouvé, mais certains effets de sa peinture nous

Johannes Vermeer, *Vue de Delft*, v. 1660-1661. [Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/Delft]

permettent d'émettre de sérieuses hypothèses quant à son utilisation. La majorité des historiens s'accordent d'ailleurs pour dire que Vermeer a bien utilisé une *camera obscura*, sans que cela enlève quoi que ce soit à son génie. La liberté avec laquelle Vermeer modifiait les effets optiques de ses sujets nous porte cependant à croire qu'il ne calquait pas l'image de la *camera obscura*. Dès lors, on peut considérer *Vue de Delft*, non pas comme une « copie » réalisée à l'aide d'une *camera obscura*, sorte de document nécessairement neutre, mais comme une réalisation de la liaison nature/artifice. Où se situe ce tableau? Il semble être aux confins du monde perçu et du monde présenté. Il semblerait que les minuscules gouttelettes de peintures dans plusieurs œuvres de Vermeer, comme *Vue de Delft*, soient des équivalents peints des « zones de confusions », c'est-à-dire les cercles de lumière diffuse qui entourent dans l'image de la chambre noire les clairs spéculaires mal définis. On soupçonne de plus l'existence d'une maison en face du port, où Vermeer aurait pu installer sa *camera obscura* et obtenir une vue semblable à celle du tableau, une hypothèse renforcée par de récentes projections scientifiques.

Vermeer, tout comme son contemporain Huygens, préfère le concret et l'expérience à la philosophie (contrairement aux autres figures marquantes du XVIIe siècle que sont les Galilée, Descartes, Leibniz, Newton ou Pascal) et apprécie, ce qui est très hollandais, l'intimité de son foyer, de son mariage, qui est pour lui l'image centrale de la vie, puisque même les implications de la science nouvelle sont presque toujours rapportées à l'image de la maison. Ces images de l'intérieur sont très présentes dans l'art hollandais : c'est là que l'expérience est reçue et assimilée. La coutume voulait d'ailleurs que l'on décore les murs avec des cartes du monde. Les peintures de Vermeer en montrent beaucoup, une façon d'introduire l'univers dans sa demeure, à la manière de ce qui se passe dans la *camera obscura*.

Avec Léonard, la *camera obscura* avait acquis un statut pictural, mais restait un instrument d'observation soumis aux lois perspectivistes. Avec Vermeer, elle se libère de la tutelle de la perspective et impose désormais ses qualités propres. Si dans la peinture de Léonard elle se présentait sous un jour inquiétant de l'univers des grottes, elle se montre avec Vermeer comme un lieu d'intimité et de sérénité.

4. La *camera lucida,* un autre instrument optique utilisé dans la peinture

La *camera lucida* est un prisme fixé à une tige, qui crée l'illusion, sur le papier placé dessous, de l'image qui se trouve devant nous. Cette image n'est pas réelle, car elle n'est pas effectivement projetée sur le papier, mais elle semble être là. Contrairement à une projection dans une *camera obscura*, ici seul l'artiste placé dans la bonne position peut voir l'image.

William Hyde Wallaston, Camera lucida, 1806. [Source image : http://www.yfyddin.freeserve.co.uk/familytree/newsletters/wollaston_biog.htm]

Ingres, Portrait de Mme Louis-François Godinot, 1829.
[Source image : http://www.meishujia.org/a.php?i=160]

Ingres aurait d'ailleurs utilisé une « chambre claire » pour réaliser portraits et dessins. Par exemple, dans le *Portrait de Mme Louis-François Godinot*, on s'aperçoit que la tête est très grande par rapport au corps, notamment les épaules et les mains. Ingres aurait probablement déplacé la *camera lucida* pour inclure les vêtements, qui n'avaient pas pu l'être lors du dessin du visage, et cela a provoqué une variation d'agrandissement.

Cela dit, Ingres a aussi assisté à l'invention du procédé de fixation de l'image projetée sur le verre, puis sur le papier, appelé dès lors « photographie ». Considérée comme le « crayon de la nature », elle représente le monde visible tel que nous pensons le voir et domine de plus en plus les représentations…

B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche

Sur le thème de la perspective et de l'utilisation de la *camera obscura* dans les arts, notamment en peinture, plusieurs démonstrations pourraient être utilisées pour illustrer l'une ou l'autre des idées évoquées. Les caractéristiques des montages, incluant une photo, ainsi que leur utilisation, sont détaillées dans le tableau des démonstrations présenté en annexe. Voici celles que nous proposons.

La *camera obscura* avec rétroprojecteur (voir tableau - démonstration 7)

Le montage de cette démonstration est extrêmement simple et permet d'utiliser les anciens rétroprojecteurs, peu utilisés maintenant depuis l'intégration des projecteurs informatiques dans les classes. Cette démonstration permet au participant de vivre « une expérience artistique à la Vermeer » et de réaliser un croquis de l'image réelle qui se forme sur la feuille.

La *camera lucida* (voir tableau - démonstration 8)

Cette démonstration permet ici aussi de « vivre une expérience artistique ». La différence réside dans la nature de l'image, qui est virtuelle dans ce cas-ci et qui se fait en clarté.

La *camera obscura* – réplique en bois (voir tableau - démonstration 9)

Ce montage est une réplique de la *camera obscura* d'époque, qui aurait pu être utilisée pour dessiner ou pour prendre une photographie, puisqu'elle ressemble au premier daguerréotype. Avec cet objet, il serait possible de décrire le trajet des rayons lumineux et la formation d'une image réelle, formée par un objet virtuel.

La caméra-sténopé (ou photographie-sténopé) (voir tableau démonstration 11)

Cette démonstration a toujours un effet saisissant pour les participants. Il s'agit d'utiliser une boîte simplement percée d'un petit trou pour prendre le groupe en photo. Par contre, il faut disposer d'une chambre noire ou d'une pièce très obscure pour effectuer le développement. De nombreux prolongements seraient possibles en lien avec l'idée de la photographie. Ceux-ci sont présentés dans le tableau en annexe.

C) Quelques pistes sur les idées de science évoquées

Caractéristiques de l'image formée avec une lentille

- L'image obtenue avec les lentilles peut avoir différentes caractéristiques. Les images obtenues avec les différents montages comportant une lentille sont réelles et inversées.
- L'image réelle se forme à un endroit précis, en fonction de la longueur focale de la lentille utilisée. Il faut donc faire une mise au point pour obtenir une image nette, en fonction de la distance de l'objet observé, comme on le fait avec un appareil photo.

D) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles

- Quelles sont les caractéristiques (nature, sens, taille et position) des images formées par les répliques de la *camera obscura* que les artistes d'une autre époque auraient pu utiliser?
- Quelles sont les caractéristiques de l'image formée par la *camera lucida*?
- De quelle manière serait-il possible de déterminer la focale des lentilles utilisées?
- Qu'est que l'aberration d'une lentille et comment cela influence l'image obtenue?

Fiche 4 : Image, observation et *camera obscura*

A) Éléments historiques pour mieux comprendre l'évolution des idées sur le thème de l'image et de l'observation

1. L'optique et « l'observation de la nature » chez les Grecs

La philosophie à l'époque de l'Antiquité était d'abord théorique et mathématique. L'« optique » est chez les Grecs un domaine assez constitué. Notons qu'Aristote (v. 384 à 322 av. J.-C.) est l'un des seuls de son époque à accorder plus d'importance à la nature et à l'expérience qu'aux idées, contrairement à Euclide (v. 300 av. J.-C.) pour qui l'optique est mathématique, mais qui est aussi technique. Malgré tout, cette optique technique ne s'est que très peu développée, en raison peut-être d'une certaine méfiance vis-à-vis de ce qui déforme ou « trompe la vue » comme les lentilles, et ce, même si les lunettes n'ont pas encore été inventées.

Par exemple, Ptolémée (v. 90 à 168) aborde certains problèmes philosophiques lorsqu'il parle de la couleur. Pour lui, comme pour Aristote, la couleur est une propriété objective des corps physiques et elle leur est inhérente. La question de la subjectivité est posée, les images n'ayant aucune existence en dehors d'un sujet percevant, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de vision en dehors d'un observateur et d'un point de vue. Ce serait pourquoi les images optiques (celles produites par les miroirs par exemple) sont virtuelles, nombre d'entre elles étant le produit de l'illusion ou de l'erreur de jugement. Le discernement et la raison sont là pour rectifier ces erreurs de perception de façon à ce que l'image ultime soit véridique. Les images qui résultent du processus visuel sont donc subjectives ; elles sont comme une peinture en attente de son interprétation. Bref, Ptolémée, comme plusieurs autres, considère que l'image obtenue par des instruments d'optique (comme la *camera obscura*) qui nous font voir l'objet « où il n'est pas », sous une forme et avec des couleurs qui ne sont pas exactement les siennes, causent une vision « mensongère et faussée ».

2. Les théories d'Alhazen et l'observation au Moyen Âge

Ibn al-Haytham (v. 965-1041), aussi dit Alhazen, est considéré comme le père de l'optique moderne. Avec ses recherches en optique, en mathématique, en physique, en astronomie et en médecine, il développa une méthode scientifique qui le conduisit à faire des expériences sur la propagation de la lumière et des couleurs. On dit souvent qu'il fut à l'origine de la « méthode expérimentale » en science, qui traversa les siècles. L'optique médiévale, parce qu'elle est plus centrée sur l'observation et l'expérience que l'optique grecque, et qu'elle invite à l'utilisation de différentes techniques et de différents appareils, renvoie à une vision du monde fondée sur la géométrisation de l'espace, mais aussi sur sa pure visibilité.

Rappelons que sur le plan de l'optique, on sort d'une période de stagnation intellectuelle longue de plusieurs siècles. Le Nouveau Monde chrétien, qui succède à la culture païenne, coupé des sources auxquelles il avait jusqu'alors accès, mêle encore apparitions magiques, philosophie, théologie et superstition. Par exemple, Boèce subira un procès en sorcellerie et sera décapité pour avoir provoqué des apparitions, sûrement dues à un procédé du type *camera obscura*. Des apparitions qui sont perçues comme diaboliques, mais qui suscitent aussi la fascination. La *camera obscura* de l'époque s'inscrit dans la vision théologique du monde qui domine tout le Moyen Âge et qui divinise la lumière.

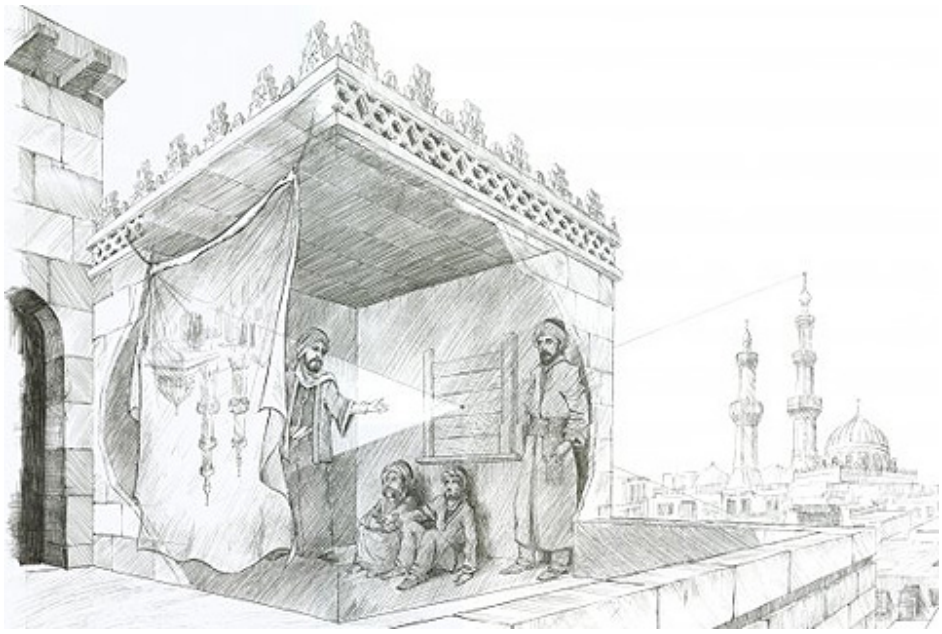


Illustration d'une utilisation de la camera obscura, auteur et date inconnue.
[Source image : http://www.1001inventions.com/node/271]

La méthode d'Alhazen est inductive et très largement empirique : on y trouve peu d'hypothèses et de déductions, sauf celles qui concernent la géométrie de l'œil, un peu idéalisée, puisque le cristallin est censé sélectionner les rayons. C'est une méthode qui répond à une logique certaine, quasi mathématique, mais toujours basée sur des expérimentations. Ce style se retrouvera d'ailleurs dans l'Optique de Newton, qui mènera de nombreuses expériences sur la lumière dans des conditions plus ou moins artificielles et construites. On doit à Alhazen le premier usage raisonné de la *camera obscura*. Il fut le premier scientifique à faire l'observation d'une éclipse du soleil et de la lune dans une chambre noire munie d'une petite ouverture. Il apparaît que pour lui, la *camera obscura* reste un dispositif dédié aux démonstrations scientifiques. Avec Alhazen, nous rompons avec l'optique conçue seulement théoriquement. Désormais, la preuve doit être mathématique et expérimentale. Notons toutefois que pour Alhazen, la fonction de l'œil est d'être affecté par le mélange de couleur et de lumière qui le touche. Comme son prédécesseur Ptolémée, il considère que la construction des images optiques est intentionnelle, c'est-à-dire dépendante d'un observateur, et que c'est l'âme qui contrôlerait le cerveau, source ultime de la vision.

3. La représentation du réel et l'invention de la perspective

La *perspectiva artificialis*[11], inventée au XVe siècle par Brunelleschi et Alberti, va révolutionner la vision du monde, la conception de l'espace, et marquer une rupture radicale avec le Moyen Âge. Perçue comme emblématique de la Renaissance, elle concernera tous les domaines de la pensée, principalement la peinture et l'architecture, mais aussi la géométrie et la philosophie. Alberti établit une quasi-égalité entre peinture et réel, et il parle des « miracles de la peinture », qui seraient probablement associés à l'image de la *camera obscura* qu'Alberti utilisera comme instru-

11. La perspective des peintres, qui se différencie de la *perspectiva naturalis*, celle de l'optique antique et médiévale. Il est d'usage de définir la *perspectiva artificialis* comme « perspective » tout court, et la seconde par « optique » traditionnelle.

ment de « démonstration » de la perspective. Il semble qu'elles étaient si bien faites que les profanes craignaient d'observer des choses vraies et naturelles, et non des choses peintes. De son côté, Brunelleschi fit aussi des démonstrations avec la perspective qui ont contribué à redéfinir la conception du monde, qui n'était alors plus *lisible* comme la Bible du Moyen Âge, mais *visible*. Ses expériences avec la *camera obscura* tendent par contre à « montrer » plutôt qu'à « démontrer » au sens mathématique. Son expérience est plutôt expérimentale et ouvre la porte à une démonstration géométrique en bonne et due forme. La perspective et la *camera obscura* ont donc ceci en commun : elles rompent avec la théologie médiévale et ouvrent toutes deux sur un espace, non pas sacré, mais objectivable, physiquement et mathématiquement. Envisagée sous un jour nouveau, la *camera obscura* contribuera ainsi à repenser le rapport entre réel et représentation. Cette nouvelle façon d'appréhender le monde aura des conséquences scientifiques et philosophiques majeures…

De son côté, Léonard de Vinci (1452-1519) qui est à la fois peintre, ingénieur et philosophe, n'établit pas de séparation nette entre art et technique, science et observation. Le rôle de Léonard de Vinci dans la compréhension de l'optique n'est pas négligeable, même si dans ce domaine sa connaissance des maîtres anciens est assez limitée (il avait de la difficulté en latin et accordait un privilège certain aux processus autodidactes!). Pour de Vinci, la *camera obscura* reste un instrument de « raison », soit un moyen de reproduction fidèle d'objet situé à une certaine distance, et ce, même si l'objet est renversé. C'est donc un appareil qui vise à atteindre la plus grande objectivité, un peu comme le miroir qui adopte toujours la couleur de ce qu'il regarde. Avec Léonard, la *camera obscura* a acquis un statut pictural, mais restait un instrument d'observation soumis aux lois perspectivistes.

Bien que de Vinci ait associé l'œil à la *camera obscura*, il est intéressant de noter qu'il refusera l'idée de l'image renversée sur la rétine, car il veut respecter la rectitude de l'image et l'absolutisme des lois physiques. Il n'imagine à aucun moment que le cerveau soit capable de redresser les images, ce qui est surprenant quand on sait qu'il écrivait « à l'envers », de la droite vers la gauche, sans probablement utiliser de miroir pour se relire. C'est à Kepler (1571-1630) qu'on attribue la solution à ce problème de renversement de l'image, qui l'aurait troublé. Il songe, comme Léonard de Vinci, à la possibilité d'une seconde intersection dans l'œil, mais note que même une image « droite » dans l'œil aurait le même effet qu'une image de miroir. Pour Kepler, la seule solution à ce problème serait, pour l'image, d'être à la fois inversée et renversée sur la rétine, avant d'être redressée dans le cerveau (conscience).

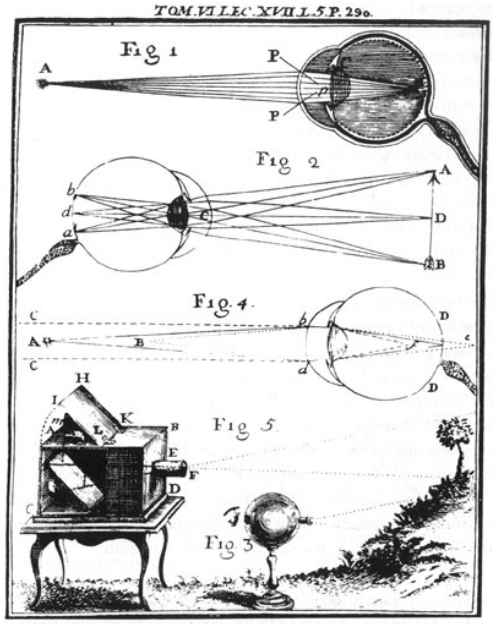
Les théories de Kepler sont révolutionnaires, parce qu'elles ouvrent sur une vision non pas construite selon les modèles « revisités » des anciens, mais sur une vision originale découverte grâce à des observations qui s'affranchissent des dogmes dominants les plus ancrés. Pendant ses études en astronomie, Kepler s'initie au système ptoléméen et copernicien, avant de devenir l'assistant de Tycho Brahé à la Cour de Prague. Tous deux observent avec fascination les éclipses. Divers appareils sont utilisés dans ce but d'observation, dont la *camera obscura* à laquelle il ajouta des lentilles. L'éclipse représente pour Kepler une source d'inspiration autant scientifique que littéraire. Il diffusera, par exemple, les idées coperniciennes grâce à un récit fantastique d'un voyage sur la Lune. Par contre, les qualités imaginatives de Kepler ont souvent été passées sous silence par les savants « rationalistes » modernes, qui étaient aveuglés par leur scientisme. Pour eux, il est presque inconvenant qu'un « philosophe naturel », tenu d'observer les phénomènes « réels », s'interroge sur le fonctionnement des lentilles qui sont bonnes pour les lunetiers ou les « magiciens ». Le vieux préjugé des Grecs, selon lequel les instruments optiques « déforment » la vue et altèrent la réalité, n'a pas complètement disparu, de même qu'une certaine forme de mépris pour la technique. Pourtant, grâce à eux, et particulièrement grâce à la *camera obscura* et à la lunette astronomique, Kepler fera des découvertes

majeures en optique qui auront des répercussions importantes sur tout un pan de la culture de l'époque, populaire et intellectuelle.

4. La *camera obscura* et l'idée d'observation

À partir du XVe siècle, la chambre noire se met à prendre une importance de premier plan pour délimiter et définir les rapports entre l'observateur et le monde. Au bout de quelques décennies, ce n'est plus un instrument ou une option visuelle parmi tant d'autres, mais le lieu obligé pour qui veut comprendre la vision ou la représenter. Elle signale aussi l'apparition d'un nouveau modèle de la subjectivité lié à l'effet sujet-objet. En effet, la chambre noire définit son observateur dans l'isolement où la réalité est désormais « extérieure ». Le traité *Opticks* d'Isaac Newton (1704) et l'*Essai philosophique concernant l'entendement humain* de John Locke (1690) sont parmi les textes les plus célèbres où l'on retrouve l'image de la chambre noire et son sujet renfermé. L'un et l'autre démontrent que la chambre noire sert de modèle à la fois à l'observation des phénomènes empiriques et à l'introspection réflexive, à l'observation de soi. Dans tout son ouvrage, Newton fait de la chambre noire le lieu privilégié de sa méthode inductive.

Au XVIIe et au XVIIIe siècles, la chambre noire est le modèle le plus fréquemment utilisé pour rendre compte de la vision humaine et pour représenter la relation entre un sujet percevant et le monde extérieur. « Pendant plus de deux siècles, elle permet de montrer (pour la pensée rationaliste comme pour la pensée empiriste) comment on parvient à des inductions véridiques sur le monde en se fondant sur l'observation; mais en tant qu'objet matériel, c'est aussi un moyen très répandu d'observer le monde visible, un instrument de divertissement populaire, d'investigation scientifique et d'utilisation artistique. » (Crary, 1994).



Comparaison de l'œil avec la chambre noire, début du XVIIIe siècle. [Source image : http://www.imageandnarrative.be/inarchive/issue08/dirkvandenbergh.htm]

Certains historiens ont tendance à associer la perspective de la Renaissance et la photographie à la même recherche d'un équivalent objectif à la « vision naturelle ». La chambre noire s'inscrirait d'ailleurs dans le développement des sciences de l'observation en Europe au XVIIe et au XVIIIe siècles. L'accumulation du savoir sur la lumière, sur les lentilles et sur l'œil permet d'affiner de plus en plus l'étude et la représentation du monde physique. De ce fait, il semble clair que la chambre noire n'est pas seulement un outil neutre et inanimé, « elle s'inscrit au contraire dans une structuration bien plus vaste et bien plus profonde du savoir et du sujet observateur[12]. »

Il est d'ailleurs intéressant de noter que les définitions de *camera obscura* faites au milieu du XVIIIe vont bien au-delà de l'idée de « reproduction » de l'image. Dans l'*Encyclopédie* de Diderot et D'Alembert, on énumère ses utilisations dans cet ordre : « Elle jette de grandes lumières sur la nature de la vision; elle fournit un spectacle fort amusant, en ce qu'elle présente des images parfaitement semblables aux objets; qu'elle en imite les couleurs et même les mouvements, ce qu'aucune autre sorte de représentation ne peut faire. » Ce n'est

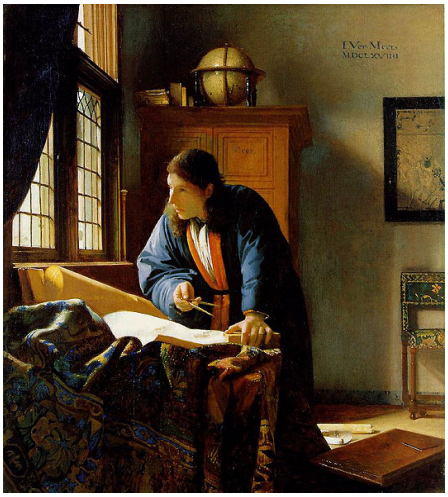
12. Crary, J. (1994). L'art de l'observateur. Vison et modernité au XIXe siècle. Jacqueline Chambon.

qu'ensuite qu'il est remarqué que : « par le moyen de cet instrument, […] quelqu'un qui ne sait pas le dessin pourra néanmoins dessiner les objets avec la dernière justesse et la dernière exactitude. »

5. La *camera obscura* et l'art hollandais

La *camera obscura* n'a pas besoin de tout un attirail pour émerveiller : elle le fait pour ainsi dire par elle-même. C'est cette simplicité qui séduit les Hollandais. La *camera obscura* serait l'expérience type de l'art hollandais à « l'âge de l'observation ». À la différence des Italiens (perspectivistes), pour qui le monde est « absolu », les Hollandais admettent sa relativité : ils acceptent ainsi sans problème les appareils qui relativisent la vue, tels que la *camera obscura* ou les lunettes. Ils se sont rendu compte que l'œil n'a pas le privilège de la vérité; la représentation est dans l'ordre des choses, on n'y échappe pas. C'est pourquoi les artistes et les scientifiques ne prétendent pas atteindre une vérité infaillible, mais se proposent de « rendre compte » des effets de distorsion, éventuellement de les mesurer. La connaissance se forme par comparaison entre une chose et une autre; ce n'est pas l'homme qui fournit la mesure, comme en Italie. Cette conception hollandaise de la peinture nous semble ouvrir la porte au « relativisme » en philosophie chez Leibniz, Nietzsche ou encore Deleuze.

Deux tableaux de Vermeer représentent bien le « paradigme de la chambre noire cartésienne » (J. Crary, 1994). L'*Astronome* et le *Géographe* semblent tous les deux absorbés dans de savantes recherches solitaires dans la pénombre d'une pièce rectangulaire qui ne semble percée que d'une seule fenêtre. L'astronome étudie une sphère céleste où sont dessinées les constellations; le géographe a sous les yeux une carte nautique. Tous deux détournent le regard de l'ouverture qui donne sur le dehors. Ils ne connaissent pas le monde extérieur par une observation immédiate, mais par l'examen mental de sa représentation, et ce, sans sortir de la pièce. Certains croient que l'astronome et le géographe seraient en fait le même homme et que ce serait Leeuwenhoek, un ami de Vermeer, ce qui est assez surprenant étant donné qu'on attribue à ce dernier de nombreuses et étonnantes observations (protozoaires, bactéries, spermatozoïdes) pour son époque à l'aide du microscope. Leeuwenhoek était drapier et utilisait le microscope pour vérifier la pureté de ses étoffes. Il aurait ainsi développé une technique pour fabriquer des lentilles de microscope d'une précision inégalée, le rendant un précurseur de ce qu'on appellera plus tard la biologie moléculaire.



Johannes Vermeer, Le géographe, 1668. [Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/Le_Géographe_(Vermeer)]

Johannes Vermeer, L'Astronome, 1668. [Source image : http://fr.wikipedia.org/wiki/L%27Astronome_(Vermeer)]

Les Hollandais, comme les savants médiévaux, tiennent à observer la nature, et non à l'idéaliser en spéculant à la manière italienne. La relation de cette peinture au monde est un peu comme celle de l'art à la nature : le sens s'insère dans ce que l'on voit. Les Hollandais s'extasient donc devant la nature, mais le font à travers des instruments comme le microscope ou la *camera obscura*. Les tableaux hollandais sont peut-être « naturels et réalistes », mais tout comme l'image de la *camera obscura*, ils ont aussi un côté merveilleux et inquiétant en même temps. Cette peinture tiendrait peut-être son étrangeté, comme la *camera obscura*, du fait qu'a priori l'image est familière et semble « sans intention », alors qu'au contraire elle est parfaitement artificielle, puisqu'elle repose sur un appareil et une technique.

Au XXe siècle, avec l'avènement de la photographie, beaucoup vont comparer la peinture de Vermeer (1632-1675) à une image photographique. La liberté avec laquelle Vermeer modifiait les effets optiques de ses sujets nous porte cependant à croire qu'il ne calquait pas l'image de la *camera obscura*. On peut ainsi considérer certaines de ses œuvres, comme la vue de Delft[13], non pas comme une « copie » réalisée à l'aide d'une *camera obscura*, sorte de document nécessairement neutre, mais comme une réalisation de la liaison nature/artifice. Ce tableau semble ainsi être aux confins du monde perçu et du monde présenté. La venue de la photographie, considérée par certains comme le « crayon de la nature », représente le monde visible tel que nous pensons le voir et domine de plus en plus les représentations. Nicéphore Niepce (1765-1833) est le premier à avoir obtenu des images permanentes naturelles, et Louis Jacques Mandé Daguerre est le premier à parvenir à fixer l'image de façon satisfaisante.

B) Les montages de démonstration pouvant être associé à cette fiche

Sur les thèmes de l'observation et de l'image, notamment l'idée d'objectivité et de fixation de l'image, plusieurs démonstrations pourraient être utilisées pour illustrer l'une ou l'autre des idées évoquées. Les caractéristiques des montages, incluant une photo, ainsi que leur utilisation, sont détaillées dans le tableau des démonstrations présenté en annexe. Voici celles que nous proposons.

La « boîte noire » (voir tableau démonstration 5)

Cette démonstration permet d'illustrer l'idée de « boîte noire » en science, qui peut être une analogie pour illustrer les questions qu'on se pose et pour lesquelles les réponses restent à trouver. Cette image pourrait aussi être utilisée pour parler de l'étape d'observation de la « méthode scientifique » afin de chercher à mieux comprendre un phénomène, par exemple. Pour ce faire, les scientifiques doivent se doter de techniques (au sens large) pour avoir accès à une certaine réalité qu'il leur faudra ensuite interpréter. Cela permet d'introduire une discussion sur la nature du concept d'observation en science et sur ce que cela implique en lien avec une certaine conception des sciences[14].

L'expérience en chambre noire (voir tableau démonstration 1)

Cette démonstration est intéressante pour faire vivre l'expérience en chambre noire, comme ont pu le vivre les Alhazen, Kepler, Newton ou même Vermeer. Cette démonstration permet généralement de susciter chez le participant une vive émotion par l'immersion dans le noir et l'apparition progressive de l'image. Comme cette démonstration demande de l'espace et d'avoir

13. Voir la fiche 3 : Perspective, art et *camera obscura*.
14. Le chapitre II de Gérard Fourez, dans son ouvrage *La Construction des Sciences,* est en ce sens fort intéressant, puisqu'il traite de l'observation dans la méthode scientifique. Cet auteur utilise aussi cette idée de « boîtes noires » en ce sens. L'article de Michel Mercier sur la microscopie électronique est très intéressant aussi. Les références complètes se trouvent en annexe, dans la section références utiles.

préalablement pris le temps de construire ce dispositif, **les boîtes-sténopés** (voir tableau démonstration 3) pourraient être utilisées pour illustrer ce phénomène de formation d'une image.

Le modèle de l'œil (voir tableau démonstration 4)

Ce montage se trouve déjà dans plusieurs établissements scolaires, mais il est possible d'en acheter un chez un fournisseur de matériel scientifique. Ce montage permet de parler du modèle de la vision qui fut le plus utilisé au XVIIe et au XVIIIe siècles. **La boîte coulissante** (voir tableau démonstration 10) pourrait aussi être mise en relation avec ce modèle de l'œil. Ce montage permet aussi de faire le lien entre un appareil photo et un modèle de l'œil.

La caméra-sténopé (ou photographie-sténopé) (voir tableau démonstration 11)

Cette démonstration a toujours un effet saisissant pour les participants. Par contre, il faut disposer d'une chambre noire ou d'une pièce très obscure pour effectuer le développement. La photographie au sténopé surprend toujours par sa simplicité : un petit trou dans une boîte de carton, sans lentille et sans mise au point à faire. De nombreux prolongements seraient possibles en lien avec l'idée de la photographie. Certains sont présentés dans le tableau en annexe.

Notons que la photographie-sténopé suscite un engouement insoupçonné. Il suffit d'effectuer quelques recherches sur le Web, pour apprécier de très bons sites sur le sujet et découvrir toute une communauté de passionnés. La photographie-sténopé (*pinhole photography*) connaît une popularité grandissante et de nombreux projets ont actuellement lieu[15].

C) Intentions didactiques et pistes de questionnements possibles

- Qu'est-ce qu'une image?
- Comment distinguer une réalité physique d'une réalité sensible?
- Que veut dire l'observation en science? Que veut dire l'instrumentalisation de l'observation?
- Que sous-tend l'idée d'objectivité en science?

15. Le projet *Time in a can* [http://www.timeinacan.org] en est un bon exemple.

Annexe 1 : Les démonstrations liées à la *camera obscura*

1. L'expérience en chambre noire

Déroulement possible

** Pour cette démonstration, il est préférable d'avoir un environnement très éclairé.*

- Orienter la chambre de sorte que la roulette de sténopés soit orientée vers la scène choisie, extérieure ou toute autre scène intérieure, mais bien éclairée. Il est utile d'utiliser dans ce dernier cas une source de lumière très vive et de l'orienter directement sur l'objet choisi, qui est idéalement coloré ou qui a un motif particulier.
- Choisir le sténopé de plus petit diamètre sur la roulette.
  - Si le soleil est présent, il peut se révéler trop éblouissant pour apprécier le reste de la scène extérieure. Il suffit de mettre sa main ou un morceau de papier collant dans la fenêtre (si à l'intérieur) pour que l'ombre ainsi créée cache le sténopé.
- Choisir un participant qui sera prêt à partager toutes ses impressions sur l'expérience qu'il s'apprête à vivre.
- Après son entrée dans la chambre, demander à cette personne de communiquer ses premières impressions d'isolement dans le noir.
  - Ses yeux ont besoin de s'adapter à la noirceur. Cette personne pourra progressivement dire ce qu'elle verra.
  - La personne décrira les objets de la scène et s'apercevra assez rapidement que l'image est à l'envers. Le sens de l'image est une conséquence de la propagation rectiligne de la lumière.
- L'animateur pourrait ensuite :
  - Demander de décrire l'image observée en changeant le diamètre des sténopés (en tournant la roulette).
    - Un sténopé de faible diamètre laisse passer un cône de lumière issu de chaque point objet et de faible amplitude angulaire, ce qui produit une image de meilleure résolution, mais de faible intensité. Un sténopé de grand diamètre laisse passer un cône de lumière de plus grande amplitude angulaire et l'image résultante de la superposition de ces « faisceaux » est plus floue mais plus intense (ou lumineuse).
  - Mettre sa main dans l'angle de vue du sténopé à l'extérieur de la chambre noire, la bouger, l'approcher et l'éloigner en demandant au participant de décrire ce qu'il observe.
    - La dimension de l'image dépend de la distance objet-sténopé. Plus un objet est près, plus il apparaîtra grand sur l'écran à l'intérieur de la chambre noire.
    - Tant pour la main que pour la scène lointaine, l'image est bien définie, car il n'y a pas de plan objet (comme c'est le cas avec une lentille).
  - Demander au participant de changer la position de l'écran, qui est installé sur une tige mobile.
    - La « résolution » ou la définition de l'image ne change pas, bien que la variation d'intensité lumineuse pourrait laisser croire le contraire. En effet, il n'y a pas de

plan focal comme dans le cas d'une lentille. L'image change simplement de grandeur lorsque l'écran est déplacé dans la direction du sténopé. Évidemment, plus l'écran est proche du sténopé, plus l'image paraîtra intense.

- Mettre la lentille (roulette) et utiliser un écran transparent pour trouver le plan focal. (L'utilisation d'une lentille implique de trouver un plan focal, c'est-à-dire la distance de l'écran où la résolution de l'image va être optimum.)
- L'animateur peut positionner un doigt devant la lentille et demander si l'image présente l'ombre de ce doigt.
  - « L'image optique » produite par une lentille n'est pas très affectée par un obstacle opaque, si ce n'est que sa luminosité s'en trouve réduite.
  - Sans obstacle, l'image est beaucoup plus brillante avec une lentille qu'avec un sténopé, car la lentille permet de rediriger en un seul point (image) tous les rayons issus d'un point objet et passant par la lentille.

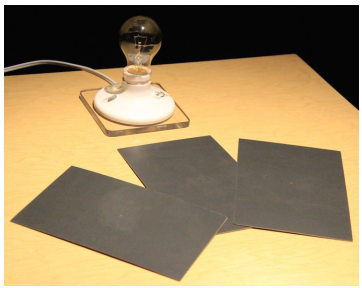
Description technique du montage

- Chambre noire (environ 90 cm x 90 cm x 150 cm) : La structure est faite de tuyaux d'aluminium de 1,3 cm (1/2'') de diamètre, jointe aux 4 coins par 4 blocs de bois franc percés de trous pour y introduire les tuyaux. La structure est légère, démontable et se transporte facilement.
  - Un autre tuyau, terminé à ses deux extrémités par des œillets, est enfilé dans deux des tuyaux parallèles qui constituent le carré supérieur. Cette barre sert à suspendre l'écran de toile blanche. Celui-ci doit être du côté opposé à la roulette.
- Le tissu qui recouvre la *camera obscura* doit être parfaitement opaque et se croiser au niveau de la porte pour ne pas laisser pénétrer de lumière. Selon le type de tissu, l'usage de biais (bande en tissu repliée) au niveau des coutures peut être nécessaire pour éviter que les points de perforation lors de la couture produisent autant de « sténopés ».
- La roulette est constituée de deux pièces circulaires jointes par un axe au centre. Le disque fixe est percé d'une fenêtre carrée et fixé à la toile de la chambre noire par des pièces de « velcro ». Le disque mobile porte trois sténopés de différents diamètres et une lentille. Les sténopés ont été produits en perçant des couvercles de jus surgelés avec des mèches de petits diamètres. La lentille provient d'une loupe d'un magasin bon marché.
- Un écran semi-transparent peut être utilisé pour voir l'image de la lentille au plan focal.

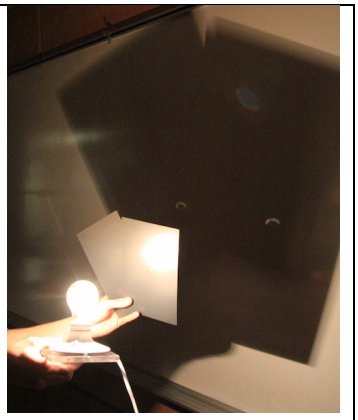
2. Les trois cartons perforés

Déroulement possible

** Pour cette démonstration, il est préférable d'utiliser le soleil comme source de lumière ou d'avoir un environnement sombre en utilisant une vive source de lumière (idéalement une ampoule incandescente pour observer l'image du filament).*



- Montrer les trois cartons qui présentent chacun, en leur centre, un trou de grandeur et de forme différentes. Le premier carton a un petit trou circulaire (quelques mm), le deuxième un trou circulaire un peu plus grand et le troisième un petit triangle.
- Demander à quelques personnes de se prononcer sur ce qui pourra être observé sur un écran en plaçant les trois cartons entre celui-ci et la source de lumière (soleil ou ampoule). Intuitivement, plusieurs participants devraient croire qu'on observera des formes lumineuses correspondant aux formes des trous (petit cercle, cercle un peu plus grand et



petit triangle). Demander à la classe s'il y a consensus ou s'il y a des contrepropositions.

- Demander à un participant de faire la démonstration en projetant sur un écran le résultat du passage de la lumière au travers de chacun des trous.
  - Lorsque l'écran est près du sténopé, la surface éclairée prend la forme du trou.
  - Lorsque l'écran est loin du sténopé, c'est l'image de la source qui ressort. Dans le cas du soleil, toutes les « tâches » ou images du soleil seront circulaires, indépendamment de la forme de l'ouverture. Seule l'intensité lumineuse devrait varier en fonction de la taille du trou (le plus petit laisse passer moins de lumière). C'est ce qui explique qu'à travers du feuillage d'un arbre qui présente une infinité de formes d'ouvertures qui laissent passer la lumière, toutes les taches de lumière au sol sont circulaires, puisqu'elles sont toutes des images du soleil. Dans le cas d'une ampoule incandescente, par exemple, ce serait l'image du filament qui pourrait être observée.

Description technique du montage

- Trois rectangles de cartons perforés d'un trou au centre de chacun. Un premier carton avec un petit trou circulaire de quelques millimètres de diamètre. Un deuxième carton avec un trou circulaire d'un diamètre un peu plus grand. Un troisième carton avec une ouverture triangulaire de quelques millimètres.

3. La boîte-sténopé

Déroulement possible

** Pour cette démonstration, il est préférable d'avoir un environnement très éclairé comme une scène extérieure.*

- Inviter des participants à faire eux-mêmes l'essai d'observer une scène à travers un sténopé. Il suffit d'être dos à la scène à observer, de regarder par le trou prévu à cet effet, de positionner la bande de tissus pour éviter l'entrée de lumière parasite puis d'apprécier l'image sur l'écran blanc au fond de la boîte.
  - L'observateur sera en mesure de faire l'expérience de l'image de cette scène inversée, en mouvement, et qui aura la résolution que permettra la dimension du trou du sténopé.

Description technique du montage :

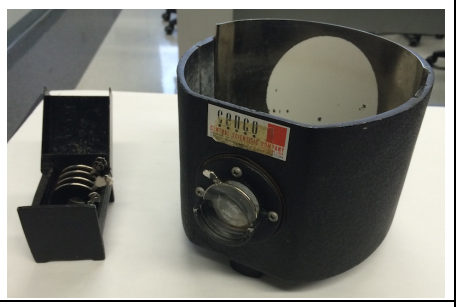
- Petite boîte de carton (environ 25 cm x 25 cm x 40 cm) dont l'intérieur sera peint en noir.
  - Sur l'une des faces intérieures à l'extrémité de la boîte, coller une feuille blanche qui servira d'écran.
  - Sur la face à l'autre extrémité de la boîte (face opposée), réaliser une ouverture à peu près rectangulaire, centrée, dont le côté long est à peu près parallèle à l'arête, mais qui peut aller au-delà de celle-ci. Le but est de faire une ouverture tout juste assez large pour voir à l'intérieur de la boîte sans laisser trop de lumière entrer. Il est re-

commandé de coller une bande de tissus noire au pourtour de cette ouverture pour réduire au minimum l'entrée de lumière.
- Au-dessus de l'ouverture, tout près de l'autre arête sur la même face, faire une ouverture carrée de 2 cm de côté, dans le carton.
- Percer votre sténopé dans une feuille de papier d'aluminium (aiguille), feuille de métal ou couvercle de boîte de jus surgelé (mèche). Appuyer contre une surface lors du perçage pour éviter les bordures repliées et les réflexions parasites. Si vous comptez y observer le soleil, faites une ouverture très petite. Fixer votre sténopé devant votre ouverture carrée avec du ruban adhésif.

4. Le modèle de l'œil

Déroulement possible

- Inviter des participants à observer une scène à travers le modèle de l'œil. Il faut se couvrir la tête et couvrir le montage d'un drap noir pour mieux observer l'image d'une scène extérieure ou se trouver dans une pièce assez sombre et observer un objet lumineux.
  - Il faut que l'ouverture du modèle de l'œil soit en direction d'une scène, que le réservoir de l'œil soit rempli d'eau, que la lentille qui sert de cristallin soit en place, et ainsi, l'image peut être observée sur la rétine. L'image résultante est bonne. Selon les modèles, l'écran (ou rétine) peut être positionné à plus d'un endroit, simulant des anomalies du globe oculaire.
  - L'image sur la rétine est effectivement inversée et c'est le cerveau qui retourne l'image. Cet aspect a intrigué plusieurs personnages historiques, comme de Vinci. On associe à Kepler la résolution du problème de la formation de l'image rétinienne.



Description technique du montage

- Modèle de l'œil acheté chez un fournisseur de matériel scientifique.
  - Ce type de modèle d'œil se retrouve souvent dans les écoles secondaires et les cégeps. Des laboratoires portant sur les anomalies de l'œil et les corrections de ces problèmes avec des lentilles sont généralement faits avec ces modèles.

- Préparation du modèle de l'œil
  - Mettre de l'eau dans le réservoir, qui représente l'humeur aqueuse, qui est un milieu réfringent comme l'eau.
  - Positionner la lentille servant de cristallin.

5. La « boîte noire »

Déroulement possible

** Pour cette démonstration, il est préférable d'avoir un environnement sombre.*

- Installer le montage sans que les participants voient les objets placés dans la boîte.
- Situer le concept de « boîte noire » en science. Poser ensuite la question suivante : comment faire pour explorer le contenu d'une boîte sans y avoir accès, sinon par un très petit trou (sténopé)? Demander aux participants s'il est possible selon eux de voir ce qu'il

y a à l'intérieur de la boîte à partir du petit trou, sans soulever la boîte.

- Brancher ensuite la source de lumière située dans la boîte.
  - Un participant tentera probablement d'approcher son œil du sténopé. Si la source de lumière à l'intérieur de la boîte est assez vive et que la pièce est sombre, il sera ébloui et ne réussira pas à voir ce qu'il y a dans la boîte.
- Tenir un écran semi-transparent devant le sténopé et demander à quelqu'un de s'avancer et de décrire ce qu'il observe.
  - Celui-ci devrait être en mesure de reconnaître des objets et de voir le filament de l'ampoule. L'image des objets sera inversée. Il devra interpréter ce qu'il observe avant de pouvoir dire ce qu'il voit réellement.

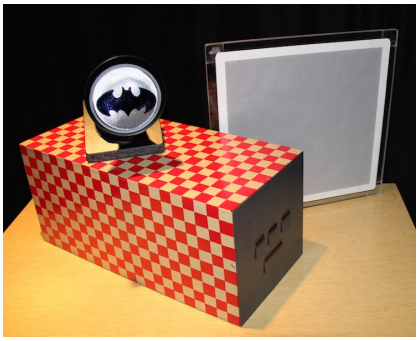
Description technique du montage

- Le montage nécessite une boîte de carton dont on a retiré les rabats sur le dessus, afin de la mettre à l'envers. Sur l'une des faces de côté, percer un sténopé.
  - Dans les deux coins adjacents au sténopé, il peut être utile de fixer deux miroirs plans pour réfléchir plus de lumière de l'ampoule vers les objets, ce qui produira un meilleur effet.
- Disposer à l'intérieur de cette boîte un ensemble d'objets idéalement de couleurs claires (jaunes, blancs) et assez réfléchissantes. Placer aussi une ampoule incandescente (100 watts) pour bien éclairer ces objets dans la direction du sténopé.
  - Il est suggéré d'utiliser des objets familiers pour les participants comme un canard jaune, une balle colorée, etc. De cette façon, il sera plus facile pour eux d'interpréter ce qu'ils observent.
- C'est le principe de la *camera obscura*, mais cette fois les observateurs sont à l'extérieur de la chambre noire.

6. La boîte de projection « Batman »

Déroulement possible

** Pour cette démonstration, il est préférable d'avoir un environnement sombre.*



- Après avoir fait voir une première fois la projection du logo de Batman sur l'écran semi-transparent, montrer cette même image avec des ouvertures différentes, numérotées 1, 2 et 3, pour faire constater les effets de la taille du sténopé sur la résolution de l'image.
- Faire ensuite varier la distance entre l'écran et le sténopé, et entre l'objet lumineux et le sténopé. Il sera ainsi possible de déduire une relation proportionnelle entre la taille de l'image projetée et la distance sténopé-écran ou sténopé-objet.
- Finalement, il est possible de voir que deux sténopés près l'un de l'autre vont projeter deux images superposées.

Description technique du montage

- Longue boîte dans laquelle est placée une lampe, sur laquelle a été dessiné le logo de Batman. La lampe pointe vers la face de la boîte percée de plusieurs sténopés qui ont tous un rabat numéroté pour les masquer. L'autre extrémité de la boîte est ouverte.
- Les sténopés
  - 1 petit sténopé (1)
  - 1 moyen sténopé (2)
  - 1 grand sténopé (3)
  - 1 paire de trous (4)

7. La camera obscura avec rétroprojecteur

Déroulement possible

- Inviter une personne à s'asseoir devant le rétroprojecteur, sous le drap. Lui expliquer qu'elle doit faire une mise au point sur l'objet qu'elle désire dessiner. Lui proposer de calquer, sur une feuille préalablement fixée sur le rétroprojecteur, l'image qu'elle peut observer.
- Vers la fin, montrer le résultat à l'audience. Si le papier utilisé est semi-transparent (un papier calque par exemple), il serait même possible d'utiliser le rétroprojecteur (dans sa fonction d'origine) pour projeter le dessin.

Description technique du montage

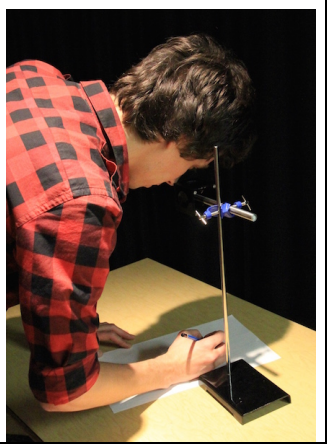
- Utiliser la « tête » optique d'un projecteur et l'encercler avec un grand drap noir afin que la lumière ne puisse entrer que par la lentille. Seule l'ouverture de la « tête » optique du projecteur doit être libre et permettre l'entrée de lumière. Fixer une feuille blanche sur le rétroprojecteur qui servira d'écran.
- Couvrir la tête du participant ainsi que la surface du rétroprojecteur où se trouve la feuille pour calquer l'image réelle de la scène observée.

8. La camera lucida

Déroulement possible

- Inviter une personne à s'asseoir devant la *camera lucida*, puis à tracer sur une feuille l'image virtuelle qu'elle est la seule à voir.
- Vers la fin, montrer le résultat à l'audience.

Description technique du montage



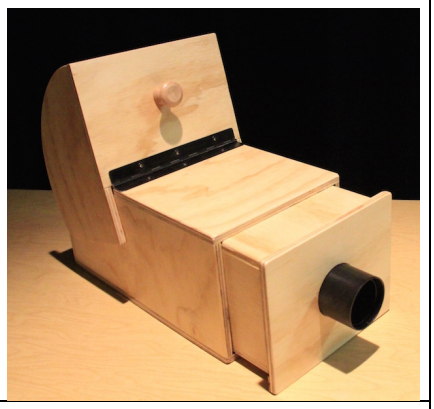
- La *camera lucida* est en fait un miroir semi-réfléchissant monté dans un cube de plexiglas. Elle est fixé à un support universel. La lumière de la scène qui parvient au cube est réfléchie à l'interface en diagonale dans le cube, et dirigée vers l'œil de l'observateur. Or celui-ci voit une image dite « virtuelle » qui se situe au-delà du cube dans la direction de l'œil de l'observateur-cube.
- L'observateur trace sur une feuille cette image virtuelle.

9. La camera obscura – réplique en bois

Déroulement possible

** Pour cette démonstration, il est préférable d'avoir un environnement sombre.*

- Inviter les participants à faire eux-mêmes l'essai d'ajuster la distance lentille-écran en coulissant la boîte intérieure afin d'observer l'image réelle d'une scène sur une feuille semi-transparente placée sur la fenêtre. Ils pourront prendre conscience de l'importance de la distance focale dans la définition de l'image optique obtenue avec une lentille.
- Faire le test de masquer une partie de la lentille pour voir l'effet sur l'image.
    - La luminosité de l'image sera plus faible, mais l'image sera complète. Ceci vient du fait que chaque partie de la lentille redirige des rayons provenant de chaque point-objet vers leur point-image.



Description technique du montage

- Réplique d'une *camera obscura* portable en bois. La position de la lentille est ajustable axialement et permet de focaliser l'image réelle inversée sur la fenêtre et de la calquer. Un miroir plan incliné à 45 degrés assure le relais. Une petite porte munie de côtés en forme de quart de cercle permet une meilleure visibilité de l'image en réduisant la lumière parasite sur la surface.
- Matériaux utilisés
    - Contreplaqué (qu'il faudra vernir)
    - Lentille convergente de lunette récupérée
    - Fenêtre d'acrylique (« plexiglas »)
    - Miroir (première surface idéalement)
    - Tuyau de PVC
    - Pentures et poignée

10. La boîte de carton coulissante (avec lentille et écran semi-transparent)

Déroulement possible

- Inviter les participants à faire eux-mêmes l'essai d'ajuster la distance lentille-écran en coulissant la boîte intérieure afin d'observer l'image réelle d'une scène formée sur l'écran semi-transparent à l'extrémité de la boîte intérieure.
- Les participants pourront prendre conscience :
  - de l'importance de la distance focale dans la définition de l'image optique obtenue avec une lentille;
  - de l'inversion de l'image;
  - de l'effet de l'aberration de la lentille sur la définition de l'image.
- Faire le test de masquer une partie de la lentille pour voir l'effet sur l'image.
  - La luminosité de l'image sera plus faible, mais l'image sera complète. Ceci vient du fait que chaque partie de la lentille redirige des rayons provenant de chaque point-objet vers leur point-image.

Description technique du montage :

- Deux boîtes rectangulaires à bases carrées (env. 20 cm) assez longues (environ 50 cm) de carton à fabriquer soi-même :
  - Boîte extérieure : une extrémité ouverte, l'autre extrémité fermée, mais avec une ouverture (carrée) au centre pour y coller une lentille de loupe achetée dans un magasin bon marché.
  - Boîte intérieure : celle-ci est légèrement plus petite que l'autre pour qu'elle puisse s'y insérer et être coulissée sans résistance, mais le plus ajustée possible. Une extrémité ouverte, l'autre extrémité recouverte d'un écran semi-transparent (on pourrait par exemple utiliser un morceau de rideau de douche semi-transparent acheté dans un magasin bon marché).
  - L'intérieur de ces boîtes doit être peint en noir mat.
  - Insérer l'une dans l'autre les boîtes en les positionnant de telle sorte que les extrémités fermées soient dans la même direction. Cela reproduit en quelque sorte l'objectif d'un appareil photo avec une mise au point manuelle.

11. Photographie-sténopé

Déroulement possible

- À la fin de la présentation, l'animateur peut inviter les gens à se regrouper pour prendre une photographie-sténopé.
  - Décrire la caméra-sténopé et expliquer comment se fera le chargement dans la chambre noire.

- Installer la caméra-sténopé à la bonne hauteur, indiquer aux gens de sourire et de ne pas trop bouger pendant le temps que durera l'exposition (25 à 35 secondes selon l'éclairage de la pièce. Il est suggéré de faire des tests avant la démonstration.). Cette étape fait sourire, mais elle est toujours prise au sérieux par les participants!
- Expliquer comment le développement s'effectuera et parler des risques d'échec étant donné que les subtilités du processus de développement ne sont pas encore assez bien maîtrisées. Le développement se fait en chambre noire avec un rouleau à pâtisserie en marbre sur une surface lisse et dure.
- Procéder au développement. Immédiatement après avoir étendu les produits chimiques, la photographie peut être sortie de la chambre noire. Il faudra toutefois quelques minutes avant que le procédé ne soit complété.

Description technique du montage et du procédé de développement

- L'appareil photo : boîte à chaussures, boîte de rangement ou boîte de métal de format moyen, avec couvercle, qui peut se fermer « hermétiquement à la lumière ».
  - Peindre l'intérieur de la boîte en noir mat. (Il faut parfois ajouter du ruban sur les coins à l'extérieur de la boîte pour éviter l'entrée de lumière par de tout petits trous.)
  - Prendre un petit morceau de papier d'aluminium, une feuille de métal mince ou un couvercle de jus surgelé et y percer un sténopé à l'aide d'une aiguille ou d'une mèche très fine.
  - À l'une des extrémités de la boîte, faire une ouverture et coller le sténopé afin qu'il soit au centre de l'ouverture. Prévoir un obturateur qui puisse fermer le sténopé après l'exposition.
  - À l'intérieur de la boîte, opposé au sténopé, fixer un support servant à maintenir en place le film photographique à développement instantané. Ce support pourrait par exemple être une enveloppe dont une bonne partie de l'une de ses faces aurait été retirée pour ne laisser que le contour.
  - Mettre en place le film photographique, en chambre noire, de telle sorte que le côté sensible de la photo (le négatif) soit exposé à la lumière qui pénétrera par le sténopé. S'assurer que l'obturateur soit bien en place avant de ressortir.
- Le film : aux fins de la démonstration, il a été choisi d'utiliser des films photographiques instantanés (de type Polaroïd).
  - Les films utilisés sont de *Film couleur Instax de Fujifilm*. Les caractéristiques de ce type de pellicule sont disponibles sur le site de Fujifilm. Cela revient à environ 1$ la photo. (Fournisseur : The camera store : http://www.thecamerastore.com)
  - Les films arrivent dans un sac hermétique et celui-ci doit être ouvert dans un endroit complètement noir pour ne pas exposer les films. Il faut penser les transférer et les conserver dans un contenant hermétique à la lumière.
- Le développement : après l'exposition, il faut à nouveau aller dans une chambre noire pour retirer le film de la caméra-sténopé et procéder au développement. Le développement se fait en disposant le film sur une planche lisse et en utilisant un rouleau à pâtisserie, idéalement en marbre (surface très régulière) pour écraser la pochette de produits

chimiques. Il faut rouler avec une bonne pression pour les distribuer uniformément entre les pellicules du film.

- Ce type de film est habituellement utilisé dans des appareils spécialement conçus, de sorte qu'après l'exposition, la pochette de produits chimiques intégrée soit écrasée et que son contenu soit étendu pour développer la photographie. Comme le temps et la pression sont deux facteurs importants pour développer la photo, il est suggéré de se pratiquer quelques fois avant de faire la démonstration dans une classe.
- La technique de développement actuelle donne parfois un excellent résultat, mais peut aussi conduire à un échec. Il est difficile de réussir à étendre le liquide uniformément. Il arrive souvent qu'une partie seulement de la photo se développe correctement. La technique gagnerait à être améliorée, mais la photographie-sténopé représente un intérêt certain et demeure fort divertissante!

Les technologies actuelles qui découlent de ces idées

- À l'origine de l'élaboration des démonstrations en lien avec la *camera obscura*, c'est l'histoire de la photographie et de ses procédés qui ont inspiré ce module. La lecture de l'histoire de Nicéphore Niepcé, cet homme qui s'était donné comme objectif de fixer sur un support les images obtenues avec un daguerréotype (*camera obscura)*, nous a conduits à nous intéresser au premier procédé photographique au bitume de Judée (un produit vendu encore en quincaillerie et souvent utilisé pour donner un aspect vieillot aux meubles en bois). Des essais pourraient être effectués à la lumière des éléments soulevés dans l'article de Jean-Louis Marignier (1996)[16].
  - Tel que décrit dans cet article, l'exposition de la mince couche de bitume de Judée induit, selon la luminosité locale, la liaison plus ou moins importante des molécules. Or ces molécules liées se solidifient et se fixent au support. Les molécules non liées sont dissoutes et évacuées lors du « développement ». Ce type de procédé est connu aujourd'hui sous la dénomination plus générale de procédés dits « photolithographiques » et il est très largement utilisé en microfabrication : la fabrication de composants en microoptique, en micromécaniques et en microélectronique. Aujourd'hui, ce n'est plus du bitume de Judée, mais des « photorésines » aux propriétés bien ciblées qui sont utilisées comme matériau photosensible. De plus, étant donné la robustesse limitée des photorésines, très souvent les microstructures sont transférées aux supports ou substrats sous-jacents par d'autres procédés de gravure (exemple : gravure ionique réactive).
  - Au moins deux des familles de procédés d'impression 3D semblent également s'inspirer de procédés similaires : la photopolymérisation (stéréolithographie) et le frittage par laser. Pour plus d'information, consulter Berchon (2014)[17].

16. Marignier, J.-L. (1996). Photochemistry of Asphaltene films. A study of the world's first photographic process and its invention by N. Niépce around 1824. Journal of imaging science and technology, vol. 40 (2), pp. 123-133.
17. Berchon, M. (2014). *L'impression 3D*. Pour La Science, n° 436, février 2014, pp. 22-29.

Annexe 2 : Références utiles

1. Sur les références historiques de la camera obscura

Bubb, M., (2010). *La camera obscura : philosophie d'un appareil*. Éditions L'Harmattan.

Bessy, M. (1990). *Le mystère de la chambre noire : histoire de la projection animée*. Éditions Pygmalion.

Changeux, J.-P., (2005). *La lumière au Siècle des lumières & aujourd'hui : art et science*. Éditions Odile Jacob.

Crary, J. (1994). *Art de l'observateur : vision et modernité au XIXe siècle*. Traduit par Frédéric Maurin. Éditions J. Chambon.

Ken, A. (1864). *Dissertations historiques, artistiques et scientifiques sur la photographie*. Arno Press.

De La Souchère, M.-C. (2010). *Quand la vue change de sens*. La Recherche, n° 443, p. 108. Consulté en ligne [http://www.larecherche.fr/idees/histoire-science/quand-vue-change-sens-01-07-2010-75706].

2. Sur les idées de physique

Viennot, L., (2002). *Enseigner la physique*. Collaboration de Ugo Besson... [et al.]. Préface de Guy Aubert. Éditions de Boeck.

Paul Kopff. Le site français de la photographie haute-résolution, Galerie-photo. http://www.galerie-photo.com/stenope-cercle-image-theorie.html [consulté le 10 décembre 2013].

Service camera pro. http://www.servicecamerapro.com/f-lens.html. [consulté le 10 décembre 2013].

3. Sur la physiologie de l'œil

Le Cerveau à tous les niveaux!
http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_02/d_02_cr/d_02_cr_vis/d_02_cr_vis.html [consulté le 10 décembre 2013].

4. Sur les procédés photographiques

Marignier, J.-L. (1996). *Photochemistry of Asphaltene films. A study of the world's first photographic process and its invention by N. Niépce around 1824*. Journal of imaging science and technology, vol. 40 (2), pp. 123-133.

Berchon, M. (2014). *L'impression 3D*. Pour La Science, n° 436, février 2014, pp. 22-29.

5. Sur l'idée d'observation en science

Fourez, G. (2001). *La construction des sciences : Les logiques des inventions scientifiques.* Chapitre 2 - La méthode scientifique : l'observation. De Boeck Université.

Mercier, M. (1991). *Les images de microscopie électronique : construire un réel invisible*. Culture technique, n° 22, pp. 25 à 34. Consulté en ligne [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/32655/C&T_1991_22_25.pdf?sequence=1].