

1

Jeux de miroirs

Les phénomènes de *réflexion* sur des miroirs ou de simples surfaces polies ont été les premiers étudiés en optique. Vers 285 avant J.-C., Euclide montre que la lumière se propage en ligne droite ; il observe l'égalité des angles d'incidence et de réflexion lors de la réflexion d'un rayon lumineux sur un miroir plan. Euclide décrit également le phénomène de réfraction ; il faudra ensuite attendre presque 2000 ans pour que les lois de la réfraction soient énoncées.

Lois de la réflexion

La propagation de la lumière en ligne droite est aisée à observer. Il est possible que le terme de *rayon* ait été suggéré par ces raies lumineuses rectilignes qui, dans certains états de l'atmosphère, dardent du Soleil entre les interstices des nuages, en particulier à son lever et son coucher.

Cette propagation rectiligne peut être expérimentalement montrée chez soi, en permettant à la lumière solaire d'entrer dans une pièce sombre en perçant un petit orifice dans le volet fermé d'une fenêtre. En dégageant un peu de fumée dans la pièce, on peut voir distinctement le rayon lumineux formant une droite, les particules de fumée révélant cette droite lumineuse.

L'égalité des angles d'incidence et de réflexion peut aisément être mesurée au moyen de l'instrument décrit par la figure 1.1. Un miroir *M* est fixé sur un support par rapport auquel il peut effectuer une rotation. Une tige métallique est fixée perpendiculairement au plan du miroir et peut pivoter en même temps que ce dernier.

Un cercle gradué permet de mesurer les angles entre l'horizontale et la perpendiculaire au miroir, grâce à la tige métallique

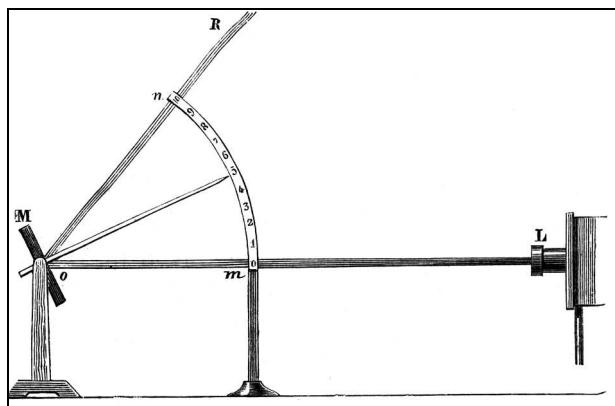


Figure 1.1 – Mesure des angles de réflexion

solidaire du miroir. Un rayon de lumière est envoyé horizontalement par un système optique L et frappe le miroir en son centre O. Une légère fumée permet de visualiser la direction du rayon réfléchi. Un petit carton promené le long du cercle gradué permet également de repérer l'angle de réflexion.

On déduit ainsi de ces mesures la première loi de la réflexion, l'égalité des angles d'incidence et de réflexion. Des appareils plus sophistiqués permettent une vérification très précise de cette loi. On vérifie également une deuxième loi : les rayons incident et réfléchi sont dans un plan perpendiculaire au miroir.

Cette simple loi de la réflexion angulaire, jointe au fait qu'un rayon de lumière n'a pas de poids, fournit le moyen d'amplifier de petits mouvements avec une amplitude extraordinaire. Cette propriété est utilisée dans nombre d'appareils de physique.

Illusion par réflexion à la surface d'une vitre

La réflexion de la lumière ne s'effectue pas seulement sur les miroirs mais sur tous les objets ayant un poli suffisant. Une simple vitre est traversée par la lumière mais une partie est simultanément réfléchie à sa surface. En plaçant une feuille de papier noir derrière un morceau de verre et en éclairant fortement votre visage, le verre fait office de miroir dans lequel vous apercevez votre figure fortement assombrie car une faible quantité de lumière est seulement réfléchie par la surface d'un corps transparent.

Une illusion peut être créée par une telle réflexion de l'image d'une flamme. Dans une cheminée de salon, des flammes brillantes peuvent se refléter la nuit dans le vitrage d'une fenêtre et donner l'illusion d'un feu situé à l'extérieur.

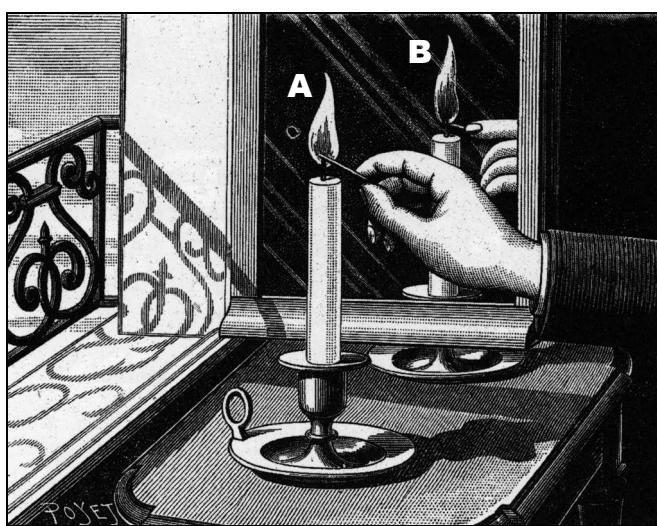


Figure 1.2 – Réflexion à la surface d'une vitre

La figure 1.2 illustre cette illusion de manière amusante. Placez, de part et d'autre d'une plaque de verre, d'une vitre de fenêtre, par exemple, deux bougeoirs identiques portant chacun une bougie de même hauteur.

La bougie A qui est éclairée directement par le jour venant de la fenêtre, se réfléchie dans le carreau qui joue le rôle d'un miroir. L'image de cette bougie, vue par réflexion, se superpose à celle de la seconde, B, vue par transparence à travers la vitre.

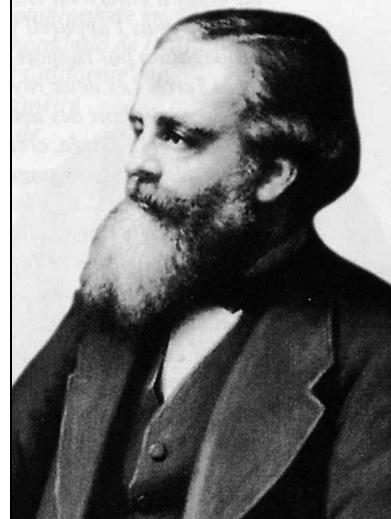
L'illusion consiste à « allumer la seconde bougie B à travers le carreau ». Pour cela, il suffit d'allumer la bougie A et il semble alors que la seconde bougie B s'allume immédiatement. En réalité, le corps de la bougie B est vu par transparence alors que sa flamme illusoire est vue par réflexion. L'illusion sera d'autant meilleure que le fond situé derrière le vitrage est plus sombre ; un tissu noir améliore l'illusion.

Le principe de cette illusion, que l'on peut améliorer en utilisant un miroir semi transparent, a été utilisé au théâtre pour faire apparaître sur scène des personnages fantomatiques illusoires. Nous verrons le dispositif par la suite.

James Maxwell (1831-1879)

Une partie des travaux de Maxwell concerne la cinétique des gaz et la thermodynamique. Il imagine le concept du « démon de Maxwell » capable de mettre en échec le deuxième principe de la thermodynamique.

Ses travaux les plus importants portent sur l'électromagnétisme. En 1864, il obtient quatre équations qui décrivent tous les phénomènes électriques et magnétiques. Il en déduit que la lumière est une onde électromagnétique, réalisant ainsi l'unification de l'optique, de l'électricité et du magnétisme en une seule théorie.



Facteur de réflexion des matériaux

Une certaine proportion de la lumière n'est ni transmise ni réfléchie par un corps transparent ou translucide, mais est absorbée. Elle disparaît littéralement dans le matériau considéré et se transforme en chaleur. Un corps opaque, noir et mat absorbe à peu près toute la lumière ; il s'échauffe rapidement sous l'effet d'une forte intensité lumineuse.

Les lois de la réflexion doivent donc être complétées par la détermination de l'intensité lumineuse réfléchie par les divers matériaux. Il faut attendre la théorie électromagnétique de la lumière, élaborée par James Maxwell (1831-1879) au cours de la seconde moitié du 19^e siècle, pour parvenir à une théorie complète des lois de la réflexion.

Les propriétés réflectives des matériaux transparents dépendent de leur *indice*. Le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et celle dans le milieu considéré est appelé indice du matériau. On notera par le symbole n_A l'indice d'un

milieu A donné. Lorsque deux milieux transparents A et B sont en contact, on désignera par n l'indice du milieu A par rapport au milieu B, soit : $n = n_A/n_B$.

La théorie électromagnétique de la lumière permet de calculer le *facteur de réflexion* d'une surface pour deux matériaux quelconques au contact l'un de l'autre. Ce facteur, R , est égal au rapport des intensités de la lumière réfléchie et de la lumière incidente. Pour la réflexion d'un rayon lumineux arrivant perpendiculairement sur l'interface considérée, le facteur de réflexion a pour expression : $R = (n - 1)^2/(n + 1)^2$.

Dans le cas de la réflexion d'une lumière allant de l'air sur le verre, pour $n = 1,5$, par exemple, on obtient $R = 0,04$. Il y a donc seulement 4% de la lumière qui est réfléchie sur la première face d'une vitre. Il en sera pratiquement de même sur la deuxième face, lorsque la lumière passe du verre dans l'air. On remarque en effet que si l'on change n en $1/n$ dans l'expression de R , cette dernière ne change pas. On a donc également environ 4% de l'intensité lumineuse qui est réfléchie sur la deuxième face de la feuille de verre. Finalement, lorsqu'un faisceau lumineux traverse une lame de verre ou une lentille, il y a au total environ 8% de l'énergie lumineuse réfléchie par les deux faces.



Figure 1.3 – Réflexion dans un miroir

Détail de *La Madeleine pénitente* – Georges de La Tour (1593-1652)

étaient simplement des surfaces métalliques qui avaient été polies. Les Hébreux utilisaient le laiton alors que les Grecs et les Romains utilisaient l'argent et le cuivre. L'emploi du verre avec un dépôt métallique fut introduit au cours du 14^e siècle. À cette époque, le mode de fabrication des miroirs consistait à recouvrir une surface de verre avec un amalgame d'étain et de plomb, ce qui donnait une surface réfléchissante. Plus tard, l'argent a aussi été utilisé dans la fabrication des miroirs.

Par contre, les surfaces métalliques réfléchissent la plus grande partie de la lumière qui les frappe. L'argent et l'aluminium possèdent les facteurs de réflexion les plus élevés parmi les métaux d'où leur emploi pour la fabrication des miroirs.

Le facteur de réflexion peut être déterminé par des mesures photométriques directes qui concordent bien avec les valeurs déduites de la théorie électromagnétique de la lumière. Le facteur de réflexion de l'argent est égal à 0,92. Une surface en argent parfaitement polie réfléchit 92% de l'énergie lumineuse.

À l'origine, les miroirs

Cependant, l'argent s'oxyde rapidement et il a été remplacé par l'aluminium qui est un peu moins réfléchissant que l'argent mais qui s'oxyde lentement. Les miroirs ordinaires actuels sont fabriqués à partir d'une plaque de verre sur laquelle est appliquée une couche réfléchissante d'aluminium ou d'argent, puis celle-ci est recouverte d'une couche de cuivre ou de plomb. Cette seconde couche est appelée le *tain*.

Le tain rend le miroir complètement opaque tout en empêchant l'oxydation de la couche réfléchissante. La couche d'aluminium ou d'argent est généralement assez mince pour être partiellement transparente. Il est donc possible d'observer, sans être vu, à travers un miroir sans tain lorsque l'observateur est dans le noir et regarde une scène brillamment éclairée située de l'autre côté du miroir. Nous verrons que les miroirs sans tain peuvent être utilisés pour produire diverses illusions optiques.

L'éénigme du sphinx décapité

Les miroirs ordinaires sont utilisés pour créer diverses illusions théâtrales. Celle de la tête parlante est rapportée par Robert-Houdin, sous le titre *Le décapité parlant*, dans son ouvrage posthume *Magie et physique amusante* [Ro1] paru en 1885. Une série de vignettes publicitaires dévoila, en 1894, six grandes illusions des plus étonnantes numéros de l'époque. Le décapité parlant était l'une d'entre elles, reproduite ci-dessous. La disposition du miroir est erronée puisque les spectateurs en aperçoivent les bords, quelle que soit leur position.



Figure 1.4 – L'extrait de viande Liebig utilise un décapité

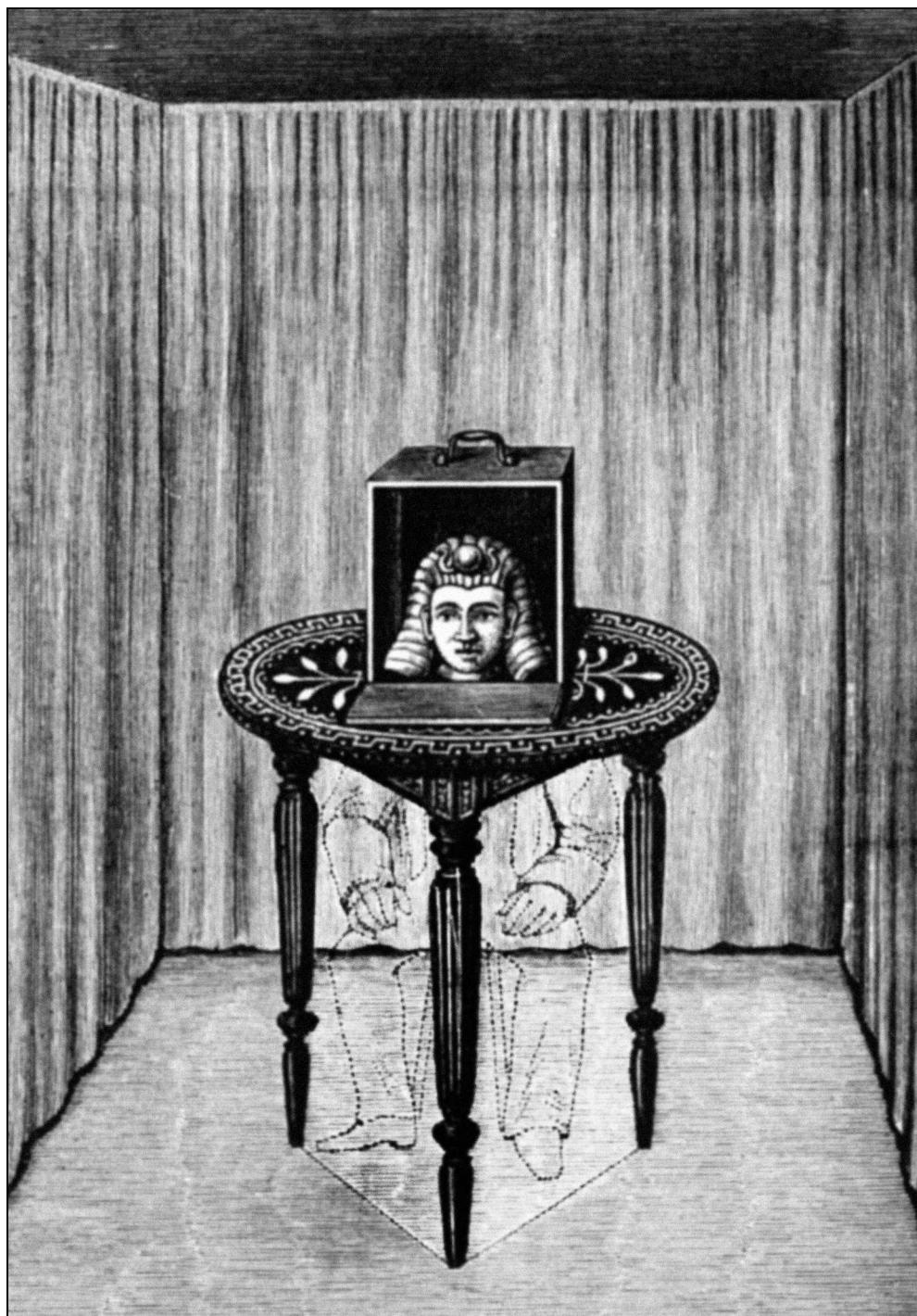


Figure 1.5 – Tête parlante de sphinx présentée sur scène

Pour être plus précis, voyons comment Robert-Houdin décrit la présentation du « décapité parlant » dans son ouvrage :

« Cette ingénieuse illusion ne portait pas primitivement ce titre effrayant. C'est sous le nom de *sphinx* qu'elle fut présentée, en 1865, à Londres, dans *Egyptian Hall*, par un prestidigitateur nommé le colonel Stodare.

[...] voici comment ce truc était présenté. Tenant en main une cassette fermée, le colonel s'approchait des spectateurs et leur racontait que, dans ses voyages en Égypte, ayant fait la rencontre d'un magicien, celui-ci était venu à mourir et lui avait légué ce petit meuble dans lequel se trouvait, depuis la plus haute antiquité, la tête vivante d'un sphinx pouvant répondre aux questions qu'on lui adressait. Le physicien interpellait alors le sphinx, qui lui répondait à travers la boîte (le colonel Stodare était ventriloque). Il déposait ensuite sur une table le précieux coffret, en abaissait le devant, et le public pouvait voir une belle tête de sphinx coiffée d'un capuchon égyptien à bandelettes dorées. Le dessous de la table sur laquelle la boîte était posée semblait entièrement à jour. Le sphinx, intelligent et ingénieur, répondait avec infiniment d'esprit et d'à-propos aux questions qui lui étaient faites par le public ; après quoi, le colonel fermait la boîte, la prenait entre ses mains, faisait dire au prisonnier un *good night* au public, et rentrait dans la coulisse avec son précieux fardeau. Ainsi présentée, ce truc fut très goûté et le succès ne s'arrêta qu'à la mort inopinée de l'intelligent prestidigitateur. »

Cette illusion est des plus simples ainsi que le montre la figure 1.5. Deux glaces dont la trace est marquée en pointillés sur la figure sont habilement dissimulées par les pieds de la table et reflètent les rideaux latéraux, identiques à ceux du fond, donnant une impression de vacuité sous la table. Le personnage qui joue le rôle du sphinx est caché dès le début derrière les glaces. Lorsque la boîte est posée sur la table, le personnage passe sa tête à travers une trappe qui s'ouvre sur la table puis soulève le fond mobile de la boîte dans laquelle il émerge.

Cette illusion n'est pratiquement plus présentée de nos jours par suite du matériel encombrant à transporter. J'ai eu l'occasion de voir cette illusion reproduite dans le hall d'un théâtre parisien où l'illusionniste *Dani Lary* présentait sur scène un festival de grandes illusions. Même à deux mètres, l'illusion est parfaite lorsque l'environnement est bien conçu.

Ce fut le cas, par exemple, de cette mise en scène dans une geôle. Présentée au cours du 19^e siècle par un musée parisien de figures de cire, cette illusion était parfaitement réussie. Le décapité répondait au public qui l'interrogeait.

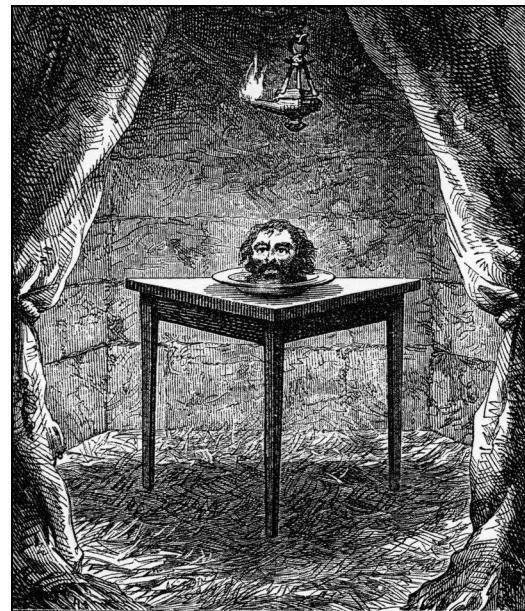


Figure 1.6 – Le décapité parlant dans une geôle

Miroirs au Musée Grévin

À la fin du 19^e siècle, Arthur Meyer, journaliste et fondateur du célèbre quotidien *Le Gaulois*, a l'idée de présenter à ses contemporains les personnalités qui font la une de son journal. Mais il désire de véritables reproductions des personnages qui font l'actualité ; pour qu'ils soient plus vivants que des statues de marbre, il les fera réalisés en cire. Pour mener à bien ce projet, il fait appel à Alfred Grévin. À la fois dessinateur humoristique, créateur de costumes de théâtre et sculpteur, ce dernier s'investit totalement dans le projet, jusqu'à lui donner son nom. Lorsque Grévin ouvre ses portes le 5 juin 1882, le succès est immédiat.



Figure 1.7 – Entrée du Musée Grévin vers 1885

En 1883, Gabriel Thomas, un grand financier à l'origine de la société d'exploitation de la Tour Eiffel et du théâtre des Champs-Élysées, assure à Grévin une structure économique qui lui permet de se développer rapidement. Il enrichit ainsi le Musée de nouveaux décors tel le Théâtre Grévin, classé à l'inventaire des Monuments Historiques.

Le fameux *Palais des Illusions* fait sensation lors de l'Exposition Universelle de 1900 à Paris. Dans un hexagone de miroirs, des milliers de lampes de couleur se reflètent à l'infini. Cette installation, unique au Monde, est rachetée par le Musée Grévin où elle devient, en 1906, l'extraordinaire *Palais des Mirages*.