



# L'optique

### L'EXPÉRIENCE AU SERVICE DE L'OPTIQUE

Trempez à mi longueur un bâton dans une eau claire et vous aurez l'impression que ce bâton est cassé au niveau de la surface. Si vous vous êtes déjà promené dans une **galerie de miroirs déformants**,



vous savez bien qu'un miroir légèrement gondolé renvoie une image très déformée. Si vous pêchez, peut-être avez-vous parfois été déçu par votre prise que vous voyiez beaucoup plus grosse dans l'eau. Tous ces phénomènes que l'on regroupe couramment sous le terme d'illusions d'optique ont beaucoup intéressé les scientifiques de toutes les époques. Aujourd'hui tous ces résultats qui paraissent au premier abord surprenants, sont connus et expliqués grâce à des lois démontrées mathématiquement en s'appuyant sur les théories physiques parfois les plus abstraites comme la relativité générale. Cependant l'essentiel des lois de l'optique s'explique très simplement grâce à des lois expérimentales découvertes très tôt, bien avant même l'émergence de la théorie ondulatoire de la lumière.

### LOIS DE KEPLER / LOIS DE DESCARTES



**Johannes Kepler** (1571 - 1630), surtout connu pour ses travaux d'astronomie (il est le premier à avoir montré que les planètes décrivent des ellipses autour du Soleil) a également grandement contribué à la naissance de la science que l'on appelle optique, c'est-à-dire l'étude et la manipulation de la lumière dans différents milieux. Mais l'étude de Kepler s'est limitée aux rayons lumineux ne déviant que très légèrement d'une trajectoire rectiligne. C'est Descartes (1596 - 1650) qui a apporté la plus importante contribution à l'optique dite géométrique, d'où le fait que les principales lois portent son nom. Selon la taille des

obstacles ou des conditions de l'expérience, la lumière peut être décrite comme une onde ou comme un train de particules (les photons) suivant une trajectoire rectiligne. La conception corpusculaire sous-tend l'optique géométrique, qui s'avère une représentation simplifiée de l'optique ondulatoire suffisante dans bien des cas. C'est la physique quantique qui réconcilie les conceptions ondulatoire corpusculaire.

### LES DEUX LOIS



**Descartes** s'est aperçu qu'un rayon lumineux, appelé rayon incident, qui pénètre dans un milieu différent (par exemple un passage de l'air à l'eau) se décomposait généralement en deux rayons, l'un réfléchi qui reste dans le premier milieu et le second qui est transmis au deuxième milieu. L'intensité de chacun de ces deux nouveaux rayons l'un par rapport à l'autre dépend de la nature des deux milieux. Ainsi un miroir ne fait que réfléchir un rayon lumineux, l'eau réfléchit et transmet un rayon frappant sa surface tandis que certains verres traités transmettent intégralement le rayon incident.

### La première loi de Descartes

Cette loi étudie la réflexion d'un rayon lumineux sur une surface. Descartes a montré que le rayon réfléchi par une surface restait dans le plan défini par le rayon incident et la droite perpendiculaire à l'interface passant par le point où le rayon lumineux frappe la surface (que l'on appelle plan d'incidence). De plus, il a remarqué que le rayon réfléchi faisait avec cette droite perpendiculaire un angle  $t$  égal à l'angle  $i$  que fait le rayon incident.

### La deuxième loi de Descartes

Cette loi concerne le rayon transmis (appelé aussi rayon réfracté) : le rayon réfracté reste également dans le plan d'incidence et fait avec la droite perpendiculaire à la surface un angle  $r$  lié à l'angle d'incidence  $i$  par la relation suivante :  $n_1 \times \sin(i) = n_2 \times \sin(r)$  où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2, c'est-à-dire le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide avec la vitesse de la lumière dans le milieu étudié, cet indice étant nécessairement plus grand que 1.

### LE PRISME

Très tôt, on s'est aperçu que les coefficients de réfraction de tous les

milieux étaient différents selon la couleur du rayon lumineux.

Cette différence reste minime dans la plupart des cas et il faut généralement deux réfractions successives pour la mettre clairement en évidence : c'est ce qui arrive avec un prisme. Ce qu'on appelle **prisme** est un coin de matériau autre que l'air, souvent du verre. La seule loi de la réfraction de Descartes

ainsi que quelques calculs géométriques simples, permettent de calculer la déviation entre le rayon incident et le rayon émergent de l'autre côté du prisme. Cette déviation dépend en fait de trois facteurs : l'angle d'incidence (si l'incidence est trop petite, le rayon reste prisonnier du prisme), l'angle du prisme et l'indice de réfraction du matériau constituant le prisme qui lui-même dépend de la couleur du rayon ou, en adoptant un langage d'optique ondulatoire, la longueur d'onde du rayon lumineux. Ce résultat a longtemps été très important car il a permis à des générations d'opticiens de calculer les coefficients de réfraction



de différents milieux pour différentes longueurs d'onde données.

Le même phénomène se produit lors de la formation des **arcs-en-ciel**



au niveau des gouttelettes d'eau qui leur donnent naissance.

### LES MIRAGES

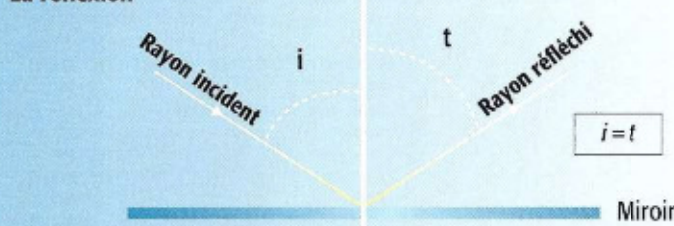
Une autre application de la loi de la réfraction de Descartes est l'explication d'un phénomène très surprenant : les mirages. On comprend assez intuitivement que la vitesse de la lumière dans un milieu dépend de l'interaction de la lumière avec le matériau traversé. Pour une composition chimique donnée, plus un matériau est dense et plus il interagit avec la lumière et la ralentit. C'est Gladstone qui a mis en évidence ce résultat qui permet d'expliquer les mirages. En effet, plus un matériau est chaud et moins il est dense, or la densité des gaz est très sensible aux variations de température ce qui fait que l'indice de réfraction de l'air n'est pas le même partout. Dans les déserts, mais aussi dans des zones plus tempérées, l'air qui est en

contact avec le sol longtemps chauffé par le Soleil est plus chaud que l'air qui est en hauteur. L'air est donc plus dense en hauteur et par conséquent son indice de réfraction est plus important à 2 mètres du sol que sur le sol même. De façon inverse, aux pôles, lorsque le vent est plus chaud que la mer, l'air en contact avec la surface de l'eau est plus froid que l'air en altitude et son indice de réfraction est plus petit à quelques mètres de hauteur qu'à la surface.

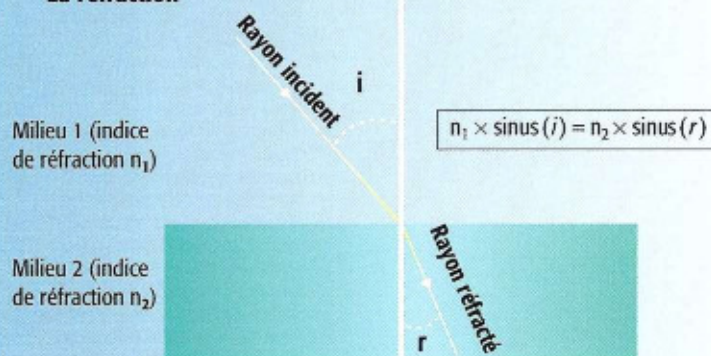
La loi de Descartes pour la réfraction peut être interprétée différemment lorsque plutôt que d'étudier le passage de la lumière à une surface, on étudie un rayon lumineux traversant un grand nombre de surfaces. On peut alors considérer que c'est la valeur  $n \times \sin(i)$  qui reste constante sur le trajet du rayon lumineux. La fonction sinus est une fonction croissante, c'est-à-dire que lorsque  $i$  augmente  $\sin(i)$  augmente et réciproquement. Si on considère le cas du désert chaud, les surfaces d'air ayant le même indice de réfraction sont parallèles au sol et, pour conserver les mêmes notations que précédemment, l'angle  $i$  est donc l'angle que fait le rayon lumineux avec la verticale. Si on considère un rayon lumineux bleu qui vient du ciel, lorsque celui-ci se rapproche du sol, il rencontre un  $n$  de plus en plus petit, l'angle  $i$

## Les deux lois de Descartes

### La réflexion



### La réfraction



### Optique et technologie

**40 000 km**  
Longueur du plus long câble optique au monde.

**2,44 m**



Diamètre du miroir principal du télescope Hubble.

**7**

Nombre de miroirs du télescope Giant Magellan Telescope (10 fois plus puissant que Hubble), qui sera opérationnel dans une dizaine d'années.

**3 000**

Nombre d'optiques que le laser mégawatt, bientôt en activité à Bordeaux, consommera par an (du à la puissance du laser).

**0,01 mm**

Épaisseur d'une lentille plate mise au point par V. Presnyakov et T. Galsban du centre d'optique, photonique et laser (COPL) au Canada (2005).

### Le miroir du Keck telescope



**10 m**  
de diamètre

augmente donc jusqu'à être égal à  $90^\circ$ . Puis le rayon lumineux remonte, l'air qu'il traverse a un  $n$  de plus en plus grand et donc l'angle  $i$  diminue et le rayon remonte de plus en plus. Une personne voyant ce rayon lumineux bleu venir du sol aura l'impression de voir de l'eau alors qu'en réalité c'est le ciel qu'elle voit ! Plus surprenant encore est le mirage du pôle car l'observateur voit au contraire des objets se trouvant à la surface de l'eau flotter dans le ciel.

#### LA FIBRE OPTIQUE

La fibre optique est un outil de plus en plus utilisé et dont le principe de fonctionnement repose entièrement sur les deux lois de Descartes. Intéressons-nous à nouveau à la loi de Descartes pour la réfraction :  $n_1 \times \sin(i) = n_2 \times \sin(r)$ . La fonction sinus ne prenant que des valeurs inférieures à 1, on s'aperçoit que pour que  $\sin(r)$  soit plus petit que 1, il faut impérativement que  $\sin(i)$  soit plus petit que  $n_2/n_1$ . Or si  $n_1$  est plus grand que  $n_2$ , ce résultat n'est possible pour toutes les valeurs de  $i$  : il existe donc un angle maximal qui, s'il est dépassé, empêche la réfraction. C'est-à-dire qu'un rayon arrivant de façon trop rasante à la surface d'un milieu de plus petit indice de réfraction sera entièrement réfléchi : on dit que le rayon est sorti du cône de réfraction du second milieu. C'est cette propriété qui est utilisée dans les **fibres optiques** : les fibres



optiques sont constituées d'un cœur et d'une gaine d'indice de réfraction moins élevé. Pour qu'un rayon lumineux soit transmis d'une extrémité à l'autre de la fibre, il faut qu'à chaque fois qu'il s'écarte du cœur de la fibre, il soit intégralement réfléchi par la gaine. Pour cela, il faut impérativement que le rayon lumineux reste toujours en dehors du cône de réfraction de la gaine. Pour une fibre à peu près rectiligne, comme celles utilisées à l'intérieur de certains composés électroniques, il suffit que le rayon lumineux soit correctement émis à l'entrée de la fibre optique. Les choses se compliquent pour les fibres destinées à être courbes car

l'angle de courbure de la fibre peut faire entrer le rayon lumineux dans le cône de réfraction de la gaine et perdre le signal. En s'inspirant de l'explication des mirages, l'idée de faire des fibres à gradient d'indice est apparue. Dans le cœur de ces fibres d'une nouvelle génération, l'indice de réfraction est de plus en plus petit au fur et à mesure que le rayon lumineux s'éloigne du cœur de la fibre : ainsi on s'assure que le rayon, s'il l'atteint, arrive toujours de façon très rasante à la surface de la gaine et est donc systématiquement intégralement réfléchi par celle-ci. La fibre optique permet donc de faire suivre des chemins très sinueux à la lumière ce qui peut être intéressant esthétiquement mais qui est surtout utile en médecine (éclairage de l'intérieur du corps pour les **endoscopies**, pulvérisation de tumeur



au laser...) et dans les télécommunications car la lumière se propageant beaucoup plus vite que l'électricité, elle permet un très gros débit d'informations.

#### L'INCIDENCE DE BREWSTER

Bien que les lois de Descartes permettent d'expliquer un très grand nombre de phénomènes ou de grandes avancées technologiques, il ne faut pas penser que l'optique n'a pas évolué depuis le  $xiii^e$  siècle. Bien au contraire, la vision ondulatoire de la lumière, pour s'imposer au  $xix^e$  siècle a dû redémontrer les lois de Descartes (jusqu'alors purement expérimentales) et les améliorer. En 1810, le physicien Étienne Malus (1775 - 1812), découvrit le phénomène de polarisation de la lumière en observant la réflexion du Soleil couchant sur ses fenêtres et celles du palais du Luxembourg se trouvant en face de sa chambre à l'observatoire.



C'est plus tard en 1815 que le physicien écossais **David Brewster** (1781 - 1868) améliora la loi de

Descartes pour la réflexion. Si on considère le rayon incident comme une onde non polarisée, ce qui est le cas pour toutes les lumières naturelles, on peut la voir comme étant la somme de deux ondes polarisées, l'une selon une direction parallèle au plan d'incidence et la seconde lui étant perpendiculaire. L'amélioration qu'ont apporté Malus et Brewster a consisté à montrer que ces deux ondes ne se réfléchissent pas de la même façon. Si on note  $S_{||}$  et  $S_{\perp}$  les intensités des deux composantes du rayon incident et  $S'_{||}$  et  $S'_{\perp}$  celles du rayon réfléchi, on a alors :  $S'_{||} = -S_{||} \tan(i-r) / \tan(i+r)$  et  $S'_{\perp} = -S_{\perp} \sin(i-r) / \sin(i+r)$  avec  $i$  étant l'angle d'incidence et  $r$  l'angle de réfraction. Ce résultat est intéressant car il est le premier à tenir compte de l'intensité lumineuse du rayon lumineux et surtout il fait apparaître une valeur particulière de  $i$ , appelée incidence de Brewster, telle que  $S'_{||}$  soit nulle. Le rayon réfléchi d'une lumière non polarisée est alors polarisé ! Ce résultat est une preuve du caractère ondulatoire de la lumière et il permet de nombreuses applications par exemple en photographie où on utilise des polariseurs pour éliminer les reflets.

#### LES MIROIRS

La légende prétend qu'Archimède aurait incendié la flotte romaine attaquant Syracuse en faisant converger les rayons solaires sur les coques des bateaux à l'aide de grands miroirs appelés « miroirs ardents ». Que cette histoire soit vraie ou non et que cette action ait ou non eu un impact sur l'issue de la guerre entre Rome et Syracuse n'est pas important. Ce qu'il faut retenir de cette histoire c'est que bien avant d'avoir la moindre idée de ce qu'est la lumière, les hommes ont cherché à la maîtriser et à l'utiliser. Dans l'Antiquité, les Égyptiens maîtrisaient la fabrication des miroirs et cette technique n'a eu de cesse de s'améliorer jusqu'à nos jours. Si les miroirs plats sont communément présents dans la vie courante, il existe également des miroirs sphériques ou paraboliques dont les propriétés sont extrêmement utiles aux astronomes.

#### LES MIROIRS CONCAVES

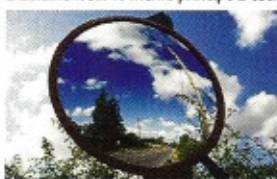


On appelle **miroirs concaves** les miroirs ayant la forme d'une section de sphère creuse dont la face intérieure est réfléchissante. La loi de Descartes sur la réflexion permet d'expliquer les propriétés intéressantes de ces miroirs : tous les rayons provenant de l'infini ou d'une distance très grande devant les dimensions du miroir, sont réfléchis par le miroir concave de sorte qu'ils passent par un point particulier appelé foyer du miroir : ce point se trouve toujours sur la droite reliant le sommet du miroir au centre de la sphère. C'est cette propriété, rigoureusement valable pour les miroirs paraboliques et de manière approchée pour les miroirs sphériques,

qui aurait été utilisée par Archimède qui a bougé ses miroirs de sorte que leurs foyers soient sur la coque des navires. Selon qu'un objet se trouve devant ou derrière le foyer du miroir, son image peut-être agrandie ou rétrécie et être projetée plus ou moins loin. De plus ces miroirs permettent de recréer des images dites virtuelles qui sont du côté opaque du miroir : ces images n'existent pas en tant que telles car si on se place derrière le miroir on ne voit bien entendu rien mais si on place un autre miroir du côté réfléchissant du premier, alors l'image qu'il renvoie se crée comme s'il lui envoyait cette image virtuelle.

#### LES MIROIRS CONVEXES

Les **miroirs convexes** fonctionnent exactement sur le même principe à ceci



près qu'en ce qui les concerne, c'est la face extérieure de la sphère qui est réfléchissante et le foyer se trouve du côté opaque du miroir, c'est-à-dire que les rayons lumineux réfléchis ne passent pas réellement par le foyer mais sont portés par la droite passant par ce point. De même que les miroirs concaves, les miroirs convexes permettent d'obtenir des images agrandies ou rétrécies et projetées plus ou moins loin mais les images qu'ils forment sont toujours virtuelles.

#### APPLICATIONS DES MIROIRS SPHÉRIQUES

Les miroirs sphériques ne sont jamais utilisés seuls mais dans des montages faisant intervenir plusieurs miroirs des deux types. Le montage le plus répandu est celui du télescope de Cassegrain, comme par exemple le **Cassegrain-focus telescope** à la station de



Xinglong de l'observatoire de Beijing. Un télescope est constitué d'un miroir concave, l'image d'un objet à l'infini se forme au foyer du miroir. Pour observer cette image, il est nécessaire d'utiliser un autre miroir. On place un miroir sphérique convexe entre le sommet et le foyer du premier. Il faut alors pratiquer une ouverture au sommet du premier miroir pour laisser passer la lumière. Les miroirs des télescopes utilisés dans les observatoires peuvent avoir un diamètre de l'ordre de 1 à 3 m et pesent plusieurs tonnes. On utilise également de nombreux miroirs paraboliques et hyperboliques.

#### LES LENTILLES

Les lentilles sont les optiques les plus utilisées de nos jours, tant dans la vie courante (lentilles ophtalmiques, lunettes) que par les scientifiques

(microscope, lasers, etc.). Leurs propriétés si utiles s'expliquent toutes grâce à la loi de Descartes sur la réfraction.

#### LENTILLES CONVERGENTES /

#### LENTILLES DIVERGENTES

Il existe deux types de lentilles :

- les lentilles convergentes concentrent en un point appelé point focal image tous les rayons lumineux provenant de l'infini et envoient à l'infini l'image d'un objet se trouvant au point focal objet ;
- les lentilles divergentes fonctionnent sur le même principe mais ont leurs deux points focaux inversés et élargissent donc les rayons provenant de l'infini.

Des constructions géométriques assez simples permettent, grâce à la loi de la réfraction, de calculer la taille et le lieu de l'image d'un objet ne se trouvant pas à l'infini. La plupart des lentilles fonctionnent aussi bien dans un sens que dans l'autre et elles permettent de faire des montages complexes reposant sur des associations de divers types de lentilles.



La **lunette astronomique**, utilisée pour étudier les astéroïdes et les comètes, et le microscope sont des exemples de montages qui agrandissent une image et la projettent à l'infini.

L'œil fonctionne comme une lentille convergente dont le point focal est modifié par les muscles qui courbent plus ou moins le cristallin (accommodation). La myopie et l'hypermétropie correspondent à des puissances de convergence trop fortes ou trop faibles. Les astigmates ont une dissymétrie de l'œil qui empêche l'image de se former correctement. Les presbytes quant à eux ont les muscles qui fatiguent et n'arrivent plus à accommoder.

#### LENTILLES GRAVITATIONNELLES

Il est remarquable que les lois de Descartes, pourtant vieilles de plus de 350 ans contribuent encore aujourd'hui aux découvertes scientifiques les plus poussées. En effet, la théorie de la relativité d'Einstein explique que la lumière a un support : l'espace-temps qui est déformable par les masses. On peut dans certains cas considérer la déformation de l'espace-temps comme étant un ensemble de milieux où la lumière se propage à des vitesses différentes et on peut ainsi lui appliquer la loi de Descartes sur la réfraction. C'est ainsi qu'on explique certains phénomènes troublants qu'on appelle aberrations gravitationnelles où de grandes masses (galaxies, trous noirs) jouent le rôle de lentilles, souvent non symétriques ce qui explique qu'on voit parfois plusieurs images d'un même objet céleste. On peut donc supposer que les lois de l'optique ont encore de beaux jours devant elles car elles sont simples et permettent d'expliquer de nombreux phénomènes !

#### L'incidence de Brewster

