

Introduction

L'optique est la branche de la physique qui s'intéresse aux phénomènes lumineux. Elle apporte des réponses aux questions suivantes : Qu'est-ce que la lumière ? Comment décrire sa propagation ? Comment contrôler sa propagation de façon utile (comment faire des images claires et fidèles) ? Ces trois questions sont intimement reliées, et l'histoire des sciences a vu plusieurs rebondissements spectaculaires dans la façon de les aborder.

Courte introduction historique

Depuis l'antiquité, la lumière intrigue et fascine les hommes. Voici quelques événements-clé.

- Ptolémée, vers 150, se base sur des *expériences* pour étudier la réfraction et établit des tables donnant l'angle que fait le rayon lumineux dans le milieu réfringent en fonction de l'angle d'incidence. Il établit ces tables dans le cas de l'eau et du verre. Il n'exprime pas ces résultats par une formule, alors que par ailleurs il avait aussi établi les tables de ce qui correspond aujourd'hui aux fonctions trigonométriques sinus et cosinus. Il avait en main les outils mathématiques pour écrire les lois de Snell-Descartes, mais ne le fait pas. Il faudra alors attendre 1500 ans...
- Vers 1600, familier des ouvrages d'Alhazen, opticien arabe du moyen-âge, Johannes Kepler (1571–1630) propose une loi de la réfraction de la forme $i = nr$. Cette loi est inexacte si l'on s'en tient à la rigueur, mais se trouve être approximativement valide dans certaines conditions (voir la suite du cours). À partir de cette loi, il explique le fonctionnement des lentilles et comprend le fonctionnement de l'œil en montrant que le cristallin sert à faire une image (inversée, ce qui posa un problème à pas mal de gens qui trouvaient ça absurde, car on voit à l'endroit) sur la rétine qui est l'élément sensible.
- En 1621, Willebrodd Snell (1580–1626) découvre les lois de la réfraction, et en 1637 René Descartes (1596–1650) les publie. Il n'est pas clair qu'il ne se soit pas approprié le résultat de Snell (lors de séjours en Hollande) et ses conceptions sur la lumière ne sont pas exemptes d'incohérences. Cependant, sa formulation de la loi de la réfraction est intéressante, car contrairement à celle de Snell, elle s'intéresse à ce qui se passe au niveau de l'interface entre les milieux.
- En 1665, Isaac Newton (1643–1727) décompose la lumière blanche en faisceaux colorés grâce à un prisme. Ses nombreuses expériences d'optique le mènent à une description corpusculaire de la lumière qui prévaudra pendant plus d'un siècle.
- La même année Francesco Grimaldi (1618–1663) observe le phénomène de diffraction.
- En 1807, Thomas Young (1773–1829) réalise l'expérience des trous d'Young et met en évidence ce qui sera rapidement reconnu comme un phénomène d'interférences.
- Vers 1818, Augustin Fresnel (1788–1827) propose une théorie ondulatoire de la lumière, déjà suggérée sous une forme moins élaborée et moins précise par Christiaan Huygens (1629–1695) un siècle plus tôt.

Il propose sa théorie à l'Académie des Sciences, dans le cadre d'un concours. Parmi les membres chargés d'évaluer et de juger le travail de Fresnel figure Denis Poisson (1781–1840). Il remarque que si l'on en croit la théorie de Fresnel, le centre de l'ombre d'un objet circulaire devrait être brillant, ce qui lui semble absurde. Le prix est quand même attribué à Fresnel. Arago décide de faire l'expérience soigneusement et observe en effet ce point brillant ! C'est le premier grand succès de la théorie de Fresnel (ce dernier introduira aussi la notion de polarisation, qui malgré le scepticisme qui entourera son accueil, s'avérera une avancée fondamentale). Il ne fait guère de doute à partir de ce moment que la lumière est une onde. Il reste toutefois une question fondamentale : de quel milieu la lumière est-elle une vibration ?

- Vers 1880, James Maxwell (1831–1879) synthétise de manière magistrale ce qu'on savait alors de l'électromagnétisme, ce qui mène à la prédiction de l'existence d'ondes électromagnétiques, dont la vitesse est du même ordre de grandeur que celle de la lumière. La confirmation ne tardera pas, la lumière est une onde électromagnétique (Hertz). La première des questions a enfin trouvé une réponse claire !
- Au début du xx^e siècle, l'histoire rebondit. Max Planck (1858–1947), Albert Einstein (1879–1955) et d'autres montrent que la lumière se comporte aussi de façon corpusculaire. Le concept de photon est introduit. Le développement de la physique quantique confirmera cette duplicité, la dualité onde-corpuscule.
- En parallèle, le développement de la relativité restreinte par Albert Einstein, à partir de 1905, s'appuie fortement sur certaines propriétés étranges de la lumière. En particulier, sa vitesse est la même pour tous les observateurs, même si ceux-ci sont animés d'une vitesse relative !

Parallèlement à ces développements théoriques, des instruments d'optique de plus en plus performants sont mis au point. Chaque avancée conceptuelle permettra d'améliorer la qualité des images que l'on peut former avec ces instruments. Les lois de Snell-Descartes permettront de comprendre comment se forment les aberrations géométriques et de concevoir des instruments qui les limitent. L'optique ondulatoire révélera les limites imposées par le phénomène de diffraction sur la formation des images et sur le pouvoir de résolution des instruments d'optique.

Aujourd'hui, on distingue plusieurs approches de l'optique, lesquelles se trouvent suivre le cheminement historique.

- **L'optique géométrique** décrit la lumière comme un ensemble de rayons lumineux, obéissant à un ensemble de règles géométriques très simples. Ce sera l'objet de ce cours. Elle permet d'étudier les phénomènes de réflexion et de réfraction, et fournit les bases pour une première étude des instruments d'optique. On n'y spécifie pas la nature de la lumière.
- **L'optique ondulatoire** décrit la lumière comme une onde (toujours sans spécifier sa nature). Elle permet de comprendre le phénomène d'interférences lumineuses. En s'appuyant sur le principe de Huygens-Fresnel, elle permet aussi de comprendre le phénomène de diffraction. Enfin, elle permet aussi de traiter de façon quantitative les questions liées à la *quantité* de lumière (photométrie et radiométrie).
- **L'électromagnétisme** permet de comprendre les interactions de la lumière avec la matière, et permet aussi de cerner les limites de validité des deux approches précédentes.
- **L'optique quantique** ou **photonique**, branche relativement récente et en plein essor, permet de décrire les phénomènes lumineux dans des conditions où les approches précédentes ne sont pas adaptées. Le domaine de l'opto-électronique ainsi que celui des lasers par exemple, s'appuient fortement sur cette approche.

Mais n'allons pas trop loin ni trop vite, ce cours posera la première pierre de ce gros édifice, en s'intéressant à l'optique géométrique, qui possède son lot de surprises et de merveilles...

Les applications de l'optique géométrique

L'optique géométrique a de très nombreuses applications. Par exemple,

- la focalisation des rayons lumineux, par exemple dans les fours solaires (cf la centrale Thémis) ;
- le guidage de la lumière (fibres optiques) ;
- la formation des images dans les instruments d'optique (télescopes, microscopes, projecteurs vidéo, appareils photo, caméra de cinéma, loupe, jumelles, lunette astronomique et lunette terrestre) ;
- elle permet de comprendre la vision humaine (et des animaux) et de corriger ses éventuels défauts ;
- elle permet aussi de comprendre les mirages, dont les mirages gravitationnels ;

- elle est mise en œuvre dans les programmes de synthèse d'image (raytracing).

Les bases de l'optique géométrique

1 Rayon lumineux

1.1 Définition

L'optique géométrique est basée sur l'hypothèse suivante :

Un faisceau de lumière peut être divisé en sous-faisceaux arbitrairement fins, que l'on peut étudier de façon indépendante.

Dans la limite où ces sous-faisceaux sont infiniment fins, on obtient des lignes unidimensionnelles appelées **rayons lumineux**. En toute rigueur, cette hypothèse est fautive, mais l'électromagnétisme permet de montrer que dans certaines conditions, elle permet de rendre compte de façon approchée du comportement réel de la lumière. Elle est d'autant mieux vérifiée que la longueur d'onde λ de la lumière considérée est petite. Cette façon de voir les choses n'est cependant pas très utile, car on dispose rarement d'un bouton permettant de régler λ sur les sources lumineuses. . . L'hypothèse énoncée plus haut est aussi généralement très bien vérifiée quand les dimensions ℓ des ouvertures qui limitent le trajet de la lumière sont grandes devant la longueur d'onde, ou que l'on ne s'intéresse pas à ce qui se passe sur des angles plus petits que $\alpha \sim \lambda/\ell$. Nous n'avons pas le temps de développer ce point ici, vous verrez tout ça l'an prochain, patience !

La notion de rayon lumineux est donc une idéalisation qui, malgré ses limites (tant qu'on n'essaie pas de les dépasser), constitue un outil puissant pour étudier la propagation de la lumière.

1.2 Propagation en ligne droite

Le principe de base de l'optique géométrique est le suivant :

Dans un milieu transparent homogène, les rayons lumineux sont des droites.

Avant d'explorer quelques conséquences de ce premier principe, nous allons énoncer les autres phénomènes qui peuvent se produire quand le milieu n'est pas homogène ou pas transparent :

- Certains matériaux peuvent arrêter la lumière ; les rayons lumineux s'y terminent. On dit que ces matériaux sont **opaques** ;
- À l'interface entre deux milieux différents, la lumière peut être **réfléchie**, partiellement ou intégralement ;
- Dans certains cas, une partie de la lumière peut aussi continuer à se propager dans le second milieu, on dit qu'elle est **réfractée**. Nous étudierons ces deux derniers phénomènes dans ce chapitre.

- D'autres phénomènes se produisent, comme la réflexion diffuse ou l'absorption, mais nous ne les aborderons pas ici.

1.3 Sources lumineuses

Une source lumineuse est un système physique émettant de la lumière. Plusieurs processus physiques conduisent à l'émission de lumière (accélération de charges électriques, transition atomique, annihilation particule/antiparticule, etc.), et il existe de nombreux types de sources différentes :

- les sources thermiques, par exemple les lampes à incandescence, les bougies, le Soleil ;
- les sources spectrales, par exemple les lampes à vapeur de sodium, les lampes à décharge en général ;
- les lasers.

Dans le cadre de l'optique géométrique, une source est simplement considérée comme un dispositif dont sont issus des rayons lumineux. Il est parfois pratique de décomposer une source étendue en une multitude de sources ponctuelles, nous y reviendrons très bientôt.

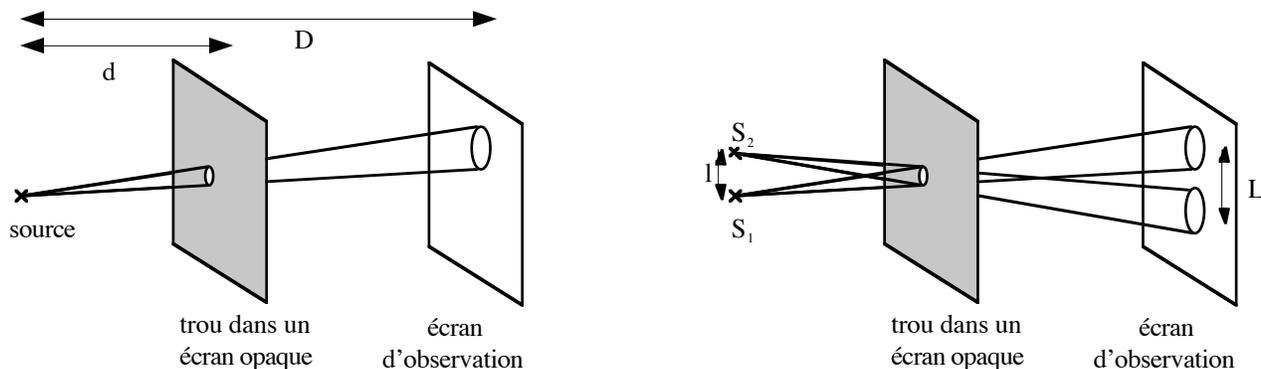
[Petit dessin]

2 La chambre noire

Nous allons nous attarder un peu sur la propagation en ligne droite. Cette propriété très simple va nous permettre d'introduire quelques notions qui seront utiles dans la suite, dans des situations plus complexes.

2.1 Principe

Le principe de la chambre noire est connu depuis l'antiquité, il consiste en un trou de petites dimensions percé dans un écran opaque. On place derrière ce trou un écran d'observation. La lumière issue d'une source A se propage en ligne droite jusqu'au premier écran, et les rayons ne passant pas par le trou sont arrêtés. On observe donc sur le second écran une tache lumineuse elliptique.



2.2 Propriétés

La hauteur H de cette tache se calcule facilement en utilisant le théorème de Thalès [rappel du théorème de Thalès]. On trouve que

$$H = 2r \times \frac{D}{d}$$



FIG. 1.1: Un exemple de sténopé artisanal (à gauche) et une image qu'il a permis d'obtenir (à droite).

En présence de deux sources espacées transversalement d'une distance ℓ , on observe deux taches sur l'écran, séparées d'une distance

$$L = \ell \times \frac{D - d}{d}$$

En présence d'une multitude de sources formant un objet, on obtient une image pourvu que le trou soit suffisamment petit (il ne faut pas donner au mot « image » un sens trop précis, nous y reviendrons en détail dans la suite).

[Dessin Mickey]

Peut-on utiliser ce dispositif en pratique pour faire des images? En général, on cherche à obtenir des images qui aient les propriétés suivantes :

- Les images doivent être **nettes** ;
- Elles doivent être **lumineuses** ;
- On cherche aussi souvent à ce qu'elles soient de **dimensions bien définies** (par exemple de la dimension du récepteur CCD d'un appareil photo).

Dans le cas de la chambre noire, l'image est floue sur une distance de l'ordre de H , qui est proportionnelle à la taille du trou r . Pour obtenir de meilleures images, une solution semble donc s'imposer : il faut diminuer la taille du trou. En fait, cette solution présente deux défauts. D'une part, plus le trou est petit, plus la quantité de lumière qui compose l'image est faible, si bien que celle-ci peut devenir trop faible pour être perçue. D'autre part, quand le trou devient trop petit, le phénomène de diffraction devient important et l'image redevient de plus en plus floue.

De plus, la dimension de l'image est fixée par la distance $D - d$, et pour avoir des images de grandes dimensions il faudrait une chambre noire très longue, ce qui n'est pas très pratique. Une grande partie de ce cours sera consacrée à l'étude de systèmes permettant de faire des images de meilleure qualité.

2.3 Applications

Malgré les limitations que nous venons de signaler, le principe de la chambre noire est mis en œuvre dans les **sténopés**. Ce sont des appareils photographiques constitués d'un simple trou dans une boîte obscure, au fond de laquelle on place une pellicule photosensible. Les sténopés sont encore utilisés de nos jours, car les clichés qu'ils permettent d'obtenir possèdent certaines propriétés appréciées des photographes.

Ce principe permet aussi de comprendre le fonctionnement des yeux de certains animaux marins (par exemple le nautilus). Dans ces yeux, la rétine tapisse le fond d'une cavité, fermée par un organe qui contrôle la taille d'un trou qui laisse passer la lumière. Les biologistes pensent qu'il pourrait s'agir d'une première étape évolutive vers des systèmes oculaires plus complexes utilisant une lentille.

3 Les lois de la réflexion

Nous allons maintenant aborder le premier type de changement que peuvent subir les rayons lumineux, la réflexion. Ce terme désigne le phénomène qui survient quand un rayon lumineux arrive sur certains types de surface et se voit renvoyé vers l'arrière. Ces surfaces sont naturellement appelées **surfaces réfléchissantes**. Il peut s'agir de surfaces argentées, comme les miroirs, ou de l'interface entre deux milieux transparents, comme les vitres habituelles.

3.1 Loi de la réflexion

Avant d'écrire la loi de la réflexion, il nous faut introduire quelques termes. On appelle **normale** à une surface la direction perpendiculaire à cette surface. Pour une surface non plane, la direction de la normale dépend du point considéré. On appelle **rayon incident** le rayon lumineux auquel on s'intéresse et qui donnera lieu à un **rayon réfléchi**. On appelle **plan d'incidence** le plan contenant à la fois le rayon incident et la normale à la surface (au point atteint par le rayon incident). Si le rayon incident est dirigé selon la normale, il y a une infinité de plans incidents. On appelle **angle d'incidence** l'angle entre le rayon incident et la normale. La réflexion obéit à une règle simple :

Le rayon réfléchi est le symétrique du rayon incident par rapport à la normale.

Il est donc contenu dans le plan d'incidence. Il s'ensuit que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. Ceci est illustré sur la figure suivante. On peut noter que quand le rayon incident est dirigé selon la normale, le rayon réfléchi l'est aussi, la lumière est simplement renvoyé dans sa direction initiale.

3.2 Application : le miroir plan

Nous allons nous intéresser au cas le plus simple, d'un miroir plan et d'une source lumineuse ponctuelle A placée devant. Nous allons déterminer les propriétés de tous les rayons réfléchis.

Les prolongements de tous les rayons réfléchis sont symétriques des rayons incidents par rapport au miroir. Les triangles AMA' sont isocèles en M , si bien que $SA = SA'$. On écrit plutôt

$$\overline{SA'} = -\overline{SA} \quad (1.1)$$

où la barre indique que l'on a affaire à des **distances algébriques**.

Les rayons réfléchis semblent donc tous provenir d'un point A' , symétrique de A par rapport au miroir. Pour

Aparté sur les approximations en physique Faire des approximations est une activité normale en sciences, ce n'est pas un manque de rigueur, bien au contraire. Les physiciens disposent en général de moyens pour estimer l'ordre de grandeur de l'erreur qu'ils commettent en faisant une approximation, et peuvent ainsi se placer dans des conditions où ces erreurs sont très faibles.

Par exemple, quand on écrit que $\sin \alpha \approx \alpha$, cette approximation se justifie par les **développements limités**. De façon générale, on a

$$\sin x = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7 - \dots$$

où $n! \equiv n \times (n-1) \times (n-2) \times \dots \times 3 \times 2 \times 1$. On peut estimer l'ordre de grandeur de termes qu'on néglige en tronquant cette série à l'ordre 1. Par exemple, pour $x = 0,1$, le terme $x^3/6$ vaut $1,67 \times 10^{-4}$ et les suivants qui sont encore bien plus petits.

Exercice 1 : Calculer à la machine le sinus de 0,5 en utilisant le développement limité précédent.

De même, les approximations que l'on fait en négligeant les effets ondulatoires sont contrôlés de manière précise.

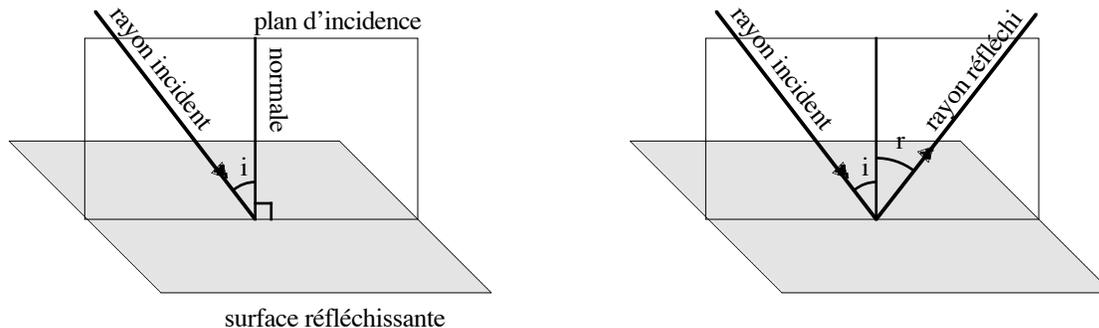


FIG. 1.2: Définitions des termes employés et représentation du rayon réfléchi.

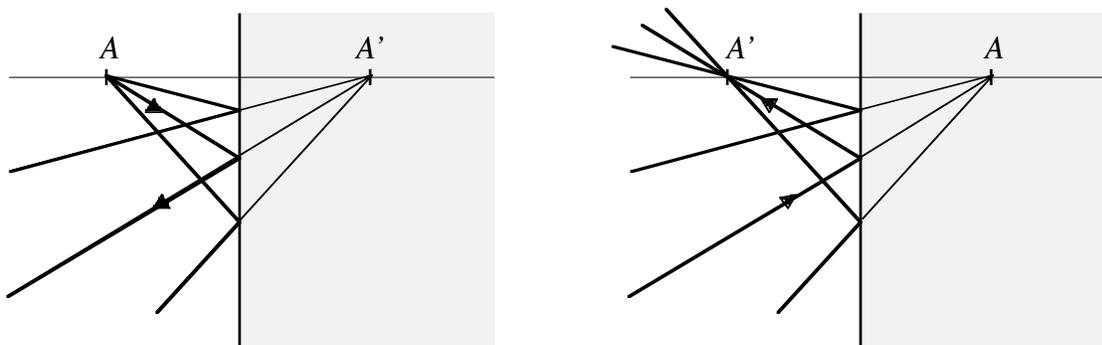


FIG. 1.3: Rayons lumineux réfléchis par un miroir plan, formant une image virtuelle à gauche et une image réelle à droite.

un observateur, tout se passe comme si la lumière avait été émise par A' et non par A . Cette observation doit sembler triviale à quiconque a déjà regardé dans un miroir !

3.3 Stigmatisme rigoureux, conjugaison

Il est remarquable que les prolongements des rayons réfléchis se coupent tous exactement au même point (nous verrons plus tard que c'est le cas pour seulement très peu de systèmes optiques). Cette propriété porte le nom de **stigmatisme**. Plus précisément,

On dit qu'un système optique est stigmatique pour le couple de points (S, S') quand il transforme tous les rayons qui le traversent et qui sont issus de A (ou dont les prolongements sont issus de A) en rayons qui se croisent (ou dont les prolongements se croisent) en A' .

On parle alors de **stigmatisme rigoureux**, pour différencier cette situation d'une autre, moins restrictive, que nous introduirons plus loin. On dit que les points A et A' sont **conjugués** par le système optique (en l'occurrence le miroir plan). Quand les rayons eux-mêmes se croisent, on dit que le point constitue un **objet réel** (pour A) ou une **image réelle** (pour A'), alors que quand ce sont les prolongements qui se croisent, on parle d'**objet virtuel** (pour A) ou d'**image virtuelle** (pour A').

[Dessin réel /virtuel]

La relation (1.1) est appelée **relation de conjugaison**.

Le miroir donne d'un objet virtuel une image réelle, et vice-versa.

3.4 Autre application : le catadioptr

Le catadioptr est un coin de miroirs permettant de renvoyer un rayon lumineux dans la direction exactement opposée à sa direction incidente. Détailler l'exemple du catadioptr déposé sur la Lune pour réfléchir la lumière laser qu'on utilise pour mesurer la distance Terre-Lune.

3.5 Autre application : stéréoscope

Voici une application amusante, dans laquelle le miroir est utilisé pour donner une sensation de relief, en créant une image virtuelle destinée à être vue par un œil et qui se superpose à une autre, correspondant à un point de vue légèrement différent, vue par l'autre œil.

4 Les lois de la réfraction

Nous allons maintenant aborder le second type de changement que peuvent subir les rayons lumineux, la réfraction. Ce terme désigne le phénomène qui survient quand un rayon lumineux arrive sur certains types de surfaces, séparant deux milieux transparents et se voit partiellement transmis dans le second milieu.

4.1 Loi de Snell-Descartes relative à la réfraction

Avant d'écrire la loi de la réfraction, il nous faut à nouveau introduire quelques termes. On appelle **rayon réfracté** le rayon lumineux transmis dans le second milieu. La séparation entre deux milieux transparents différents est appelée un **dioptr**.

La réfraction obéit à la loi de Snell-Descartes :

Le rayon réfracté est contenu dans le plan d'incidence. L'angle de réfraction i' est relié à l'angle d'incidence i par la relation

$$\boxed{n \sin i = n' \sin i'} \quad [\text{loi de Snell-Descartes}] \quad (1.2)$$

faisant intervenir deux grandeurs n et n' caractéristiques de chaque milieu et indépendantes de i et i' .

Les quantités n et n' sont appelées les **indices optiques**, **indices de réfraction** ou encore **indices** tout court, des milieux. On peut les déterminer expérimentalement en traçant la courbe représentant $\sin i$ en fonction de $\sin i'$. Par convention, l'indice du vide vaut $n \equiv 1$. Pour tous les milieux, l'indice est plus grand que 1. Par exemple, l'indice de l'eau vaut environ $n_{\text{eau}} \approx 1,3 \approx 4/3$ et l'indice des verres courants est de l'ordre de $n_{\text{verre}} \approx 1,5$.

Distances algébriques On utilise en optique des **distances algébriques** pour repérer des distances, mais aussi des positions relatives, le long d'un axe. Ces distances algébriques seront notées avec une barre, par exemple \overline{AB} . On munit pour cela l'axe d'un sens positif (on dit qu'on **oriente** l'axe), et la distance algébrique \overline{AB} est affectée d'un signe moins si le déplacement de A vers B se fait dans le sens contraire du sens positif choisi. Le choix de l'orientation est purement conventionnel, il n'a aucune influence sur les conclusions physiques, tant qu'on s'y tient et qu'on n'en change pas en cours de calcul ! Dans ce cours, nous orienterons les axes de la gauche vers le droite. Les distances \overline{AB} seront donc positives si B est à droite de A, et négatives dans le cas contraire. On a alors une propriété remarquable, pour tous les points A, B et C de l'axe, $\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC}$, alors que $AC \neq AB + BC$ si le point B est à l'extérieur du segment [AC].

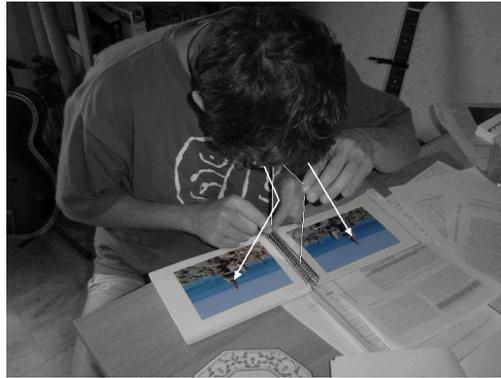


FIG. 1.4: Principe : placer le miroir verticalement entre les deux images suivantes, côté argenté vers la droite. Mettre sa tête au-dessus et regarder l'image de gauche en ouvrant les deux yeux. L'œil gauche voit directement la photo de gauche, alors que l'œil droit voit le reflet de la photo de droite.



FIG. 1.5: Images visibles en relief.

L'indice des gaz est généralement proche de 1. C'est le cas de l'air, par exemple. L'approche électromagnétique de l'optique permet de déterminer l'indice en fonction des propriétés microscopiques du milieu.

Quand $n' < n$ (par exemple au passage de l'eau vers l'air), le rayon réfracté s'écarte de la normale. Quand $n' > n$ (par exemple un rayon passant de l'air à l'eau), le rayon réfracté se rapproche de la normale. On peut remarquer que quand $n = n'$, le rayon lumineux n'est pas dévié. dans tous les cas, les rayons normaux (dirigés selon la normale) ne sont pas déviés.

4.2 Loi du retour inverse

D'après les deux lois précédentes, les rayons lumineux sont les mêmes si on inverse le sens de propagation de la lumière. C'est la **loi du retour inverse**. Cette loi est parfois utile, mais ne doit pas être prise au pied de la lettre, il existe des situations physiques dans lesquelles elle est mise en défaut (les lois précédentes donnent les caractéristiques géométriques des rayons lumineux à condition qu'ils soient réfléchis ou réfractés, mais ne donnent pas de condition sur l'existence de ces rayons).

4.3 Remarque

En général, un rayon lumineux est partiellement réfléchi et partiellement réfracté ; il donne naissance à deux rayons quand il atteint un dioptré. Nous discuterons une exception importante (la réflexion totale) un peu plus

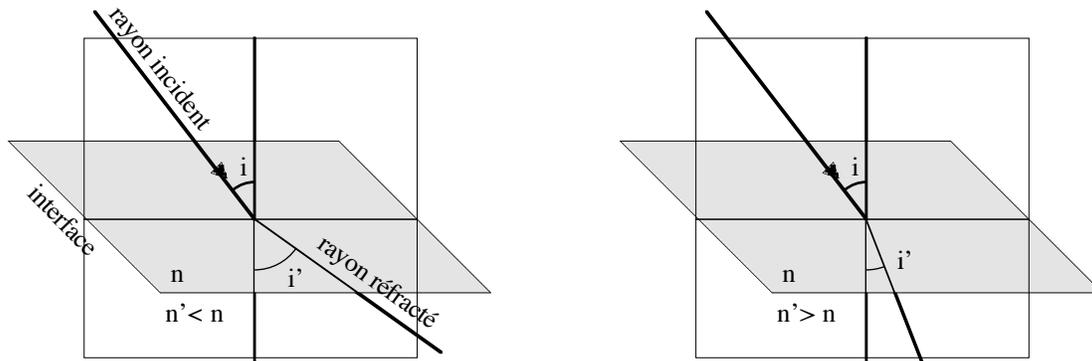


FIG. 1.6: Le rayon réfracté dans le cas où $n' < n$ (à gauche) et $n' > n$ (à droite).

loin.

4.4 Le dioptre plan

Nous allons suivre le même cheminement que dans le paragraphe précédent concernant le miroir plan, et commencer nous placer dans le cas d'un dioptre plan. Nous allons déterminer ce qu'il advient des rayons émis par une source lumineuse A ponctuelle située dans le premier milieu d'indice n , et déterminer les propriétés de tous les rayons réfractés dans le second milieu d'indice n' .

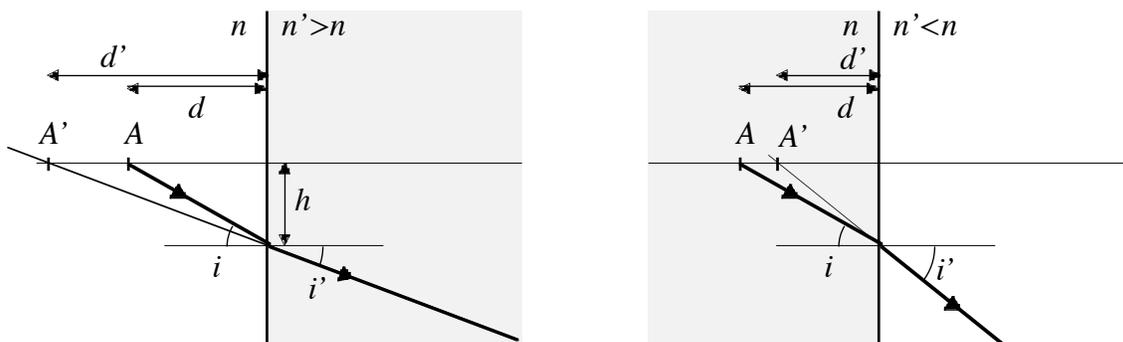


FIG. 1.7: Les rayons émis depuis A avec l'angle i semblent provenir de A' .

On a les deux relations

$$n \sin i = n' \sin i' \quad \text{et} \quad d \tan i = d' \tan i' = h \quad (1.3)$$

4.5 Calcul de d'

On a donc

$$d' = d \times \frac{\sin i \cos i'}{\cos i \sin i'} = d \times \frac{\sin i \sqrt{1 - \sin^2 i'}}{\cos i \sin i'} \quad (1.4)$$

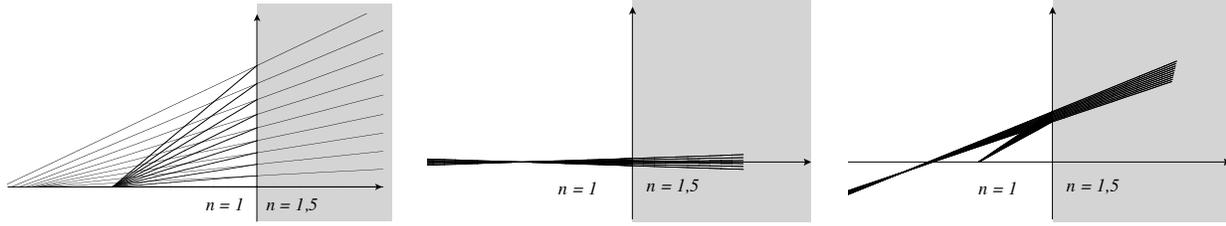


FIG. 1.8: marche des rayons réfractés et leurs prolongements. Les deux figures de droite représentent la marche de rayons appartenant à un fin pinceau lumineux, perpendiculaire au dioptre (au milieu) et avec une incidence importante (à droite). Ces pinceaux lumineux semblent provenir d'un point dans les deux cas (stigmatisme), mais ce point n'est pas le même dans les deux cas.

En utilisant la loi de Snell-Descartes, on obtient

$$d' = \frac{n'd}{n} \times \frac{\sin i}{\cos i} \frac{\sqrt{1 - (n/n')^2 \sin^2 i}}{\sin i} = \frac{n'd}{n} \times \sqrt{\frac{1 - (n/n')^2 \sin^2 i}{1 - \sin^2 i}} \quad (1.5)$$

Tous les rayons émis dans un cône de sommet A et d'ouverture i semblent provenir du point A' situé à la distance d' du dioptre. Toutefois, la situation est différente de celle du miroir. Ici, la position de A' , le point d'où semblent provenir les rayons issus de A , dépend des rayons lumineux que l'on considère (de l'angle i). Il semble qu'on ne puisse pas vraiment parler d'image virtuelle, et que l'œil ne verrait pas une image bien définie de A mais une tache. Or, l'expérience montre que ce n'est pas le cas, on voit les poissons rouges assez nets en général.

4.6 Stigmatisme approché

Ceci est dû au fait que l'œil ne perçoit pas *tous* les rayons issus du poisson rouge (que nous appellerons Alfred pour garder la notation A), mais seulement une toute petite partie d'entre eux, ceux qui sont émis dans la direction de l'œil et qui peuvent passer par l'iris. Dans ce cas, on peut transformer l'expression précédente. Afin d'éviter des calculs inutilement laborieux, plaçons-nous dans la situation où l'œil est situé sur la normale au dioptre passant par A . L'œil a une ouverture de quelques millimètres de diamètre. S'il est situé à quelques dizaines de centimètres du dioptre, les rayons qui lui parviennent seront inclinés au plus de 0,01 radian, soit moins d'un degré.

On peut alors faire l'approximation des petits angles et remplacer $\sin i$ par i et $\sin i'$ par i' dans l'expression précédente. On tronque ce développement en négligeant les termes d'ordre 3 ou supérieurs. Il s'agit donc d'utiliser un développement limité valable à l'ordre 2 (compris). L'expression 1.5 peut alors se réécrire, à l'ordre 2 en i ,

$$d' \approx \frac{n'd}{n} \times \sqrt{\frac{1 - (n/n')^2 i^2}{1 - i^2}} = \frac{n'd}{n} \times \left(1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 i^2\right)^{1/2} (1 - i^2)^{-1/2} \quad (1.6)$$

ce qui après développements, en utilisant la propriété

$$(1 + \epsilon)^p \approx 1 + p\epsilon + \frac{p(p-1)}{2} \epsilon^2 + \frac{p(p-1)(p-2)}{3} \epsilon^3 + \dots \quad (1.7)$$

donne

$$d' \approx \frac{n'd}{n} \times \left\{1 + i^2 \left(\frac{(n')^2 - n^2}{2(n')^2}\right)\right\} \quad (1.8)$$

[Aparté sur les DL nécessaires pour en arriver là]

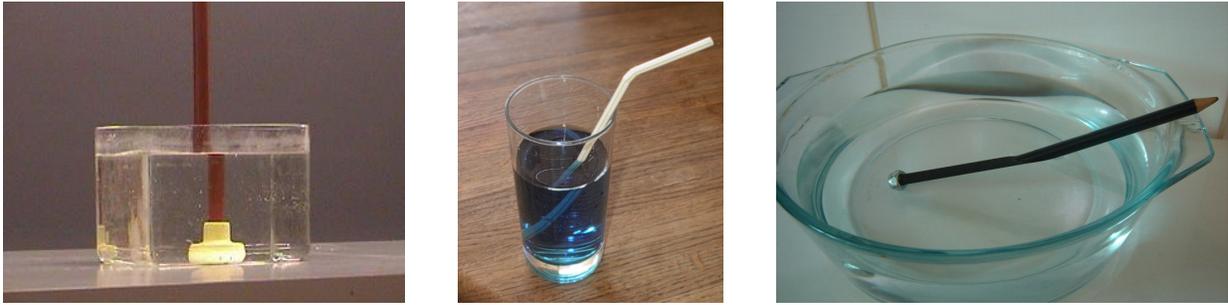


FIG. 1.9: Expérience du bâton brisé, depuis plusieurs points de vue.

Pour les petits angles, le terme en i^2 est petit, et les rayons semblent provenir d'un seul point A' , situé à

$$d' \approx \frac{n'd}{n} \quad (1.9)$$

Cette propriété est appelée **stigmatisme approché**, et on dit encore que les points A et A' sont conjugués par le système optique (ici le dioptre). Le point A' est encore appelé l'image de A par le dioptre plan. La relation 1.9 est appelée **relation de conjugaison** du dioptre plan. On préfère l'écrire sous une forme plus générale

$$\overline{SA'} \approx \frac{n'}{n} \times \overline{SA} \quad (1.10)$$

où les barres indiquent des distances orientées. [Aparté sur les distances orientées].

On aurait aussi pu partir d'une forme approchée de la loi de Snell-Descartes, valable pour les petits angles, et appelée **loi de Kepler**.

$$ni \approx n'i' \quad [\text{loi de Kepler}]$$

Nous reviendrons dans la suite sur ce type d'approximations. Un grand nombre de systèmes optiques sont approximativement stigmatiques, quand on se limite à certains rayons, en particulier ceux proches d'un certain axe (l'axe optique).

4.7 Application – Alfred le poisson rouge et le bâton brisé

Quand $n > n'$, comme c'est le cas quand on regarde un poisson à travers la vitre d'un aquarium, on a $d' < d$, et le poisson semble plus proche. C'est aussi la raison pour laquelle les rivières ou les piscines semblent moins profondes qu'elles ne le sont réellement.

Quand au contraire $n < n'$, c'est-à-dire si on se met à la place du poisson rouge qui regarde l'extérieur, on a $d' > d$, le monde extérieur semble plus grand qu'il ne l'est, les distances y semblent allongées.

Les animaux qui ont besoin de voir à travers un dioptre (les poissons pêcheurs, les grenouilles) tiennent compte de ce phénomène, sans connaître les lois de l'optique.

On peut aussi citer l'expérience du bâton brisé. La partie immergée d'un bâton apparaît plus proche, ce qui donne une illusion de cassure. Attention à l'analyse de cette expérience, le bâton n'est pas un rayon lumineux !

4.8 Réflexion totale

Revenons sur l'ensemble des rayons émis depuis A , dans le cas où $n > n'$. On voit qu'il existe un angle d'incidence limite i_l pour lequel l'angle réfracté vaut $\pi/2$ (voir la **figure 1.10**). Cet angle est donné par

$$\sin i_l = \frac{n}{n'} \quad (1.11)$$

Pour les angles d'incidence plus grand, la loi de Snell-Descartes $\sin i' = (n/n') \sin i$ ne peut pas être vérifiée, car $i > i_l$ et donc $(n/n') \sin i > 1$, ce qui ne peut en aucun cas être le sinus d'un nombre. Qu'advient-il de ces rayons ?

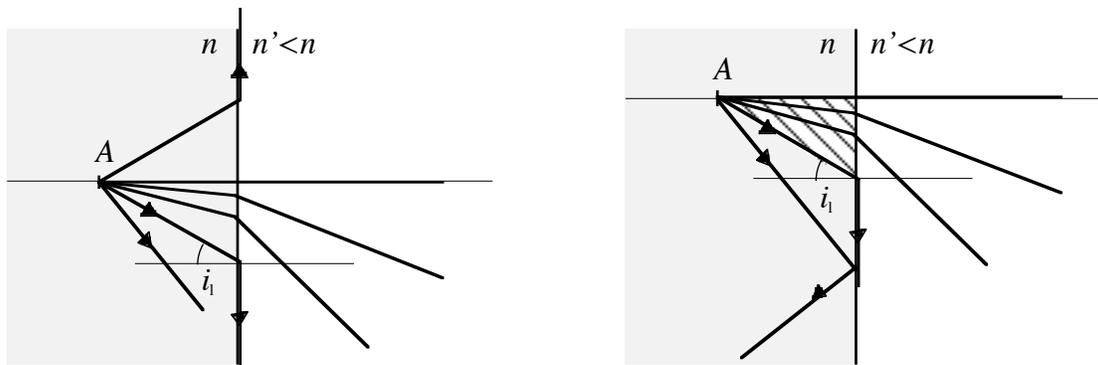


FIG. 1.10: [gauche] Qu'advient-il des rayons ayant une incidence plus élevée que la valeur limite i_l ? [droite] Ils sont seulement réfléchis. Les rayons issus de A et situés dans la zone hachurés (un cône de sommet A et d'ouverture angulaire i_l) sont en partie réfléchis, et en partie réfractés dans le second milieu, ceux situés hors de cette zone sont seulement réfléchis.

Comme l'a découvert Kepler, ces rayons ne sont pas réfractés, ils seulement réfléchis. Ce phénomène est appelé **réflexion totale**. Il n'a lieu que lorsque la lumière est incidente sur un milieu moins réfringent (d'indice plus faible).

Ce phénomène peut être utilisé pour estimer l'indice des milieux. En effet, la valeur de l'angle limite dépend des milieux qui forment le dioptré, et sa détermination permet de remonter à celle de l'indice d'un des milieux si on connaît l'autre. \triangleright TD 1, exercice 5, le réfractomètre.

Il est aussi utilisé pour remplacer les miroirs. On remarque que les bords de l'aquarium apparaissent comme des surfaces argentées quand on les regarde trop de biais. L'utilisation de la réflexion totale présente l'avantage de s'affranchir de l'absorption qui a lieu lors des réflexions sur les surfaces argentées. On les trouve notamment dans des prismes pour raccourcir les jumelles.

[Mentionner la réflexion totale frustrée]

5 Principe de Fermat

6 Exemples d'application

6.1 Le prisme

Rappel : les résultats des exercices traités en séances de TD sont considérés connus, au même titre que le cours...

Le prisme permet de bien mettre en évidence le phénomène de dispersion. L'indice optique qui intervient dans la loi de la réfraction dépend de la longueur d'onde, et un faisceau de lumière blanche est décomposé, après passage par le prisme, en plusieurs faisceaux de couleurs différentes, qui émergent avec des angles différents. Ceci est utilisé en spectroscopie.

\triangleright TD 1, exercice 6, le prisme.

6.2 La sphère réfractante

Il existe deux points pour lesquels la sphère est rigoureusement stigmatique (les points de Weierstrass, \triangleright TD 1). Ceci est mis à profit dans certains types de systèmes optiques (il est un peu tôt dans le cours pour en dire davantage, nous y reviendrons plus loin).

L'étude de la sphère réfractante permet aussi de comprendre le phénomène d'arc-en-ciel.

6.3 Les mirages

Mirages usuels, mirages gravitationnels.



FIG. 1.11: Exemples de mirages, un mirage supérieur à gauche, un mirage inférieur à droite.

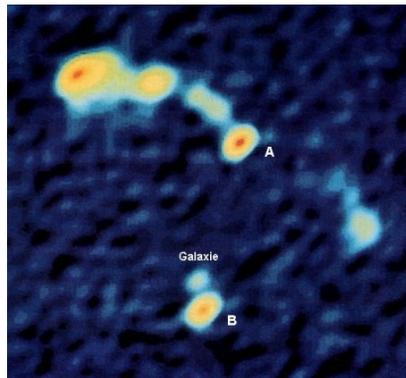


FIG. 1.12: À gauche, le premier mirage gravitationnel découvert en 1979. Il s'agit du quasar Q0957+561, vu aux positions A et B. À droite les mirages dans l'amas de galaxies 0024+1654.