

Optique géométrique

1 Approximation de l'optique géométrique

1.1 Propagation rectiligne de la lumière

Dans un milieu *homogène* (c'est à dire que l'indice de réfraction est uniforme, c'est le cas pour la plupart des milieux dans lesquels la lumière se propage), la lumière se déplace en ligne droite. C'est un fait que l'on peut facilement constater, par exemple avec un laser et un peu de poussière (la poussière est nécessaire pour «voir» le faisceau lumineux !)

L'optique géométrique est basée sur cette propagation rectiligne, et consiste ainsi à décrire les phénomènes lumineux en imaginant le trajet suivi par la lumière à partir d'une source. C'est une théorie satisfaisante pour décrire de nombreuses situations, notamment celles qui mettent en jeu les instruments d'optique. Elle devient insuffisante lorsque les aspects ondulatoire de la lumière (interférences, diffraction) ne peuvent pas être négligés.

1.2 Rayon lumineux

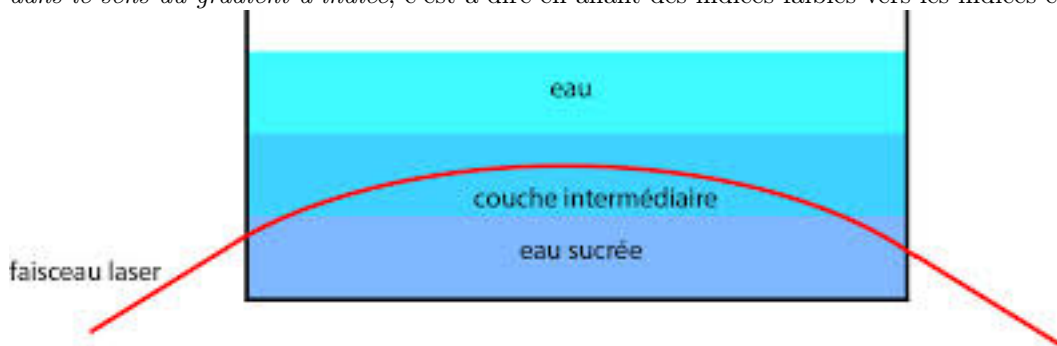
L'outil de base de l'optique géométrique est le concept de *rayon lumineux* (RL en abrégé).. Il s'agit simplement du trajet suivi par la lumière, et il est très commode de représenter sur un schéma quelques rayons lumineux pour aborder une situation. On peut par exemple facilement prévoir la taille de l'ombre portée par un objet en fonction de la position de la source lumineuse.

Les rayons lumineux possèdent deux propriétés importantes :

- L'indépendance des rayons lumineux, c'est à dire que les RL peuvent se traverser sans être modifiés.
- La propriété de retour inverse de la lumière, qui indique que le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens dans lequel elle se déplace.

1.3 Propagation dans un milieu non homogène, mirages

Dans un milieu non homogène l'indice de réfraction n'est pas le même partout (parce que la concentration d'une solution varie, ou parce que la température varie) et la conséquence est que la propagation de la lumière n'y est pas rectiligne. On peut observer la courbure des rayons lumineux avec un LASER et de l'eau sucrée, la concentration en sucre étant plus importante au fond qu'en surface. Le résultat qu'il faut retenir est que la lumière est déviée *dans le sens du gradient d'indice*, c'est à dire en allant des indices faibles vers les indices élevés.



Les phénomènes de mirage sont dus à une déviation de la lumière du fait d'un milieu non homogène, et au fait que notre cerveau est tellement habitué à ce que la lumière se propage en ligne droite qu'il interprète systématiquement les choses en considérant que c'est le cas. Un exemple classique est les «flaques d'eau » que l'on a l'impression de voir sur une route surchauffée.

2 Lois de Descartes

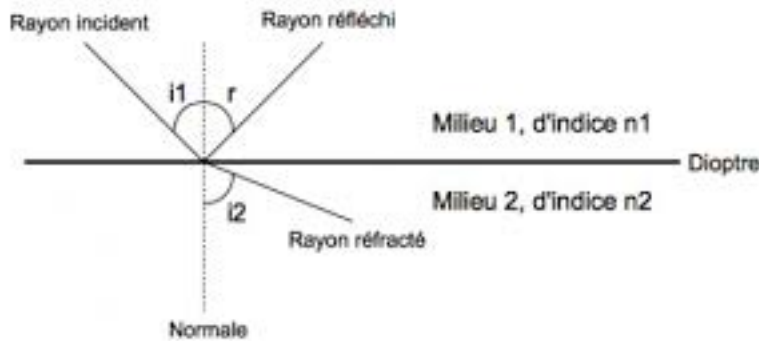
2.1 Vocabulaire

Les lois de Descartes s'appliquent aux phénomènes de réflexion et de réfraction, qui interviennent au niveau de la surface de séparation entre deux milieux avec des indices différents. Les deux milieux doivent être transparents (il est évident que les milieux de propagation ne doivent pas (trop) absorber la lumière, et avec une surface métallique il y a réflexion, mais pas de réfraction).

Pour qu'il y ait réflexion et réfraction selon les lois de Descartes, la surface doit être parfaitement plane. Si la surface est irrégulière, de la lumière est renvoyée dans toutes les directions, on parle de *diffusion*. Il faut noter qu'un objet diffusant comme une feuille de papier est plus "visible" qu'un objet réfléchissant comme un miroir

2.2 Lois

La surface qui sépare les deux milieux est aussi appelé un dioptre, les angles qui caractérisent les directions des rayons incident, réfléchi et réfracté sont des angles entre le rayon et la *normale à la surface*. Le *plan d'incidence* est défini par le rayon incident et la normale à la surface.



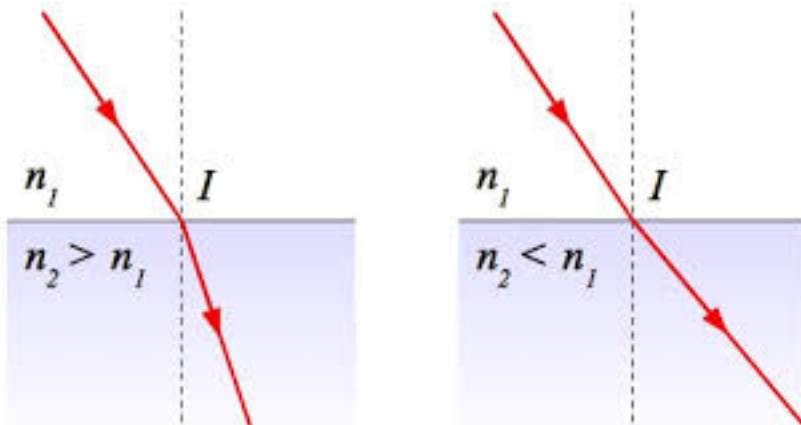
Lois de la réflexion :

1. Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence.
2. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Lois de la réfraction :

1. Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence.
2. L'angle de réfraction vérifie la «loi des sinus» $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$.

Il est important de remarquer que si la lumière passe d'un milieu moins réfringent (petit indice) à un milieu plus réfringent (grand indice) alors l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence, et inversement.



Petite application : calculer l'angle de réfraction pour un dioptre air / eau avec un $i_1 = 25^\circ$ (réponse : 18,5 degrés)

Ce sont des lois empiriques, elles peuvent être déduites des lois de l'électromagnétisme, grâce auxquelles on obtient en plus les proportions d'énergie réfléchi et réfracté.

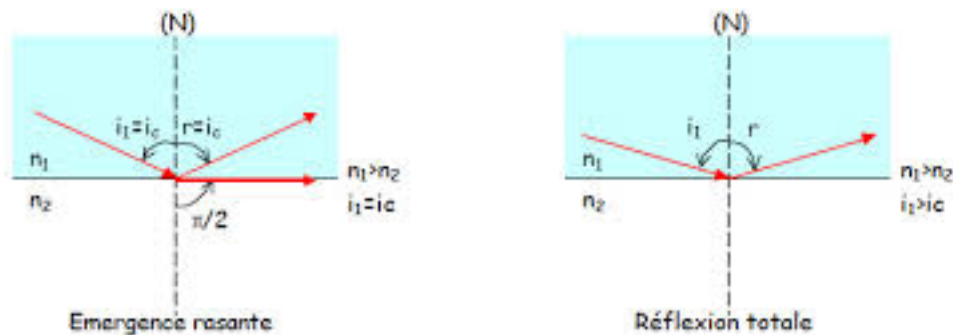
2.3 Réflexion totale

On a vu que lorsque la lumière passe du milieu le plus réfringent au milieu le moins réfringent, l'angle entre le RL et la normale augmente. Ainsi, il existe une certaine valeur de l'angle d'incidence i_{lim} pour laquelle l'angle de réfraction atteint la valeur limite de 90 degrés. Que se passe-t-il si l'angle d'incidence est supérieur à i_{lim} ? Il n'y a tout simplement plus de réfraction, toute la lumière incidente est réfléchi, ce qui est appelé *réflexion totale*.

Pour calculer i_{lim} on se place dans le cas limite d'un angle de réfraction égal à 90 degrés, ce qui conduit à la relation :

$$i_{lim} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

L'application numérique pour une interface eau / air donne un angle limite de 48,6 degrés.



3 Applications

3.1 Fibre optique

C'est une application du phénomène de réflexion totale très importante en pratique, il existe des fibres optiques qui traversent l'atlantique et on les utilise de plus en plus pour internet, ce qui permet d'améliorer notablement les débits d'informations.

Le modèle le plus simple utilise seulement deux matériaux transparents d'indices légèrement différents : le coeur (au centre, le plus grand indice) et la gaine (en périphérie, le plus petit indice).

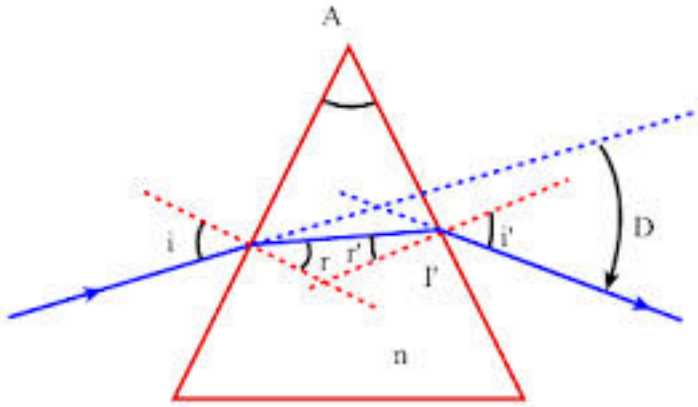
La lumière est guidée dans la fibre par réflexions totales successives, quasiment sans pertes (il n'y a effectivement *pas* de pertes lors des réflexions totales, mais le matériau qui constitue le coeur ne peut être rigoureusement transparent). Il faut remarquer qu'il ne faut pas un angle d'entrée trop important si on veut que les RT aient effectivement lieu ensuite dans la fibre.



3.2 Prisme

En optique, on désigne sous le nom de prisme un prisme droit à base triangulaire. Deux faces sont soigneusement polies pour laisser passer la lumière, elles forment entre elles un *angle au sommet A*. La troisième face, généralement dépolie pour éviter toute confusion, est appelée la base. L'effet d'un prisme sur un rayon lumineux incident est de

le dévier *vers sa base*. L'angle entre le rayon incident et le rayon émergent (après deux réfractions) est la déviation, notée D .



Un exercice classique est d'établir les *formules du prisme* :

- $\sin(i) = n \sin(r)$
- $\sin(i') = n \sin(r')$
- $A = r + r'$
- $D = i + i' - A$

Deux choses intéressantes peuvent être établies à partir de ces formules : Il faut un angle suffisant en entrée pour que le rayon ressorte du prisme (sinon il y a réflexion totale sur la deuxième face), cette condition s'écrit $i > \arcsin(n \sin(A - \arcsin(\frac{1}{n})))$; et la déviation passe par un minimum pour un angle d'incidence particulier (minimum de déviation).

3.3 Dispersion

L'indice d'un matériau transparent n'est jamais une valeur tout à fait définie, mais varie en fait avec la longueur d'onde, ce que l'on appelle *dispersion*. Ce phénomène existe pour tous les matériaux, mais il est plus ou moins important, c'est à dire que les matériaux peuvent être plus ou moins dispersifs.

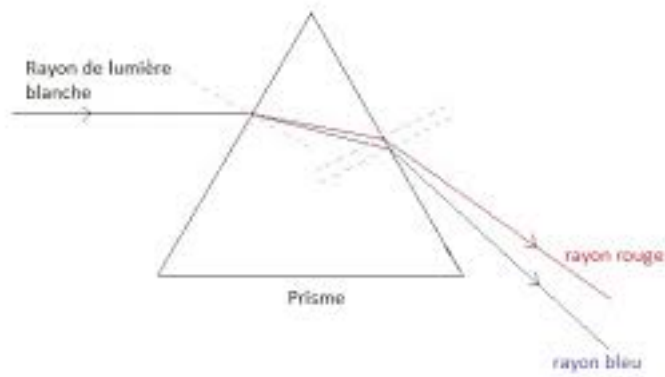
Il existe une loi empirique (loi de Cauchy) qui assez bien vérifiée par la plus grande partie des matériaux :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

Cela signifie (B étant toujours positif) que l'indice d'un matériau est plus élevé pour le bleu que pour le rouge. En conséquence le bleu est plus sensible à la réfraction et la déviation des RL dus à la réfraction est généralement plus importante pour le bleu (c'est par exemple le cas avec un prisme)

Historiquement, les prismes ont été utilisés pour décomposer la lumière blanche, ils sont maintenant remplacés par des réseaux.

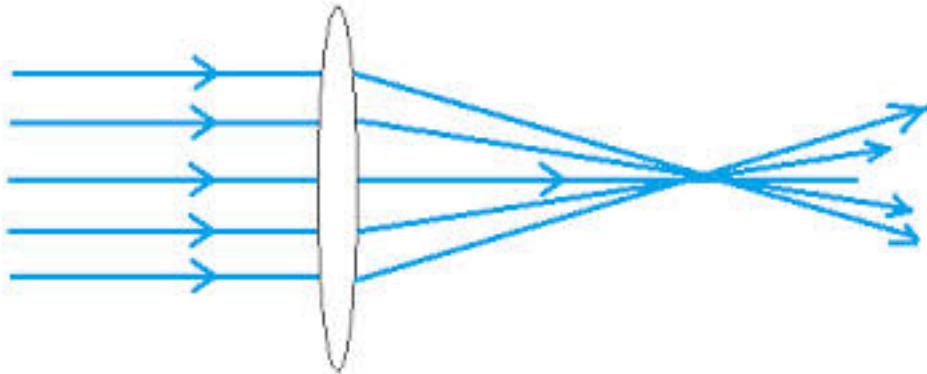
La dispersion de la lumière blanche intervient aussi dans la formation des arc en ciel (cf DM)



4 Lentilles convergentes

4.1 Observations expérimentales

Du point de vue de sa constitution, une lentille convergente est caractérisée par le fait que le centre est plus épais que les bords. L'effet sur la lumière incidente est une tendance à faire converger les rayons lumineux, en particulier des rayons lumineux incidents parallèles à l'axe optique vont tous converger en un point appelé foyer image, situé à une distance de la lentille qui correspond à sa *distance focale*.



La lentille convergente est l'instrument d'optique le plus répandu et le plus important, car elle est indispensable pour former une image.

4.2 Lien avec la réfraction

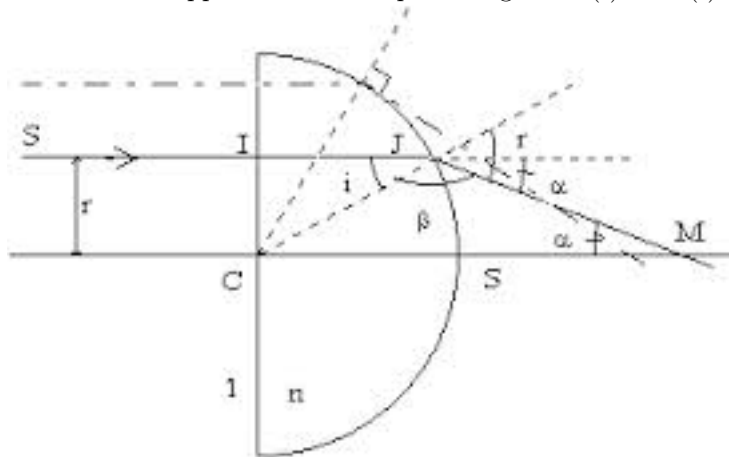
L'effet d'une lentille convergente sur les RL incidents n'a rien de mystérieux, cela suit simplement les lois de la réfraction, ce qui se voit facilement de manière qualitative.

Pour être plus précis, on peut faire une simulation du «fonctionnement» d'une lentille : on considère une lentille demi boule de diamètre 5cm et de rayon de courbure 10cm, l'indice du verre étant pris égal à 1,5. Tracer des rayons lumineux incidents parallèles à l'axe optique situés à 1, 2, 3 et 4 cm de l'axe optique et noter leur point de concours avec l'axe optique. En déduire la distance focale d'une telle lentille.

On pourra noter que les rayons les plus éloignés de l'axe convergent «trop près» de la lentille. On doit trouver une distance focale de l'ordre de 20 cm.

4.3 Un petit calcul

On peut réexaminer la question précédente sous un angle plus théorique et calculer la distance focale en considérant un RL incident puis en calculant à l'aide de la loi de la réfraction la manière dont il est dévié. Le point clef est d'utiliser l'approximation des petits angles $\tan(i) \simeq \sin(i) \simeq i$.



La loi de la réfraction en J s'écrit ici $n \sin(i) = \sin(r)$, ce qui donne $ni = r$ dans l'approximation des petits angles. Par ailleurs, si i est petit, le projeté orthogonal de J sur l'axe est quasiment confondu avec S, et JMS est proche d'un triangle rectangle en S, on a donc $\tan(\alpha) = \frac{JS}{SM}$, et comme $JS = r$ et $SM = f'$ (la distance focale que l'on cherche) on obtient compte tenu de l'approximation des petits angles $\alpha = \frac{r}{f'}$. Mais $\alpha = r - i$ et donc $\frac{r}{f'} = r - i = i(n - 1)$. Enfin dans le triangle CIJ rectangle en I on a $\sin(i) = \frac{r}{R}$ où R est le rayon de courbure, soit $i = \frac{r}{R}$ (petits angles, encore...) et en combinant avec ce qui précède on obtient $\frac{r}{R} = \frac{r}{f'(n-1)}$, ce qui donne finalement :

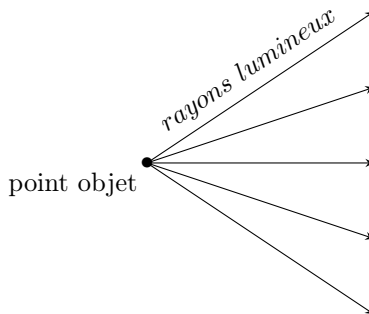
$$f' = \frac{R}{n-1}$$

Cela montre quels sont les paramètres importants : l'indice de réfraction et le rayon de courbure des surfaces. Pour $R = 10\text{cm}$ et $n = 1,5$ on trouve $f' = 20\text{cm}$, la comparaison avec l'étude graphique précédente devrait être concluante.

5 Formation des images

5.1 Modélisation d'un objet

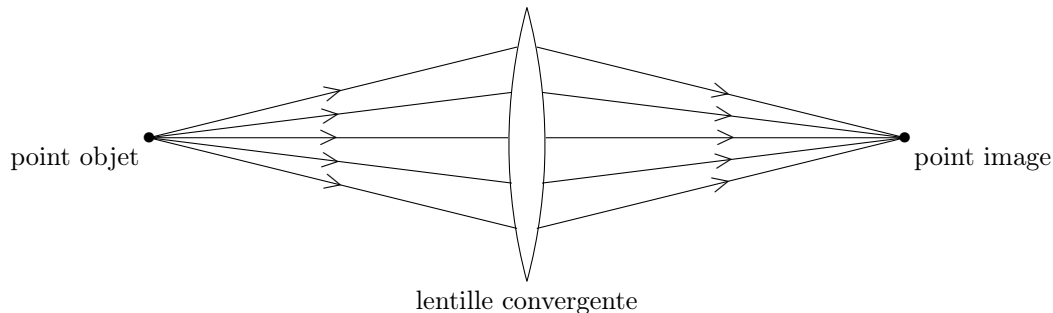
En optique, on appelle objet quelque chose qui émet de la lumière (ou renvoie celle qu'il reçoit). On le modélise en le décomposant en un ensemble de points-objet (concrètement, un petit détail de l'objet peut être considéré comme un point objet). Un point objet émet des RL dans toutes les directions (généralement seul un 1/2 espace, voire moins, nous intéresse)



La plupart du temps, pour répondre aux questions qui nous intéressent (où sera l'image finale? quelle est sa taille?), il suffit de considérer deux points particuliers de l'objet. On peut par exemple prendre un point à chaque extrémité de l'objet, et la distance entre les deux points correspond à la taille de l'objet. On arrive ainsi à une représentation schématique avec deux points et une flèche (qui permet d'indiquer le sens).

5.2 Rôle des lentilles convergentes

Pour former une image, il faut que tous les RL issus d'un point objet convergent vers un même point image. Or le seul instrument capable de faire converger les RL est la lentille convergente, la formation d'une image met donc nécessairement en jeu une lentille convergente.

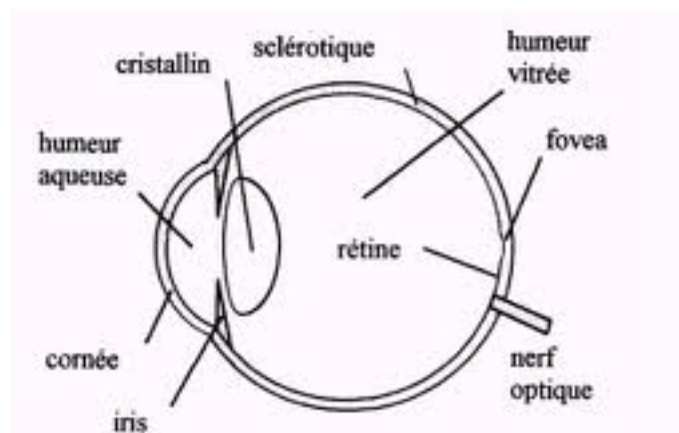


L'image peut être formée sur un écran (qui diffuse ensuite la lumière reçue) ou bien acquise par des capteurs (CCD pour les appareils photo/caméras, cônes et bâtonnets pour l'oeil).

Le tracé des RL issus d'un point objet permet de situer le point image correspondant : pour obtenir un point image, il suffit de chercher où se coupent finalement les différents RL issus du point objet.

5.3 L'oeil

Un exemple important de formation d'une image est ce qui se passe dans l'oeil, qui suit la logique présentée ci-dessus *objet* $\rightarrow$ *lentille convergente* $\rightarrow$ *image*. La lentille convergente de l'oeil est le cristallin et l'écran est la rétine, qui est tapissée de cellules photosensibles, appelées cônes et bâtonnets. Leur dimension est de l'ordre du μm , les cônes permettent la vision en couleurs, mais sont peu sensibles tandis que les bâtonnets sont plus sensibles mais ne permettent qu'une vision en noir et blanc.



6 Images virtuelles

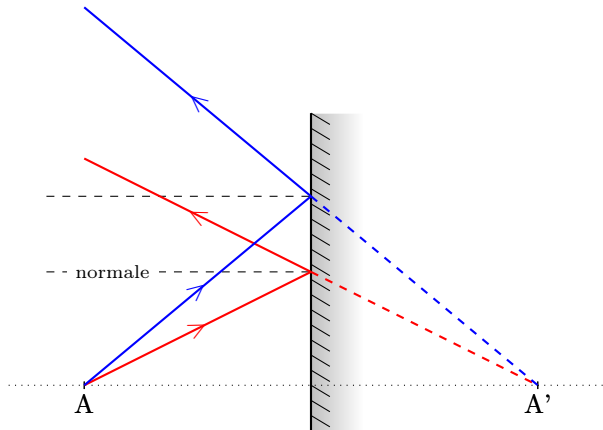
6.1 Image par un miroir plan

Le miroir plan est un instrument optique particulièrement simple, la réflexion des RL obéit aux lois de la réflexion. On a l'habitude de regarder son image dans un miroir, donc on peut penser qu'un miroir plan forme une image à partir d'un objet.

Traçons deux RL issus d'un point objet placé devant le miroir, on constate qu'ils ne se coupent pas. Il n'y a donc pas d'image ? En fait ce qui est important, et là où on situe l'image, c'est l'endroit d'où semblent provenir les

RL réfléchis, donc où leurs *prolongements* se coupent.

On remarque ainsi que *l'image d'un point objet par un miroir plan est son symétrique* (par rapport au plan du miroir).

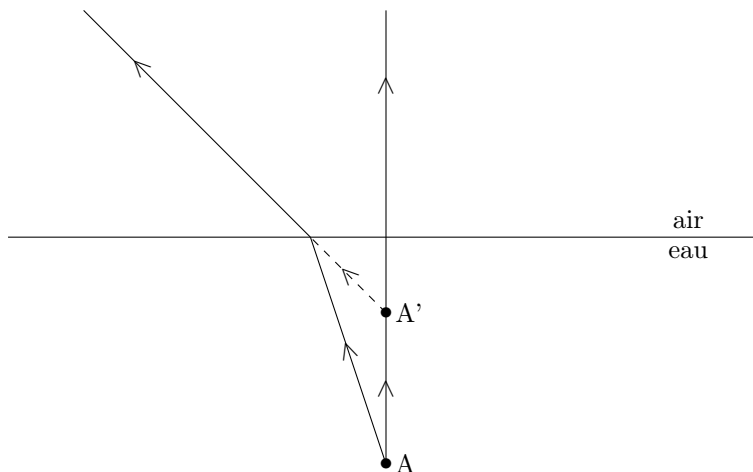


6.2 Interprétation

Il n'y a pas d'image à proprement parler (pas de lumière derrière le miroir!), on parle ici d'*image virtuelle*. Une image virtuelle ne peut pas être formée sur un écran (pas de lumière à cet endroit), mais l'œil (ou tout dispositif capable de faire la même chose, app photo p ex) peut la voir, car il a lui la capacité de faire converger les RL réfléchis, et de son point de vue c'est exactement comme si les RL venaient réellement de derrière le miroir. Un point *image virtuelle* est un point où se coupent les *prolongements* des RL issus d'un instrument d'optique.

6.3 Image par un dioptre

On peut appliquer la même analyse lorsque l'on regarde un objet au travers d'un dioptre, par exemple on regarde quelque chose au fond de la piscine. Les RL sont déviés lors de la traversée du dioptre air/eau, et on peut considérer que le dioptre forme une image virtuelle de l'objet.



Ainsi l'objet ne semble pas être là où il est réellement (le point A) et on le situe au niveau de l'image virtuelle (le point A'). La piscine semble moins profonde qu'elle ne l'est réellement !

7 Stigmatisme

7.1 Notion de stigmatisme

Il y a stigmatisme si les RL issus d'un point objet, après avoir été déviés par un système optique, convergent tous vers un même point image. Ainsi, à chaque point objet correspond exactement un point image, concrètement, cela signifie que l'image est nette!

Malheureusement les instruments d'optique ne sont pas rigoureusement stigmatiques (les lentilles en particulier), seul le miroir plan l'est, et ce n'est pas le plus utile... Il faut se résoudre au fait que à un point objet correspond non pas un point image mais une «tache image», enveloppe de tous les points de concours des RL.

L'image n'est pas pour autant nécessairement floue, elle le sera d'autant moins que la tache image est suffisamment petite. On parle alors de stigmatisme approché.

7.2 Rôle de la taille des détecteurs élémentaires

Que signifie suffisamment petite pour la tache image? Il faut comparer avec la taille des détecteurs élémentaires (de l'ordre de $1-10\ \mu\text{m}$), l'important étant qu'une tache image ne recouvre pas plusieurs capteurs. La taille d'une tache image ne doit donc pas être significativement supérieure à celle des capteurs, c'est à dire à $1-10\ \mu\text{m}$.

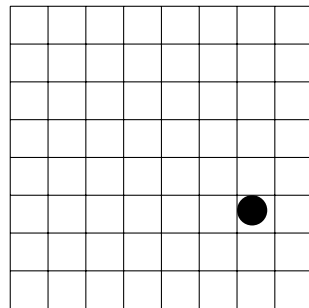


image nette

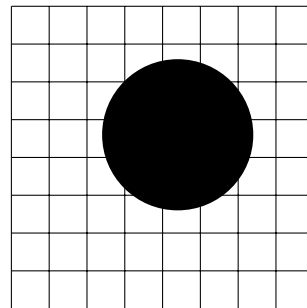


image floue

7.3 Conditions de Gauss

Pour que le stigmatisme approché soit le meilleur possible (c'est à dire avoir la plus petite tache image possible), il faut que les angles mis en jeu lors des réflexions / réfractions soient les plus petits possibles. Cela est d'autant plus le cas que les RL sont :

- proches de l'axe
- peu inclinés sur l'axe

On appelle cela les conditions de Gauss. Concrètement, pour se rapprocher des conditions de Gauss on utilise des diaphragmes qui permettent d'éliminer les RL indésirables (mais font perdre de l'énergie lumineuse...).

