

Chapitre 1

Optique géométrique

1.1 Propagation de la lumière

1.1.1 L'œil et les objets lumineux

Pour qu'un objet soit visible, il faut qu'il émette de la lumière et qu'une partie de cette lumière émise atteigne l'œil ou un autre récepteur de lumière.

Certains objets, appelés *sources lumineuses*, produisent la lumière qu'ils émettent.

- Un corps chauffé à une température suffisante émet de la lumière par *incandescence* : étoile, filament d'une ampoule, ...
- Un corps peut aussi émettre de la lumière à température ambiante par *luminescence* : tube fluorescent, diode luminescente, laser, ...
- Un gaz traversé par une décharge électrique peut émettre de la lumière : lampe au néon, lampe à vapeur de sodium, ...

Tous les autres objets visibles sont *éclairés*. Ils renvoient la lumière qu'ils reçoivent dans toutes les directions, nous disons que l'objet *diffuse* de la lumière. C'est le cas de la Lune et des planètes, ainsi que de la plupart des objets quotidiens. Un tel objet est invisible dans l'obscurité totale.

La lumière est-elle visible ? Considérons l'expérience suivante.

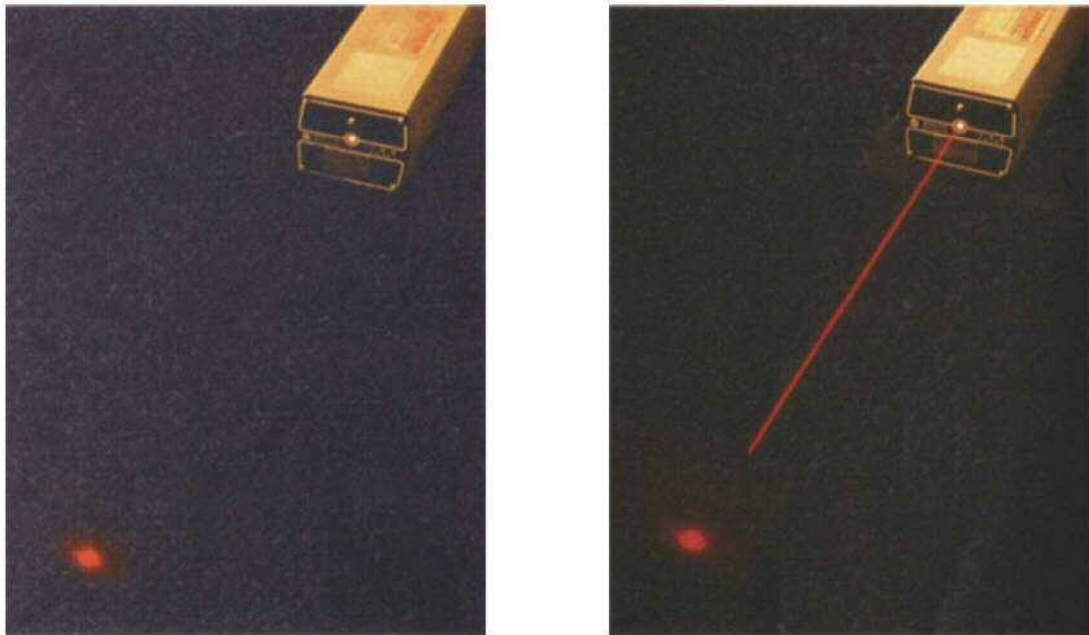
Expérience 1.1 Un écran est éclairé par un faisceau laser. Nous essayons de voir le faisceau.

Observations :

Une petite tache lumineuse est visible sur l'écran, le faisceau laser est invisible (figure 1.1a). Après émission de vapeur, un faisceau fin apparaît : il matérialise le trajet de la lumière (figure 1.1b).

Interprétation :

Lorsque le faisceau traverse l'air parfaitement pur, il est totalement invisible. L'écran diffusant renvoie une partie du faisceau dans toutes les directions, une tache lumineuse est



(a) dans l'air

(b) à travers la vapeur

FIGURE 1.1 – Observation d'un faisceau laser

visible.

Lorsque le faisceau rencontre la vapeur, les gouttelettes de la vapeur, qui sont des particules diffusantes, renvoient la lumière dans toutes les directions. L'œil en reçoit une partie : nous ne voyons pas le faisceau, mais les gouttelettes éclairées sur son trajet.

Conclusion :

Dans un milieu transparent, la lumière n'est pas visible. Elle permet, lorsqu'elle atteint l'œil, de voir les objets dont elle est issue.

1.1.2 Propagation rectiligne de la lumière

Les milieux dans lesquels la lumière peut se propager sont appelés milieux *transparents*. À l'inverse, un milieu *opaque* ne permet pas la propagation de la lumière.

Un milieu est *homogène* si ses propriétés sont identiques en chacun de ses points (air pur à température uniforme, eau pure, solution de concentration uniforme, ...).

La visualisation du faisceau laser dans l'expérience 1.1 nous permet de formuler la loi sur la *propagation rectiligne* de la lumière.

Propagation rectiligne *La lumière se propage en ligne droite dans le vide et dans tout milieu transparent et homogène.*

On modélise le chemin suivi par la lumière par des lignes, orientées dans le sens de la propagation, appelées *rayons lumineux*. Un *faisceau lumineux* est un ensemble de rayons

issus d'une même source.

Ombre et pénombre

Expérience 1.2 Un objet opaque est éclairé par une ou plusieurs sources lumineuses. On place un écran à l'opposé des sources.

Observations :

Derrière l'objet éclairé par une seule source ponctuelle (figure 1.2), une partie de l'espace ne reçoit pas de lumière. Cette zone est appelée *ombre*. L'intersection de l'ombre avec l'écran crée l'*ombre portée*.

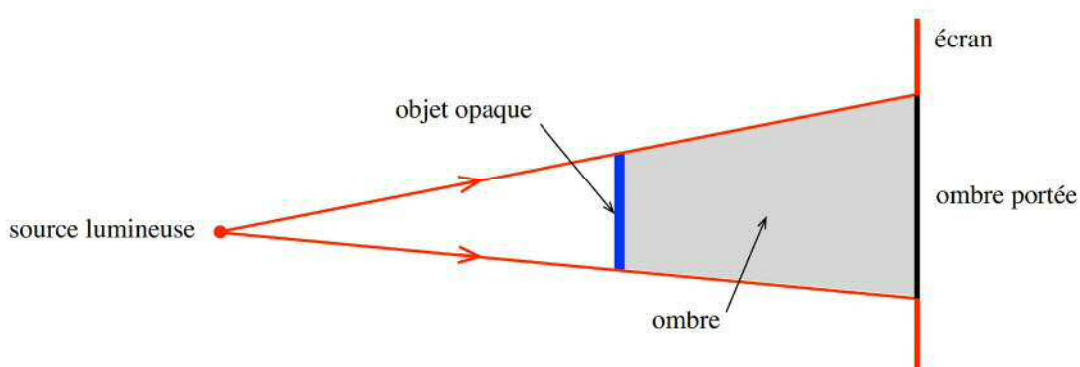


FIGURE 1.2 – Formation de l'ombre avec une source ponctuelle

Lorsque l'objet est éclairé par deux sources ponctuelles (figure 1.3), une partie de l'espace ne reçoit de la lumière que d'une des sources lumineuses. Cette zone est appelée *pénombre*. Son intersection avec l'écran crée la *pénombre portée*.

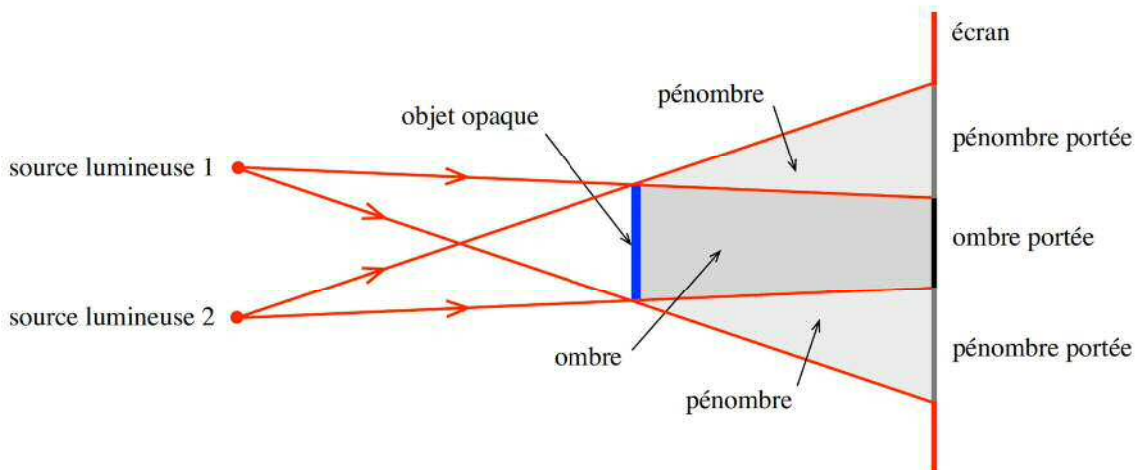


FIGURE 1.3 – Formation de la pénombre avec deux sources ponctuelles

Interprétation :

La formation d'une ombre est une conséquence directe de la propagation rectiligne de la lumière. L'objet opaque constitue un obstacle que la lumière ne contourne pas.

Chambre noire

Une chambre noire est une boîte fermée où un petit trou percé sur une des faces laisse entrer la lumière et la face opposée, faite d'une feuille de papier calque, sert d'écran.

Expérience 1.3 Plaçons un objet en face du trou de la chambre noire (figure 1.4).

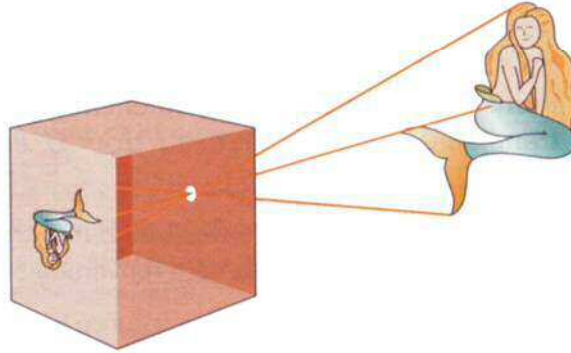


FIGURE 1.4 – Formation d'une image avec une chambre noire

Observation :

On observe une image de l'objet sur l'écran. On remarque que cette image est renversée par rapport à l'objet.

Interprétation :

Chaque point de la source émet des rayons dans toutes les directions. Les rayons qui traversent le trou frappent l'écran.

Les rayons issus de A donnent l'image A' , ceux issus de B donnent B' (figure 1.5).

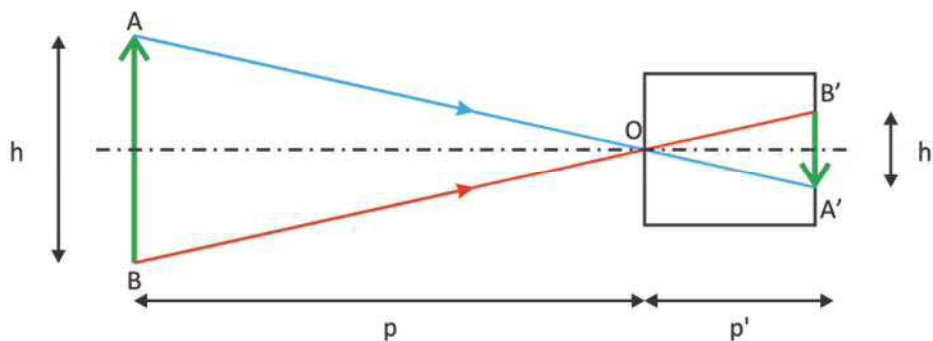


FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement d'une chambre noire

Avec :

- p distance entre l'objet et le trou
- p' distance entre l'image et le trou
- h hauteur de l'objet
- h' hauteur de l'image

Si on éloigne l'objet, l'image devient plus petite : $p \nearrow \Rightarrow h' \searrow$.

Si on éloigne l'écran, l'image devient plus grande : $p' \nearrow \Rightarrow h' \nearrow$.

Les triangles ABO et $A'B'O$ étant semblables, le grandissement γ s'écrit :

$$\gamma = \frac{h'}{h} = \frac{p'}{p}.$$

En augmentant la taille du trou, l'image devient plus lumineuse mais moins nette : le faisceau lumineux issu d'un point donnera un petit disque sur l'écran.

Le rôle de l'œil et du cerveau

La lumière provenant d'un objet que l'on observe traverse les milieux transparents de l'œil, puis arrive sur la rétine, fine membrane qui tapisse le fond de l'œil. La rétine comporte des cellules nerveuses photosensibles :

- les bâtonnets (environ 120 millions), réagissant à l'éclairement ;
- les cônes (environ 5 millions), intervenant dans la vision des couleurs.

L'action de la lumière sur la rétine engendre des influx nerveux qui sont transmis au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Le cerveau interprète les informations captées par nos deux yeux et nous percevons ainsi une image unique en relief (figure 1.6).

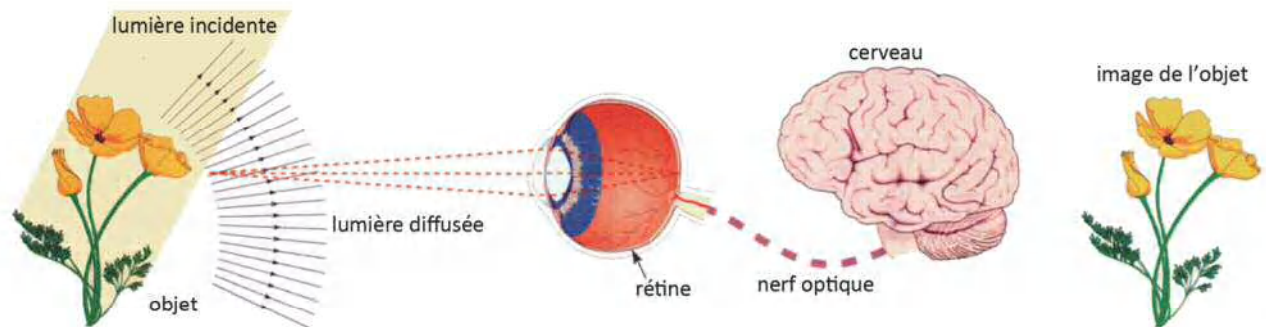


FIGURE 1.6 – La perception visuelle de l'homme

Le cerveau interprète toujours l'impression lumineuse comme si les rayons reçus par l'œil provenaient directement en ligne droite de chaque point lumineux.

1.1.3 Célérité de la lumière

Les scientifiques ont cru longtemps que la propagation de la lumière était instantanée. Au 17^e siècle on rejeta cette idée et on parvint à mesurer pour la première fois la *célérité* ou *vitesse de propagation* finie de la lumière.

Célérité La valeur fixée pour la célérité de la lumière dans le vide, notée c , est une constante universelle, avec $c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8$ m/s.

En pratique, nous adopterons comme valeur approchée de la vitesse de la lumière dans le vide :

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Dans les autres milieux transparents (eau, verre, ...), la lumière se propage toujours à une vitesse inférieure à $3,00 \cdot 10^8$ m/s.

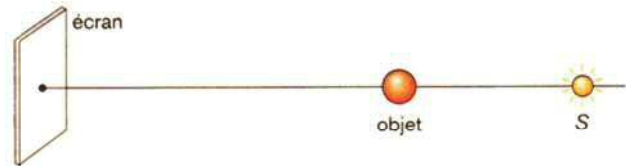
Milieu	c (m/s)
vide	$3,00 \cdot 10^8$
eau	$2,25 \cdot 10^8$
plexiglas	$2,01 \cdot 10^8$
verre crown	$1,98 \cdot 10^8$
verre flint	$1,82 \cdot 10^8$

Remarques :

- L'année lumière, notée « a.l. », est une unité utilisée en astronomie pour exprimer des distances. Elle correspond à la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année.
- Actuellement, la vitesse la plus faible observée pour la lumière est de 17 m/s.

1.1.4 Exercices

Exercice 1.1 On considère une source ponctuelle S , une petite sphère de rayon $r = 2$ cm et un écran placé à la distance $D = 2,0$ m de la source S . La sphère est placée à la distance $d = 0,5$ m de la source ponctuelle de telle façon que l'on puisse voir son ombre portée sur l'écran. La source S et les centres de l'écran et de la sphère sont alignés.



1. Quelle est la nature géométrique de l'ombre portée sur l'écran ?
2. Évaluer les dimensions de cette ombre portée, ainsi que sa surface.
3. On remplace la sphère par un disque de même rayon, à quelles conditions peut-on obtenir sur l'écran la même ombre portée qu'avec la sphère ?

Exercice 1.2 Soient deux sources ponctuelles S_1 et S_2 situées dans un plan vertical à la distance $D = 3,00$ m d'un écran déroulé verticalement. On dispose à la distance $d = 30$ cm des deux sources, un petit objet opaque de forme rectangulaire $a = 3,0$ cm et $b = 2,0$ cm, le côté le plus long étant disposé verticalement. Les deux sources lumineuses distantes de 3,0 cm sont disposées symétriquement par rapport à la direction horizontale passant par le milieu O du rectangle.



1. Faire un schéma dans un plan vertical contenant S_1 , S_2 et O et en utilisant la propagation rectiligne de la lumière, montrer l'existence d'une (ou des) zone(s) d'ombre et d'une (ou des) zone(s) de pénombre.
2. Ces zones sont rectangulaires. En utilisant une vue de dessus, c'est-à-dire dans un

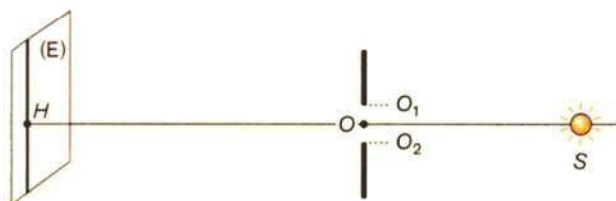
plan horizontal contenant O , déterminer la largeur commune des zones précédemment définies.

- À partir des 2 schémas en déduire les dimensions de la zone d'ombre et déterminer sa surface.
- En utilisant le schéma dans le plan vertical et le théorème de Thalès, montrer que la hauteur H de la zone d'ombre et de pénombre est donnée par la relation :

$$H = a \frac{D - d/2}{d/2}$$

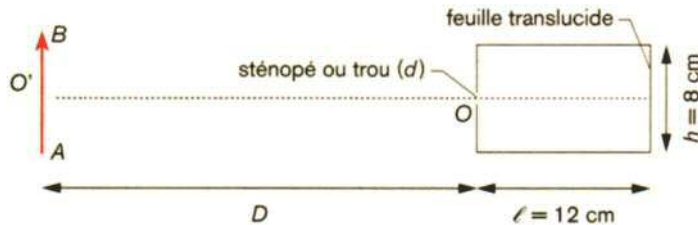
- En déduire la surface des zones de pénombre et préciser le nombre de zones de pénombre et leurs dimensions.

Exercice 1.3 Une fente de largeur $O_1O_2 = 5,0$ cm est éclairée par une source lumineuse S supposée ponctuelle placée à la distance $d_1 = OS = 20$ cm (O est le milieu de la fente). On place un écran (E) à la distance $d_2 = OH = 60$ cm. Le point H appartenant à l'écran est tel que les points S , O et H sont alignés. Quelle est la largeur d'écran éclairée par la source ?



Exercice 1.4 À partir d'une boîte parallélépipédique, Julien construit une chambre noire.

Puis il place face au trou (noté O) de diamètre $d = 1,0$ mm un filament lumineux rectiligne AB de hauteur $10,0$ cm (O' milieu de AB) et d'épaisseur négligeable. Le filament est disposé parallèlement à la face translucide, sa distance au trou O est $D = 60,0$ cm.



- En considérant le trou O ponctuel et en utilisant des rayons lumineux issus de A et B , montrer que l'œil de Julien placé derrière la feuille translucide voit une reproduction du filament renversée sur la feuille (on parlera d'image $A'B'$), puis déterminer la taille de l'image $A'B'$.
- Montrer sur un schéma en vue du dessus avec deux rayons issus de O' que le diamètre du trou influe sur la netteté de l'image. Établir la relation qui lie la largeur e de l'image à la distance D et aux caractéristiques de la chambre noire (l et d) puis calculer e .

Exercice 1.5 Exprimer une année lumière en mètres sachant qu'une année a 365,25 jours.

Exercice 1.6 Dans le Nuage de Magellan, galaxie naine tournant autour de la Voie lactée, une étoile massive a explosé il y a 170000 ans environ. La lumière de l'explosion

a atteint la Terre le 23 février 1987. Ce soir-là, Ian Shelton, un astronome canadien, observant le ciel à l'œil nu, a remarqué la présence d'une nouvelle étoile dans le Nuage de Magellan. C'était une supernova, résultat de l'explosion d'une étoile. À quelle distance de la Terre (en km) la supernova se trouve-t-elle ?

Exercice 1.7 Des réflecteurs ont été déposés à la surface de la Lune lors des différentes missions lunaires Apollo. Depuis la Terre, on vise un réflecteur à l'aide d'un faisceau laser et on mesure la durée t séparant l'émission de la réception. Lors d'une expérience, on a trouvé : $t = 2,51$ s.

1. Déterminer la distance entre les surfaces des deux astres.
2. En déduire la distance entre leurs centres.

Données : rayon de la Terre $R_T = 6,40 \cdot 10^3$ km, rayon de la Lune $R_L = 1,74 \cdot 10^3$ km.

1.2 Réflexion de la lumière

1.2.1 Diffusion et réflexion

Expérience 1.4 On envoie un faisceau laser rouge sur une feuille de papier blanc et on place un petit objet au voisinage de la feuille, en dehors du faisceau incident (figure 1.7). Puis on remplace la feuille de papier par un miroir (figure 1.8).



FIGURE 1.7 – Laser sur feuille de papier



FIGURE 1.8 – Laser sur miroir

Observations :

L'objet placé au voisinage de la feuille de papier est éclairé en rouge. Lorsqu'on remplace la feuille de papier par le miroir, l'objet n'est plus éclairé.

Interprétation :

La feuille renvoie la lumière dans toutes les directions : elle *diffuse* la lumière. La surface du miroir renvoie la lumière dans une seule direction : elle *réfléchit* la lumière.

Définition On dit qu'un rayon lumineux est *réfléchi* par une surface lorsqu'il est renvoyé par celle-ci dans une direction déterminée.

Remarques :

- En physique, on appelle *miroir* toute surface réfléchissante : miroir au sens usuel du terme, mais aussi surface d'une eau tranquille, surface métallisée, vitrine . . .
- Lorsque la surface réfléchissante est plane, on dit qu'il s'agit d'un miroir plan.

1.2.2 Image d'un objet fournie par un miroir plan

Expérience 1.5 On dispose deux bougies symétriquement par rapport à une vitre. Seule la bougie placée devant le miroir est allumée.

Observation : l'image de la flamme donnée par la vitre nous donne l'illusion que la mèche de la bougie placée derrière la vitre est elle aussi allumée.

Interprétation : un objet et son image donnée par un miroir plan sont symétriques l'un de l'autre par rapport au miroir (figures 1.9).

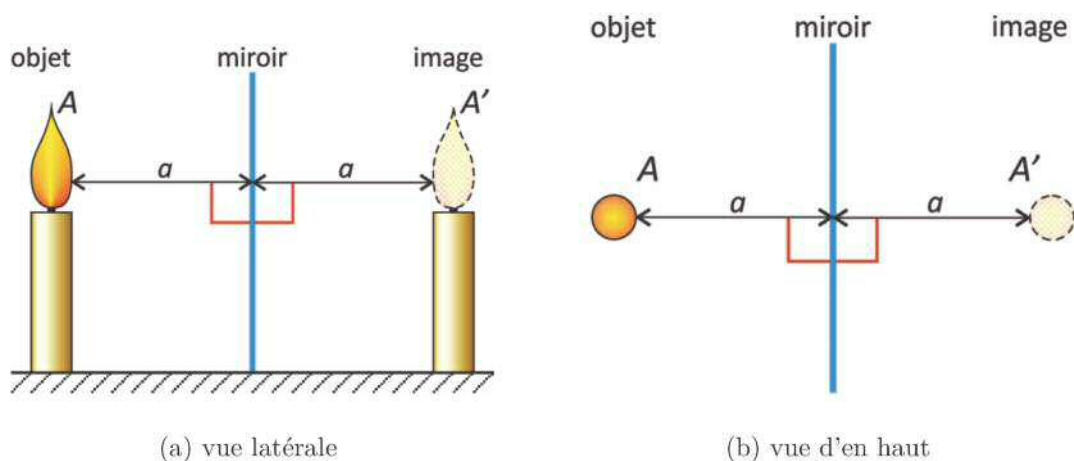


FIGURE 1.9 – Image d'une bougie fournie par un miroir

À tout point A de l'objet correspond un point A' , image symétrique de A par rapport au miroir. A' est le point image conjugué du point objet A dans le miroir.

1.2.3 Les lois de la réflexion

Pour pouvoir expliquer l'existence d'un point image, il faut savoir comment un seul rayon est réfléchi par un miroir.

Expérience 1.6 On dirige un rayon laser obliquement vers la surface réfléchissante d'un miroir horizontal. Les faisceaux incident et réfléchi sont visualisés par la vapeur (figure 1.10).

Observation : les faisceaux incident et réfléchi sont dans un plan perpendiculaire au miroir.

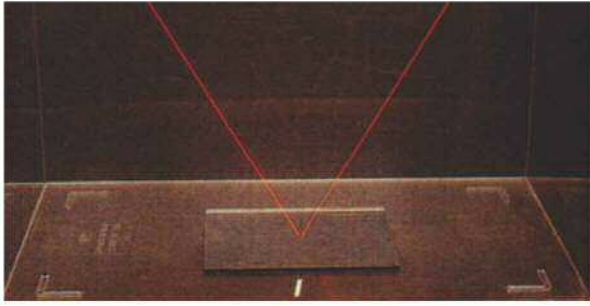


FIGURE 1.10 – Plan contenant les rayons

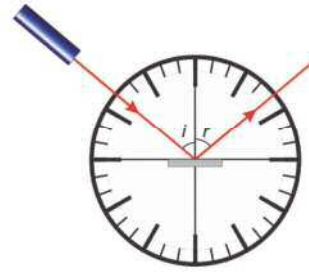


FIGURE 1.11 – Mesure des angles

Expérience 1.7 On place un rapporteur dans un plan perpendiculaire à un miroir (figure 1.11).

Observation : l'angle de réflexion r et l'angle d'incidence i ont même amplitude.

Ces résultats constituent les *lois de Descartes* de la réflexion (figure 1.12).

Lois de la réflexion *Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale à la surface réfléchissante sont situés dans un même plan, appelé plan d'incidence.*

L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :

$$r = i$$

Les directions du rayon réfléchi et du rayon incident sont donc symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale au plan l'incidence.

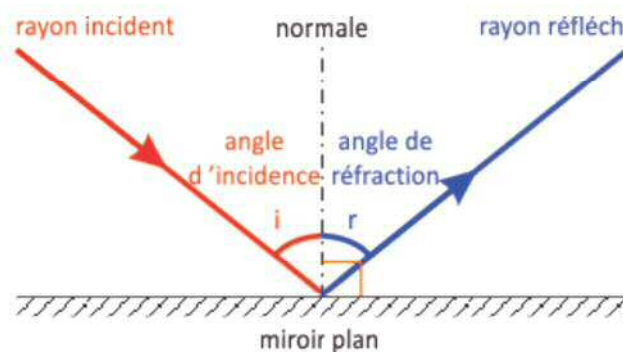


FIGURE 1.12 – Lois de la réflexion

1.2.4 La position d'un point image

Deux rayons issus d'un point-objet A sont dirigés vers un miroir plan (M) qu'ils atteignent respectivement en I_1 et I_2 . Les droites (I_1O_1) et (I_2O_2) supportant les rayons réfléchis I_1O_1 et I_2O_2 sont symétriques des droites (AI_1) et (AI_2) par rapport aux normales n_1 et n_2 au plan du miroir.

Elles passent donc par le point A' symétrique de A par rapport au plan du miroir (la droite (AA') est perpendiculaire au plan du miroir et $a = a'$). Il en est de même pour le rayon réfléchi correspondant à tout rayon incident issu de A .

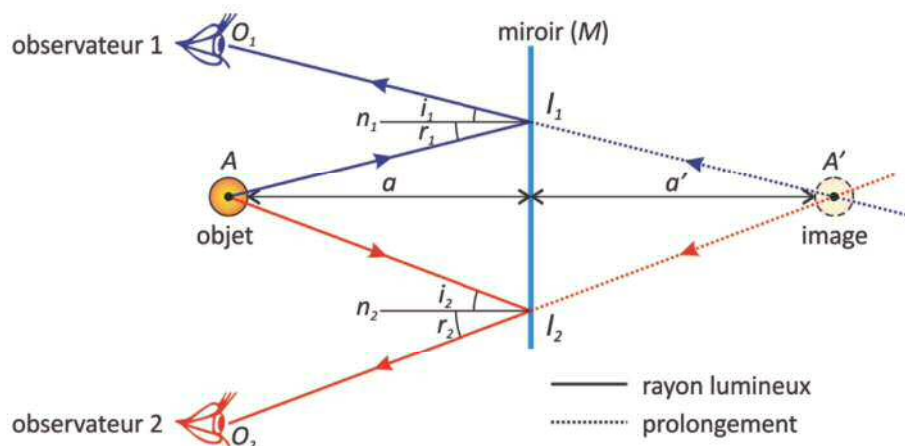


FIGURE 1.13 – Construction d'un point image

Pour l'œil d'un observateur recevant la lumière réfléchiée par le miroir, tout se passe comme si elle provenait d'un point-objet placé en A' . C'est là l'interprétation du cerveau, conditionnée à la propagation rectiligne de la lumière.

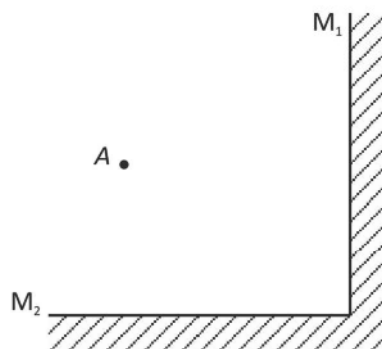
Les lois de la réflexion permettent donc d'établir que le point-image A' qu'un miroir plan fournit d'un point-objet A donné est symétrique de A par rapport au plan du miroir.

1.2.5 Exercices

Exercice 1.8 Positionner l'image du point-objet S donnée par le miroir en utilisant les deux rayons lumineux représentés.



Exercice 1.9 Étudions les images d'un point-objet A données par deux miroirs plans placés orthogonalement l'un par rapport à l'autre.



1. Positionner d'abord l'image A_1 de A donnée par le miroir (M_1), puis l'image A_2 de A donnée par le miroir (M_2). Ces deux images sont dites images premières.

À l'aide d'un rayon lumineux issu de A , se réfléchissant uniquement sur (M_1) , positionner l'œil de l'observateur qui voit l'image première A_1 . Utiliser la même démarche pour l'autre image première.

2. Positionner ensuite la (ou les) images secondes (images des images premières dans le miroir).

Pour rechercher ces images il suffit de prolonger par des lignes discontinues les 2 miroirs : A_1 présente une image A_1' et A_2 une image A_2' .

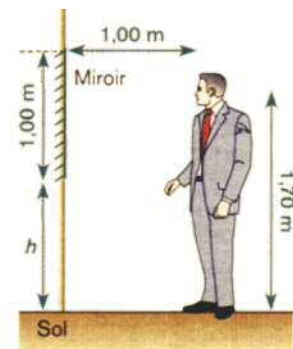
Pourquoi dans cet exercice les images A_1' et A_2' sont-elles confondues ? À l'aide d'un rayon lumineux issu de A , se réfléchissant sur (M_1) , puis sur (M_2) , positionner l'œil de l'observateur qui voit les images secondes A_1' et A_2' .

Exercice 1.10 Un rayon lumineux issu d'une source ponctuelle S se réfléchit en un point I , sur un miroir plan placé horizontalement. On fait tourner le miroir d'un angle $\alpha = 15^\circ$ autour d'un axe (Δ) situé dans son plan, passant par le point I .

1. Faire un schéma et représenter le rayon incident, les rayons réfléchis et la normale au plan avant et après la rotation du miroir.
2. Déterminer la valeur β de l'angle de rotation du rayon réfléchi au cours de la rotation du miroir.
3. Sur un autre schéma, positionner S_1 et S_2 points-images conjugués de (S) pour les 2 positions successives du miroir. Évaluer l'angle $\widehat{S_1IS_2}$.

Exercice 1.11 Un homme mesurant 1,80 m se place debout, à 1,00 m devant un miroir plan, ses yeux sont situés à une distance $H = 1,70$ m du sol. Le miroir plan rectangulaire de dimensions (1,20 m \times 1,00 m) est plaqué initialement contre le mur vertical à une hauteur $h = 1,00$ m du sol.

1. Déterminer à quelle hauteur maximale h du sol doit se trouver le bas du miroir afin que l'homme voie ses pieds.
2. À quelle distance minimale du sol doit se trouver le haut du miroir afin que l'homme voie le haut de sa tête ?
3. Le miroir tel qu'il est positionné sur la figure permettra-t-il à l'homme de :
 - (a) voir le haut de sa tête ?
 - (b) se voir en entier ? Si non, proposer une solution.
4. Montrer que le fait de se rapprocher ou de s'éloigner du miroir ne peut lui permettre de solutionner le problème.



1.3 Réfraction de la lumière

1.3.1 Le phénomène de réfraction

Expérience 1.8 Autour d'une petite boîte contenant une pièce de 1 €, de nombreux observateurs se placent de sorte que le bord de la boîte leur cache tout juste la pièce. Pendant que les observateurs maintiennent leur tête immobile, on verse de l'eau dans la boîte (figure 1.14).

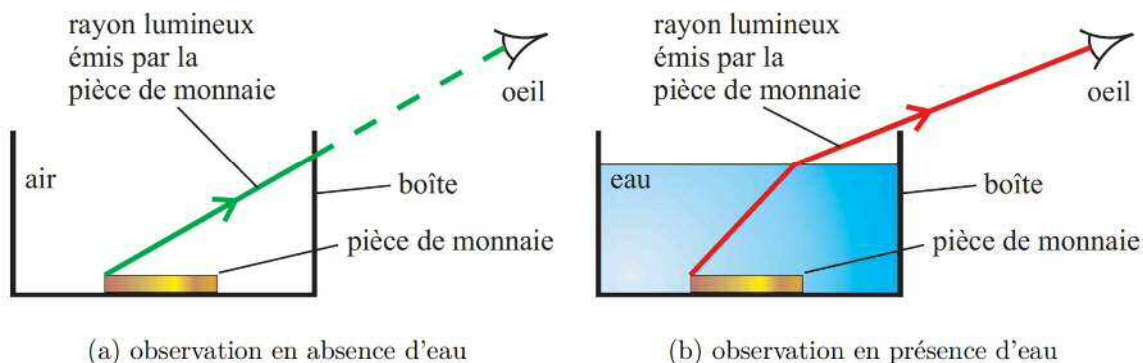


FIGURE 1.14 – Boîte contenant une pièce de monnaie

Observation : la pièce est devenue visible pour tous les observateurs.

Explication : lorsque les rayons lumineux traversent la surface de séparation entre l'eau et l'air, ils subissent un brusque changement de direction : la lumière est *réfractée* !

Expérience 1.9 Dirigeons un faisceau laser obliquement vers la surface de l'eau contenue dans une cuve aux parois transparentes (figure 1.15).

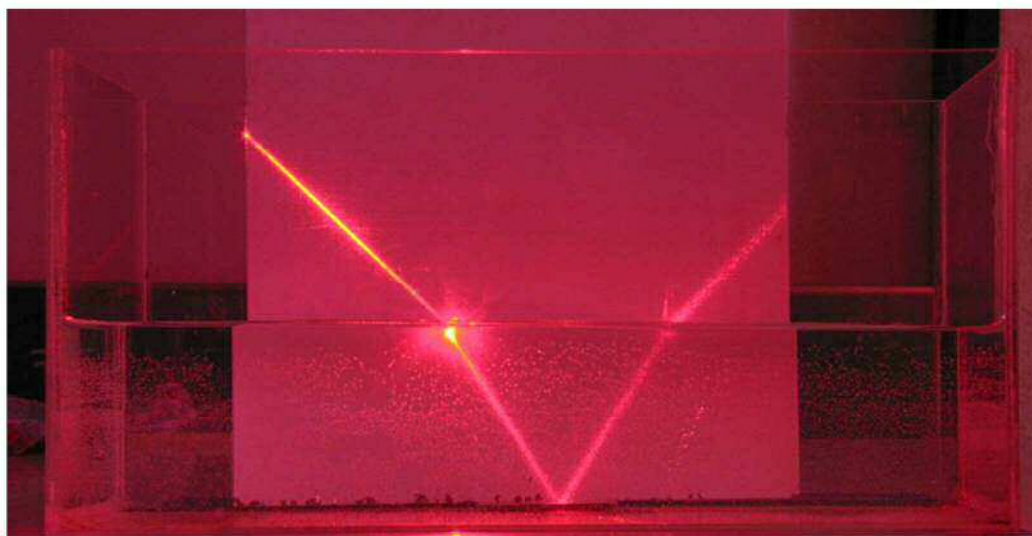


FIGURE 1.15 – Réfraction d'un rayon laser à la surface de l'eau

Observation : le faisceau lumineux est dévié en traversant la surface de séparation entre les deux milieux transparents.

Réfraction Lorsque la lumière traverse la surface séparant deux milieux transparents différents, elle subit un changement de direction : c'est le phénomène de réfraction.

Définition Un dioptre est une surface séparant deux milieux transparents et homogènes.

1.3.2 Les lois de la réfraction

Expérience 1.10 Nous allons étudier d'une manière plus approfondie la réfraction observée lors du passage d'un faisceau lumineux de l'air dans le plexiglas (figure 1.16).

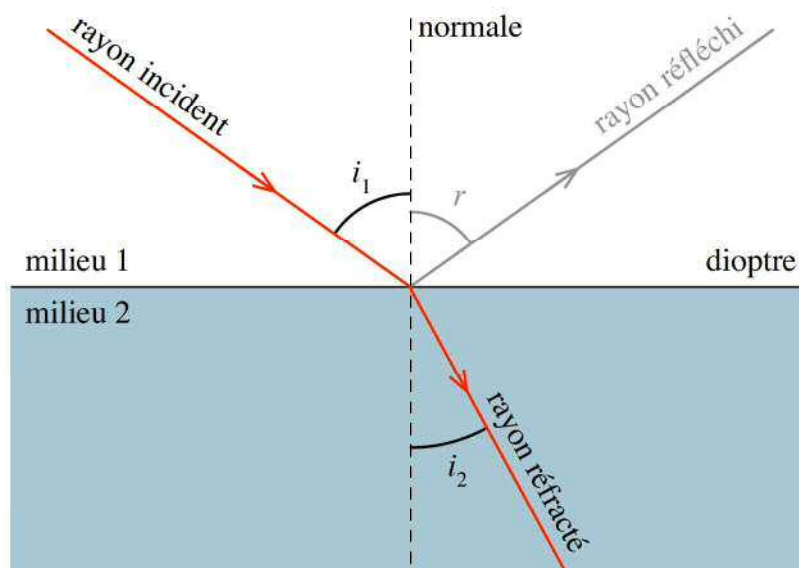


FIGURE 1.16 – Passage d'un rayon de l'air dans le plexiglas

Nous mesurons l'angle de réfraction i_2 pour différents angles d'incidence i_1 .

Tableau des mesures :

i_1 (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
i_2 (°)										

Conclusions :

- Il n'y a pas de réfraction si la lumière incidente vient perpendiculairement au dioptre.
- Sauf pour $i_1 = 0$, l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence : le rayon réfracté se rapproche de la normale.
- La réfraction est d'autant plus prononcée que l'angle d'incidence est plus grand.
- L'angle de réfraction limite vaut : $L = \dots\dots\dots^\circ$
- Le rayon réfracté se trouve dans le plan d'incidence.
- Nous constatons :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} \simeq 1,5 = \text{constante.}$$

Il y a donc proportionnalité entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Le coefficient de proportionnalité est noté $n_{\text{plexiglas/air}}$ et s'appelle *indice de réfraction* du plexiglas par rapport à l'air. Cet indice dépend des deux milieux transparents et est d'autant plus grand que la réfraction est, pour un même angle d'incidence, plus prononcée.

Expérience 1.11 Reprenons l'expérience précédente mais inversons le sens de propagation de la lumière. La lumière passe donc d'un milieu plus *réfringent* dans un milieu moins réfringent (figure 1.17).

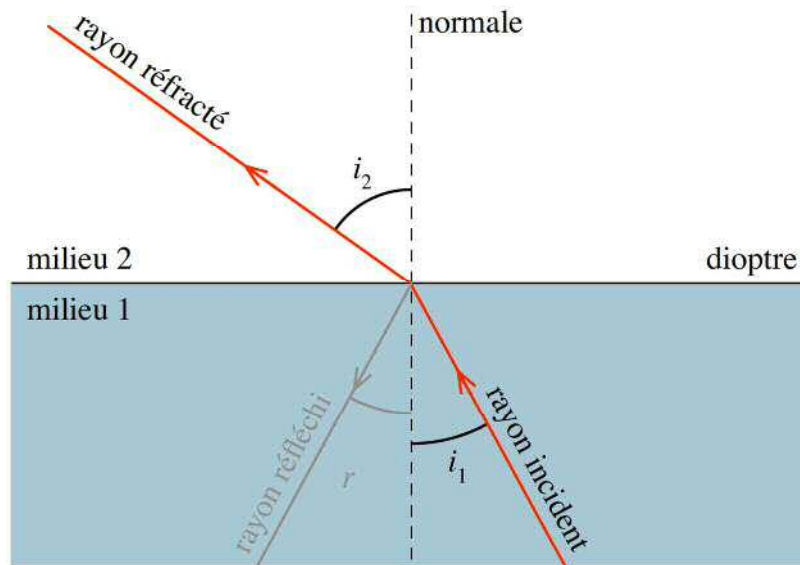


FIGURE 1.17 – Passage d'un rayon du plexiglas dans l'air

Choisissons comme valeurs de l'angle d'incidence successivement les valeurs de l'angle de réfraction de l'expérience 1.10.

Tableau des mesures :

i_1 (°)											
i_2 (°)											

Observation : les angles de réfraction respectifs sont égaux aux angles d'incidence de l'expérience 1.10.

Conclusions :

- La lumière emprunte la même trajectoire indépendamment du sens de la propagation. C'est la loi du retour inverse de la lumière.
- Sauf pour $i_1 = 0$, l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence : le rayon réfracté s'éloigne de la normale.
- Si $i_1 = L$, angle de réfraction limite, alors $i_2 = 90^\circ$ (figure 1.18).
- Si $i_1 > L$ le rayon incident ne peut plus passer dans le milieu le moins réfringent : la lumière est *totalelement réfléchi*, le diopre agit comme un miroir (figure 1.19).

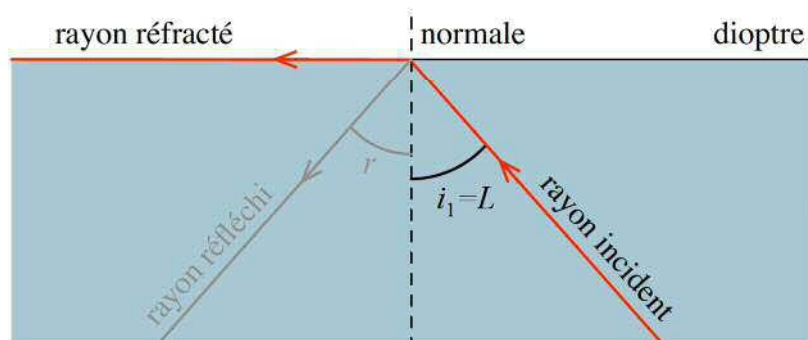


FIGURE 1.18 – Cas limite

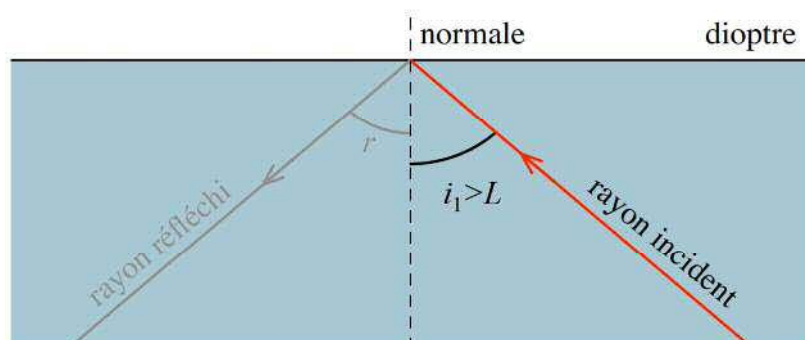


FIGURE 1.19 – Réflexion totale

- Nous constatons :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} \simeq 0,667 = n_{\text{air/plexiglas}}.$$

1.3.3 L'indice de réfraction

Le phénomène de réfraction est une conséquence du fait que la vitesse de propagation de la lumière est différente dans des milieux transparents différents. On peut remarquer que dans les cas étudiés les indices de réfraction sont liés aux célérités de la lumière par les relations :

$$n_{\text{plexiglas/air}} = 1,5 = \frac{c_{\text{air}}}{c_{\text{plexiglas}}}$$

et :

$$n_{\text{air/plexiglas}} = 0,667 = \frac{c_{\text{plexiglas}}}{c_{\text{air}}}.$$

Cette relation est vérifiée en général. On définit l'*indice de réfraction* n pour un milieu transparent :

$$n = \frac{c_{\text{vide}}}{c}$$

c étant la célérité de la lumière dans ce milieu.

Exemples :

Milieu	n
vide	1,00
eau	1,33
plexiglas	1,49
verre crown	1,52
verre flint	1,65

Les indices déterminés lors de l'expérience précédente s'écrivent :

$$n_{\text{plexiglas/air}} = \frac{n_{\text{plexiglas}}}{n_{\text{air}}}$$

et :

$$n_{\text{air/plexiglas}} = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{plexiglas}}}.$$

1.3.4 La loi de Snell-Descartes

Les résultats des expériences ainsi que la définition de l'indice de réfraction nous permettent de formuler les lois de la réfraction.

Loi de Snell-Descartes *Le rayon incident et le rayon réfracté sont contenus dans un même plan : le plan d'incidence.*

Les angles d'incidence et de réfraction satisfont à la relation :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

ou :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

1.3.5 L'angle de réfraction limite

Appliquons la loi de Snell-Descartes pour exprimer l'angle de réfraction limite en fonction des indices de réfraction. Le cas limite correspond à :

$$n_1 > n_2 \quad i_1 = L \quad i_2 = 90^\circ.$$

D'où :

$$\frac{\sin L}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

et donc :

$$L = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Exemple : pour le dioptré air/plexiglas $L = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1,49} \right) = 42,2^\circ$.

1.3.6 Réflexion totale

Revenons au cas particulièrement important de la réflexion totale.

Mise en évidence expérimentale

Expérience 1.12 Dans une cuve d'eau, nous disposons une source lumineuse envoyant des faisceaux lumineux sous différents angles (figure 1.20).

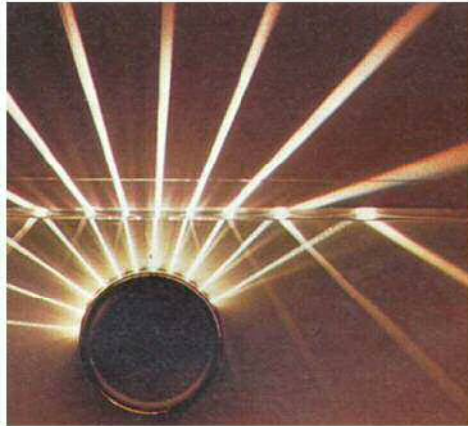


FIGURE 1.20 – Cuve contenant de l'eau avec une source lumineuse

Observations :

- Certains faisceaux sortent de l'eau et sont réfractés.
- Certains faisceaux ne sortent pas de l'eau et sont réfléchis à la surface du liquide.

Conclusion :

Seuls les faisceaux formant un angle d'incidence inférieur à l'angle limite sortiront de l'eau. Dans le cas contraire, le faisceau ne quitte plus le liquide et reste dans l'eau en étant réfléchi sur la surface de l'eau comme sur un miroir.

Réflexion totale *Si à la surface de séparation entre deux milieux transparents :*

- le rayon lumineux passe du milieu plus réfringent vers le milieu moins réfringent ;
- l'angle d'incidence est plus grand que l'angle limite de réfraction,

le rayon est réfléchi entièrement par le dioptre. C'est le phénomène de la réflexion totale.

Applications

- La fibre optique (figure 1.21) se compose d'un cœur en verre optique d'indice de réfraction élevé et d'une enveloppe en verre d'indice de réfraction faible. Les rayons lumineux qui entrent par une extrémité dans la fibre sont guidés dans le cœur par réflexion totale tout au long de la fibre malgré les courbures infligées et ressortent à l'autre extrémité.

La fibre optique est utilisée en informatique pour le transport d'informations sous forme de lumière. En médecine on l'utilise dans l'endoscopie.

- Le système optique d'une paire de jumelles (figure 1.22) fait intervenir la réflexion totale interne dans deux prismes pour renverser l'image et intervertir la gauche et la droite, de sorte que le champ de vision observé par l'œil soit normal.

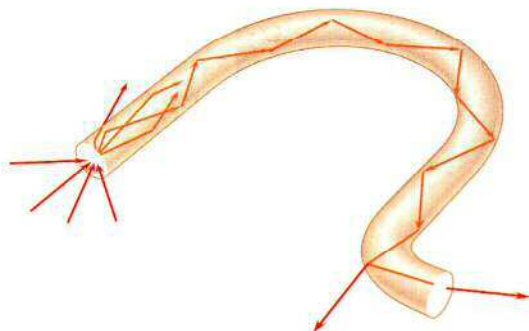


FIGURE 1.21 – Fibre optique

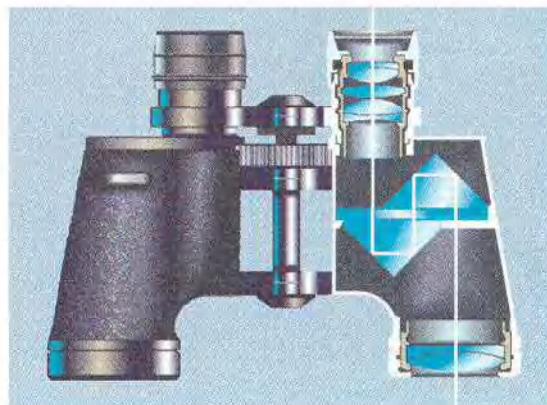


FIGURE 1.22 – Jumelles

1.3.7 Dispersion

Expérience 1.13 Un faisceau de lumière blanche issu d'une lampe à incandescence traverse un prisme en verre (figure 1.23). Le faisceau subit deux réfractations successives. Il en résulte une déviation du faisceau. Nous plaçons un écran derrière le prisme.

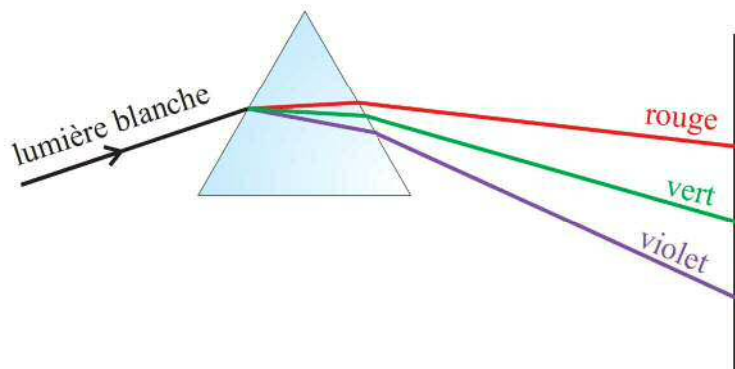


FIGURE 1.23 – Décomposition de la lumière blanche

Observation :

Sur l'écran apparaît une bande colorée qu'on appelle *spectre*. Cette décomposition de la lumière blanche est appelée *dispersion*.

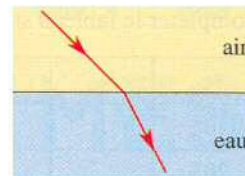
Interprétation :

La lumière blanche est un mélange des couleurs du spectre. Le prisme sépare les couleurs en les réfractant différemment : la lumière violette subit la plus grande déviation, la lumière rouge la plus petite déviation. Il en résulte que l'indice de réfraction dépend non seulement du milieu transparent mais aussi de la couleur et donc de la longueur d'onde de la lumière.

1.3.8 Exercices

Exercice 1.12 On schématise à la figure ci-dessous la réfraction d'un rayon de lumière monochromatique passant de l'air dans l'eau.

1. Reproduire et compléter ce schéma en indiquant le point d'incidence, en dessinant la normale à la surface de séparation des deux milieux et en indiquant les angles d'incidence et de réfraction.
2. Donner l'expression de la loi de Snell-Descartes.
3. Calculer l'angle de réfraction si l'angle d'incidence vaut 45° , sachant que l'indice de l'eau vaut 1,33 et que l'indice de l'air vaut 1,00.



Exercice 1.13 L'un des rayons d'un faisceau de lumière se propageant dans l'air pénètre dans un diamant d'indice de réfraction 2,43.

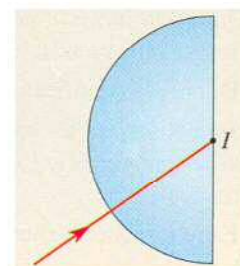
1. Schématiser la situation.
2. Écrire la loi de Snell-Descartes.
3. Calculer l'angle d'incidence permettant d'obtenir un angle de réfraction de 20° .

Exercice 1.14 Un rayon lumineux se propageant dans le verre d'indice de réfraction 1,53 et faisant un angle de 70° avec le dioptré sort dans l'air d'indice de réfraction 1,00.

1. Quel est l'angle d'incidence ?
2. Calculer l'angle de réfraction.

Exercice 1.15 Un faisceau de lumière monochromatique est dirigé, comme l'indique le schéma ci-dessous, vers le centre I de la face plane d'un demi-cylindre de verre. Il pénètre dans le verre sans déviation et aborde, en I , la face de séparation du verre et de l'air.

1. Écrire la loi de Snell-Descartes pour le passage de la lumière du verre dans l'air.
2. L'indice du verre vaut 1,5. L'angle de réfraction vaut 60° . Calculer l'angle d'incidence.
3. Reproduire et compléter le schéma en dessinant le rayon réfracté. Pourquoi le rayon n'est-il pas dévié lorsqu'il pénètre dans le demi-cylindre ?



Exercice 1.16 Le rayon d'un faisceau de lumière monochromatique issu d'un laser est dirigé sur une lame de verre. Pour cette lumière, l'indice du verre est 1,47.

1. Calculer l'angle de réfraction i_2 lorsque la lumière pénètre dans le verre avec un angle d'incidence $i_1 = 40^\circ$.
2. Avec quel angle d'incidence i_3 la lumière atteint-elle la surface de sortie séparant le verre et l'air ?

3. Calculer l'angle de réfraction lorsque la lumière sort du verre.

1.4 Lentilles minces

1.4.1 Définitions

Définition Une lentille est un solide constitué d'un matériau transparent (verre, Plexiglas ...) délimité par deux faces dont l'une au moins est courbe, l'autre face pouvant être plane.

La lentille est dite *sphérique* si les faces courbes sont des portions de sphère. L'axe de symétrie des lentilles sphériques est appelé *axe principal* de la lentille.

L'axe (Δ) commun aux deux calottes sphériques (ou à la calotte sphérique et au disque) est appelé *axe optique* de la lentille.

Définition La lentille est dite *mince* si son épaisseur $e = O_1O_2$ sur l'axe optique est petite devant les rayons R_1 et R_2 des deux calottes sphériques (figure 1.24).

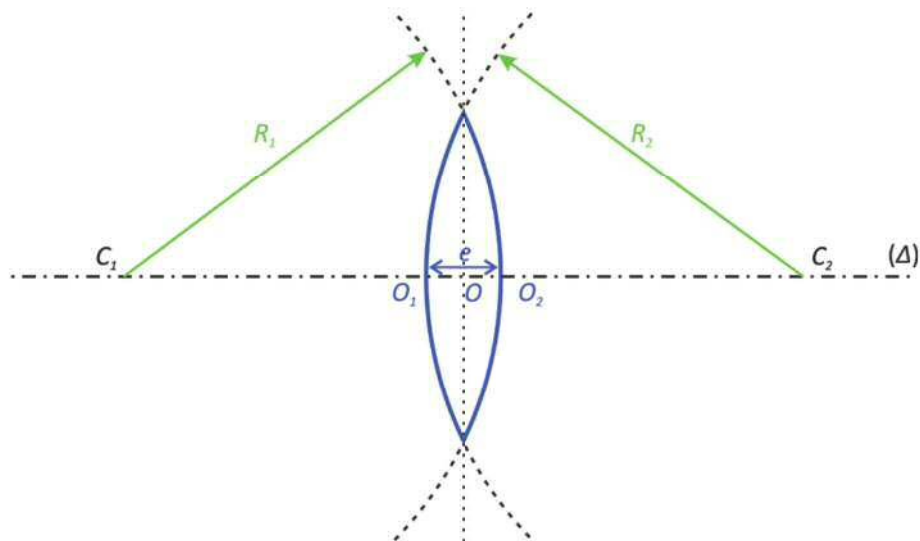
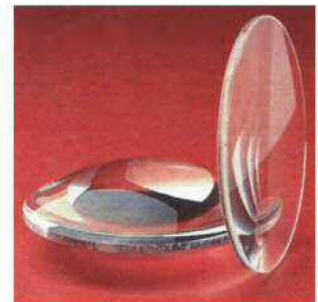


FIGURE 1.24 – Faces sphériques d'une lentille mince

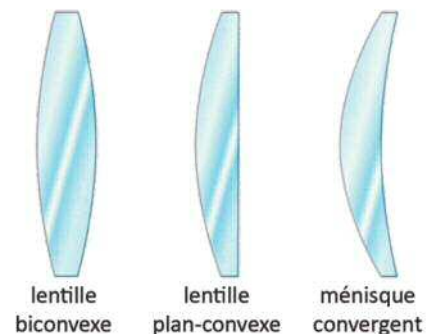
Dans ce cas, on peut confondre les intersections des deux faces avec l'axe optique en un même point O appelé *centre optique* de la lentille.

1.4.2 Lentilles convergentes, lentilles divergentes

Lentilles convergentes

Une *lentille convergente* fait en sorte que les rayons lumineux qui la traversent se rapprochent de son axe optique. Les lentilles convergentes peuvent avoir plusieurs formes, mais elles ont toutes au moins un côté convexe, c'est-à-dire bombé vers l'extérieur.

Les rayons d'un faisceau parallèle à l'axe optique qui traversent une lentille convergente sont tous déviés vers l'axe optique de la lentille (qui correspond à la normale).



Le point de convergence sur l'axe s'appelle *foyer* de la lentille (figure 1.25). Plus la courbure d'une lentille convergente est prononcée, plus le foyer se rapproche de la lentille.

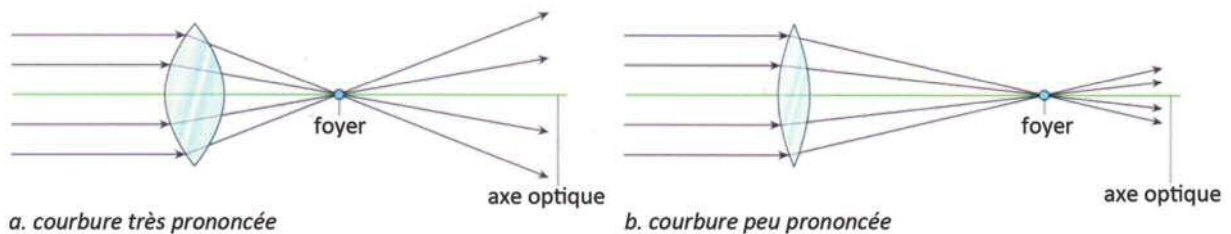


FIGURE 1.25 – Foyer d'une lentille convergente

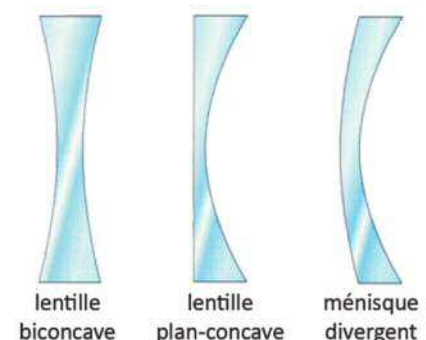
Les lentilles convergentes ont des bords minces, on les appelle encore lentilles convexes. Les rayons lumineux d'un faisceau parallèle à l'axe optique d'une lentille mince convexe convergent, après la traversée, de la lentille vers un point : le foyer.

Lentilles divergentes

Une *lentille divergente* fait en sorte que les rayons lumineux qui la traversent s'éloignent de son axe optique. Les lentilles divergentes peuvent avoir plusieurs formes, mais elles ont toutes au moins un côté concave, c'est-à-dire bombé vers l'intérieur.

Les rayons d'un faisceau parallèle à l'axe optique qui traversent une lentille divergente sont tous déviés de l'axe optique de la lentille.

Lorsqu'on trace le prolongement des rayons réfractés, on remarque qu'ils semblent tous provenir d'un point situé sur l'axe de la lentille. Ce point se nomme *foyer* de la lentille divergente (figure 1.26). Plus la courbure d'une lentille divergente est prononcée, plus le foyer se rapproche de la lentille.



Les lentilles divergentes ont des bords épais, on les appelle encore lentilles concaves. Les rayons lumineux d'un faisceau parallèle à l'axe optique d'une lentille mince concave divergent, après la traversée de la lentille, à partir d'un point : le foyer.

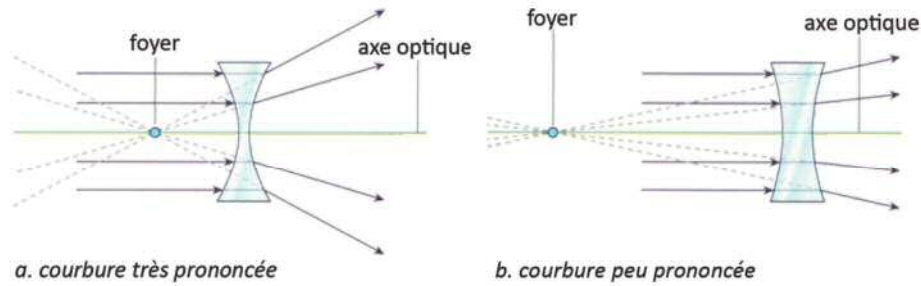


FIGURE 1.26 – Foyer d'une lentille divergente

1.4.3 Points et rayons particuliers

Après traversée d'une lentille mince convergente (figure 1.27) :

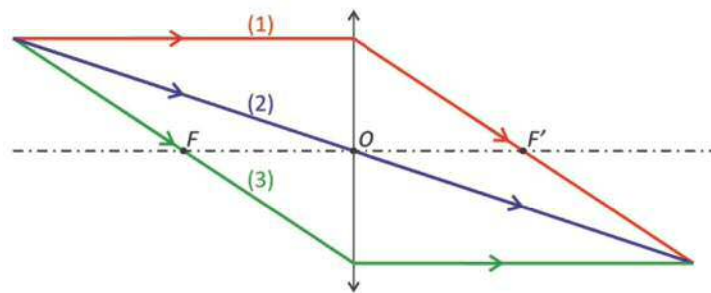


FIGURE 1.27 – Trajets des rayons particuliers

- un rayon parallèle à l'axe principal passe par le foyer principal image F' ;
- un rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié ;
- un rayon passant par le foyer principal objet F sort de la lentille parallèlement à l'axe principal.

1.4.4 Distance focale et vergence

En repérant les positions des foyers F et F' par rapport à celle du centre optique O , on peut mesurer les distances OF et OF' . Les mesures donnent des valeurs très voisines. Les points F et F' sont symétriques l'un de l'autre par rapport au plan de la lentille (figure 1.27).

Définition On appelle *distance focale* d'une lentille mince la distance :

$$f = OF = OF'.$$

Les calculs concernant les lentilles font souvent intervenir de façon plus simple l'inverse de la distance focale.

Définition On appelle *vergence* d'une lentille la grandeur :

$$C = \frac{1}{f}.$$

L'unité S.I. de vergence est la *dioptrie* δ : $1 \delta = 1 \text{ m}^{-1}$.

1.4.5 Image formée sur un écran

Localisation de l'image

Expérience 1.14 Disposons la flamme d'une bougie au voisinage de l'axe optique d'une lentille convergente, assez loin de celle-ci. Déplaçons un écran translucide de l'autre côté de la lentille parallèlement à lui-même, le long de l'axe optique de la lentille (figure 1.28).

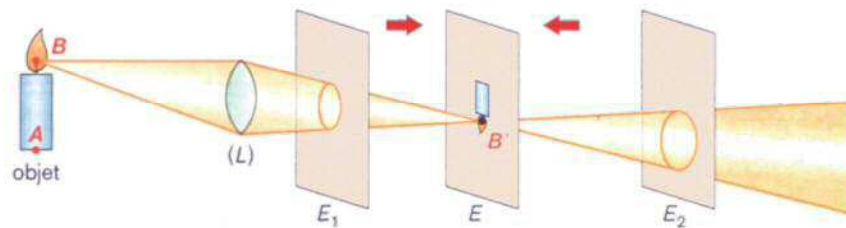


FIGURE 1.28 – Recherche de la position de l'image

Observation :

Pour une position donnée de l'écran translucide on y obtient une image nette et renversée de la flamme sur l'écran.

Conclusions :

- La lentille donne d'un petit objet voisin de son axe optique et perpendiculaire à celui-ci (on le qualifie alors de frontal) une image sur un écran placé convenablement. L'écran doit être disposé perpendiculairement à l'axe optique de la lentille (image frontale), à une distance particulière de celle-ci. L'objet est qualifié de petit si sa taille perpendiculairement à l'axe optique est petite par rapport à la distance focale de la lentille.
- Un point particulier B de la flamme de bougie envoie des rayons lumineux sur la lentille convergente (L). Les rayons émergents convergent tous en un point B' . On dit que B est un point-objet, que B' est son point-image, ou que B et B' sont conjugués l'un de l'autre.

Définition On appelle *grandissement* γ le rapport entre la taille de l'image et de l'objet. Si A et B sont deux points de l'objet et A' et B' leurs images respectives :

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB}.$$

Construction de l'image

Considérons un point-objet B situé au voisinage de l'axe optique de la lentille. Pour construire l'image B' de B , on trace la marche de deux des rayons particuliers issus de B

choisis parmi les trois suivants (figure 1.29) :

- le rayon incident BO passant par le centre optique de la lentille et qui n'est pas dévié ;
- le rayon incident BI parallèle à l'axe optique de la lentille qui émerge en passant par le foyer principal image F' ;
- le rayon incident BF passant par le foyer principal objet F de la lentille qui émerge parallèlement à son axe optique.

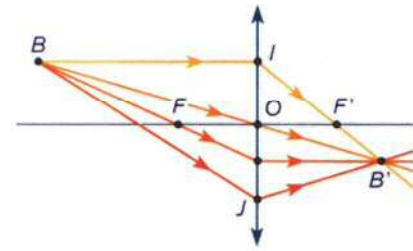


FIGURE 1.29 – Construction de l'image

Les trois rayons se coupent au même point B' qui est l'image de B . Un rayon quelconque issu de B (tel que BJ) émerge de la lentille en passant par B' .

Un petit objet frontal est représenté par deux points A et B , où A est un point de l'axe optique (figure 1.33). On représente le petit objet frontal AB par une flèche. Le point A de l'axe optique peut toujours être considéré comme la projection orthogonale sur ce dernier du point B .

De l'expérience 1.14 on déduit les propriétés de l'image de l'objet frontal :

- puisque l'image du petit objet frontal est frontale, l'image A' de A est la projection orthogonale de B' sur l'axe ;
- l'image $A'B'$ est renversée, c'est-à-dire de sens opposé à celui de l'objet AB .

Caractéristiques de l'image

Lorsque la distance de l'objet au centre optique est supérieure à la distance focale, l'image est :

- de l'autre côté de la lentille ;
- observée sur un écran positionné à une distance supérieure à la distance focale ;
- réelle ;
- renversée.

Déplacement de l'objet et déplacement de l'image

La construction de la figure 1.30 montre que, si le point A , situé à gauche de F est très éloigné de ce point (point A_1), le point A' se trouve très près de F' (point A_1'). Alors, si A se rapproche de F tout en restant à sa gauche (point A_2), A' s'éloigne de F' (point A_2').

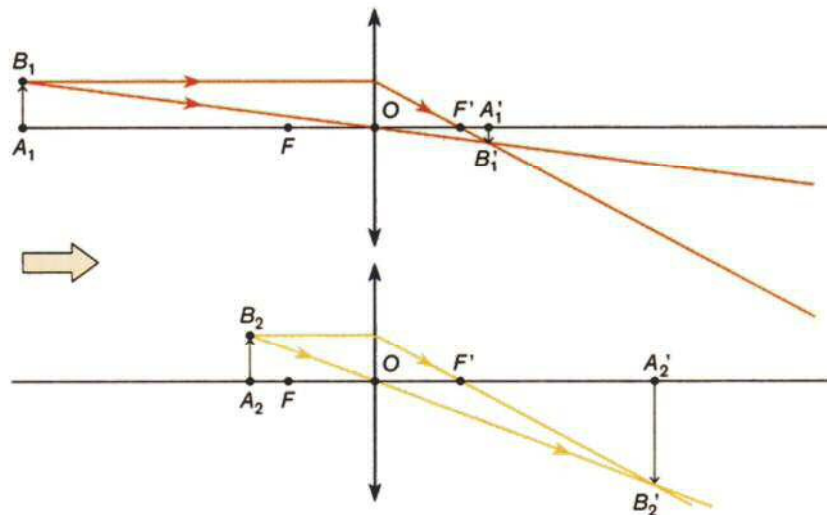


FIGURE 1.30 – Variation de la position de l'image

1.4.6 Image observée à travers la lentille

Mise en évidence

Expérience 1.15 Dans l'expérience 1.14, diminuons la distance lentille-bougie jusqu'à ce que l'objet AB (flamme de la bougie) vienne se placer entre le foyer principal objet F et le centre optique O de la lentille.

Observations :

- Nous ne pouvons plus observer d'image sur un écran.
- En plaçant l'œil du côté opposé à la bougie et en regardant à travers la lentille, nous observons une image de la flamme de la bougie qui paraît plus grande et du même sens que celle-ci.

Construction de l'image

Le rayon BO , passant par le centre optique de la lentille, n'est pas dévié (figure 1.31). Le rayon BI , parallèle à l'axe optique, émerge en passant par le foyer principal image F' . Les demi-droites $[BO)$ et $[IF')$ ne se coupent pas. Mais leurs prolongements (en pointillés sur la figure) se coupent en un point B' , image du point objet B .

La projection orthogonale A' du point B' sur l'axe optique fournit l'image du point objet A , A désignant la projection orthogonale de B sur l'axe optique.

L'image $A'B'$ est droite, c'est-à-dire de même sens que celui de l'objet AB .

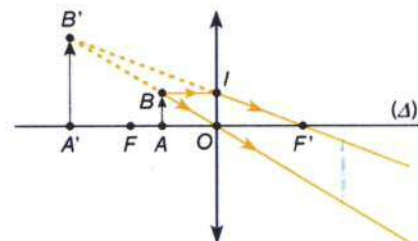


FIGURE 1.31 – Construction de l'image

Caractéristiques de l'image

Lorsque l'objet est situé entre le centre optique et le foyer de la lentille, l'image :

- est du même côté que l'objet ;
- ne peut pas être observée sur un écran ;
- est virtuelle ;
- est droite.

Déplacement de l'objet et déplacement de l'image

Si A se trouve très près de F , mais situé à sa droite (figure 1.31), les segments BI et OF sont pratiquement égaux. Il en est donc de même pour BI et OF' , et les droites (IF') et (BO) sont presque parallèles. L'image B' , situé à gauche de O , est très éloignée de ce point. Si A se déplace alors de F en O , B' se déplace sur la droite (IF') jusqu'en I tandis que A' se déplace vers la droite jusqu'en O .

La loupe

Une loupe est une lentille convergente de courte distance focale (quelques centimètres). L'image est observée à travers la lentille.

Expérience 1.16 Observons un timbre-poste avec une loupe.

Observation :

Si la loupe est tenue de façon à rapprocher de F le point A situé au centre du timbre, le point B' est rejeté de plus en plus loin à l'avant de la lentille (figure 1.32). L'image $A'B'$ est de plus en plus grande, mais l'angle sous lequel on l'observe reste fini.

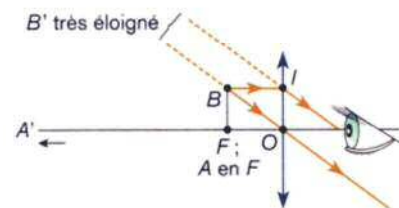


FIGURE 1.32 – Loupe

Remarque :

Le grossissement commercial G d'une loupe (figurant sur les catalogues) est donné par la relation $G = C \cdot d_0$, où C désigne la vergence de la loupe en δ et où $d_0 = 0,25$ m. Il s'exprime sans unité.

1.4.7 Relations des lentilles minces

Construisons l'image réelle d'un objet AB de hauteur o formée sur un écran par une lentille mince convergente de distance focale f . L'objet est à une distance p de la lentille, avec $p > f$ (figure 1.33).

L'image $A'B'$ de hauteur i est observée sur un écran qui est placé à une distance q de la lentille.

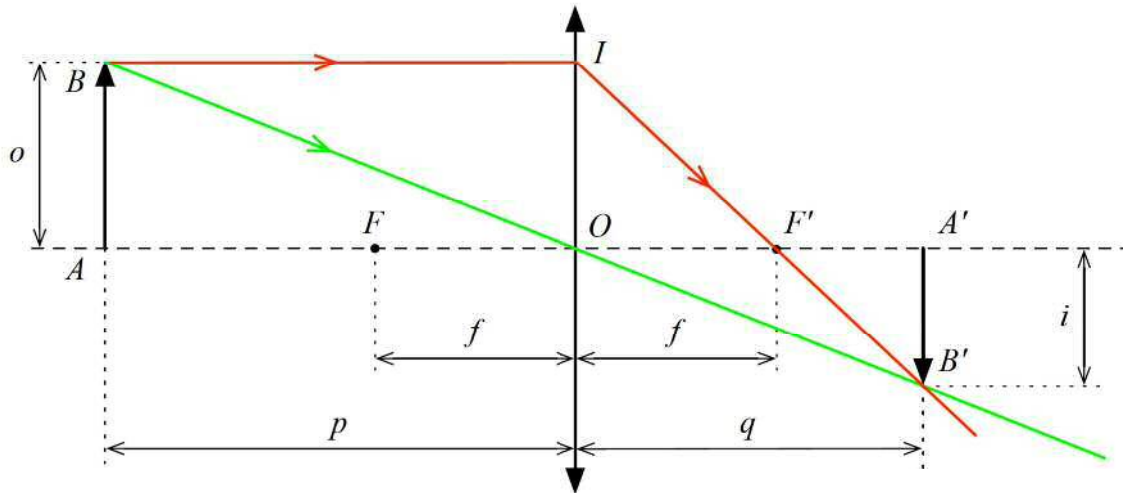


FIGURE 1.33 – Image réelle formée par une lentille convergente

Considérons d'abord les dimensions de l'objet et de l'image. La similitude des triangles OAB et $OA'B'$ permet d'écrire la *relation de grandissement* :

$$\boxed{\frac{i}{o} = \frac{q}{p}} \quad (1.1)$$

Le rapport des dimensions est appelé *grandissement* γ :

$$\gamma = \frac{i}{o}.$$

La position de l'image dépend de la position de l'objet et de la distance focale de la lentille. Les triangles $F'OI$ et $F'A'B'$ étant semblables, nous pouvons écrire :

$$\frac{i}{o} = \frac{q - f}{f}.$$

En utilisant la relation de grandissement (1.1) l'expression devient :

$$\frac{q}{p} = \frac{q}{f} - 1.$$

D'où, en divisant par q :

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{q}$$

et finalement :

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}}$$

Cette relation est appelée *relation de conjugaison de Descartes*.

Quand l'objet est placé entre le foyer et la lentille, donc $p < f$, l'image est observée à travers la lentille. On obtient de façon analogue :

$$\boxed{\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = \frac{1}{f}}$$

Activité :

L'applet « banc optique¹ » présente une simulation d'un banc optique et permet d'explorer les différentes situations et de vérifier les relations des lentilles minces.

1.4.8 Exercices

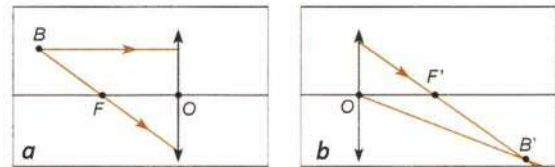
Exercice 1.17 Compléter.

Les rayons lumineux d'un faisceau parallèle à l'axe optique d'une lentille convergente émergent en passant par ... situé sur l'axe ... et appelé ... La distance de ce point au centre optique O de la lentille convergente est appelée ... L'inverse de cette distance est appelé ... et s'exprime en ...

Exercice 1.18 Une lentille mince convergente a une vergence de 5δ . Calculer sa distance focale. Schématiser à l'échelle $1/4$ cette lentille en précisant l'axe optique, le centre optique, les foyers principaux image et objet.

Exercice 1.19 Tracer :

- les faisceaux émergents ;
- les faisceaux incidents.



Exercice 1.20 Compléter à l'aide de deux qualificatifs.

- La loupe donne d'un petit objet une image ... et ... observable à travers elle.
- L'objectif d'un appareil photographique donne d'un objet (par exemple un paysage) une image ... et ... sur la pellicule.

Exercice 1.21 Vrai ou faux ?

- Les foyers F et F' sont symétriques par rapport au centre optique O lorsque les deux faces convexes n'ont pas le même rayon de courbure.
- La vergence s'exprime en mètre.
- La lentille convergente donne d'un objet situé entre son centre optique O et son foyer objet F une image observable sur un écran.

Exercice 1.22 Construire l'image $A'B'$ d'un objet AB donnée par une lentille convergente de distance focale $OF' = 3 \text{ cm}$. A est sur l'axe optique avec $AB = 1 \text{ cm}$ et $OA = 6 \text{ cm}$.

- Préciser les caractéristiques et la position de cette image par exploitation graphique.
- Retrouver OA' et $A'B'$ par le calcul.

¹<http://www.walter-fendt.de/ph14e/imageconvlens.htm>

Exercice 1.23 Une lentille mince de distance focale $OF' = 3$ cm donne d'un objet AB de hauteur $AB = 1$ cm, dont A est placé sur l'axe optique à une distance telle que $OA = 2$ cm, une image $A'B'$. Trouver OA' et $A'B'$ par le calcul. Quelles sont les caractéristiques de l'image ?

Exercice 1.24 Une lentille convergente de distance focale $OF' = 50$ mm donne d'une tour, de hauteur $AB = 50$ m, située à une distance de 250 m, une image $A'B'$ nette sur un écran.

1. Quelle est la distance lentille-écran ? Conclure.
2. Quelle est la taille de l'image de la tour sur l'écran ?

Exercice 1.25 Une loupe est assimilable à une lentille mince convergente de vergence égale à 6δ . Pour voir des caractères quatre fois plus grands que ceux du texte, à quelle distance de la feuille l'observateur doit-il placer la loupe.

- a. 4,0 cm ; b. 12,5 cm ; c. 6,0 cm ; d. 24,0 cm ?

Exercice 1.26 Un œil normal est assimilable à une lentille mince convergente d'axe optique $(x'x)$, de centre optique O , de distance focale OF' . La rétine est assimilée à un plan perpendiculaire à l'axe optique et situé à une distance invariable de 17 mm.

1. L'œil n'accomode pas. Quelle doit être la distance focale f'_1 pour que l'image d'un objet situé à l'infini se forme sur la rétine ?
2. L'œil accomode maintenant au maximum. L'observateur voit nettement des objets situés à la distance minimale distincte, c'est-à-dire à 20 cm de O . Calculer la nouvelle distance focale f'_2 .
3. On définit l'amplitude d'accommodation par la relation : $\Delta = (f'_2)^{-1} - (f'_1)^{-1}$. Calculer l'amplitude d'accommodation. Donner son unité.
4. Avec l'âge, l'œil devient presbyte, le cristallin devenant moins souple. La faculté d'accommodation diminue. La personne continue à voir nettement à l'infini sans accommoder. L'amplitude d'accommodation devient par exemple égale à $\Delta' = \Delta/4$. Calculer la nouvelle distance minimale de vision distincte.