
Thème 01 : Optique géométrique

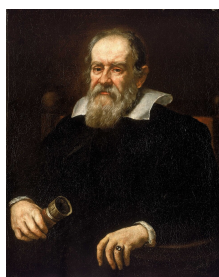
Cours



Ibn al-Haytham, dit Alhazen

965–1040

Mathématicien, physicien et astronome arabe, Ibn al-Haytham est considéré comme le fondateur de l'optique moderne. Il montre que la vision résulte de la lumière entrant dans l'œil et non de rayons émis par celui-ci. Il étudie la réflexion, la réfraction et la camera obscura, tout en développant une démarche expérimentale qui influencera durablement la science occidentale.



Galilée

1564–1642

Physicien, mathématicien et astronome italien, Galilée perfectionne la lunette astronomique, grâce à laquelle il réalise de nombreuses découvertes majeures, comme les satellites de Jupiter et les phases de Vénus. Ses travaux marquent le développement des instruments d'optique et contribuent à l'essor de la méthode expérimentale.



Willebrord Snell

1580–1626

Mathématicien et physicien néerlandais, Willebrord Snell découvre la loi reliant les angles d'incidence et de réfraction lors du passage de la lumière d'un milieu à un autre. Cette loi de Snell-Descartes constitue l'un des fondements de l'optique géométrique et permet de prévoir la trajectoire des rayons lumineux à l'interface entre deux milieux transparents.



René Descartes

1596–1650

Philosophe, mathématicien et physicien français, René Descartes contribue au développement de l'optique géométrique en publiant la loi de la réfraction découverte par Snell et en étudiant la réflexion de la lumière. Il explique également la formation des arcs-en-ciel et participe à la diffusion des méthodes mathématiques en physique.



Pierre de Fermat

1607–1665

Mathématicien français, Pierre de Fermat est l'un des fondateurs du calcul des variations. Il énonce le principe du temps minimal, selon lequel la lumière emprunte le trajet nécessitant la durée de propagation la plus courte. Ce principe permet de retrouver les lois de la réflexion et de la réfraction et constitue une approche unificatrice de l'optique géométrique.



Christiaan Huygens

1629–1695

Mathématicien, physicien et astronome néerlandais, Christiaan Huygens est l'un des fondateurs de la théorie ondulatoire de la lumière. Son principe permet d'expliquer la propagation des ondes et les lois de la réflexion et de la réfraction. Il perfectionne également les lentilles et conçoit de nombreux instruments d'observation astronomique.

Table des matières

1	Lois et limites de l'optique géométrique	4
1.1	Émission et propagation d'un rayon lumineux dans un milieu homogène	4
1.1.1	Sources lumineuses	4
1.1.2	Indice d'un milieu transparent	5
1.1.3	Approximation de l'optique géométrique	7
1.2	Réflexion et réfraction d'un rayon lumineux	7
1.2.1	Lois de Snell-Descartes	7
1.2.2	Application au miroir plan	9
1.3	Application à la fibre à saut d'indice	11
1.3.1	Cône d'acceptance	11
1.3.2	Dispersion intermodale	14
2	Lentilles minces	16
2.1	Conditions de Gauss	16
2.2	Lentilles minces convergentes	18
2.2.1	Modélisation	18
2.2.2	Image d'un objet réel par une lentille mince convergente	20
2.3	Lentilles minces divergentes	23
2.3.1	Modélisation	23
2.3.2	Image d'un objet réel par une lentille mince divergente	24
2.4	Formules de conjugaison et de grandissement transversal	24
2.4.1	Formules de Newton	24
2.4.2	Formules de Descartes	25
2.4.3	Application à l'appareil photographique	26
3	Associations de lentilles minces	30
3.1	Principe	30
3.2	Description et modélisation de l'œil	31
3.3	Corrections optiques	34

Chapitre 1 : Lois et limites de l'optique géométrique

Objectifs du programme	
Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.
Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

1.1 Émission et propagation d'un rayon lumineux dans un milieu homogène

1.1.1 Sources lumineuses

Le spectre lumineux d'émission d'un corps permet de visualiser les longueurs d'onde auxquelles ce corps émet un rayonnement. On peut s'intéresser à quatre exemples : un corps chaud, l'atome de cadmium, un laser Hélium-Néon et le Soleil (figure 1.1).

Un corps chaud émet un spectre continu, dont l'intensité varie cependant selon la longueur d'onde : c'est ce qu'on appelle la loi de Planck.

Une espèce chimique, comme le cadmium, l'hydrogène, etc. émet un spectre discret de raies, qui correspond à la désexcitation de cet atome (nous n'allons pas rentrer dans les détails pour ce cours). Le spectre d'émission d'une espèce chimique contient généralement plusieurs raies : on dit que la source lumineuse est **polychromatique**, ce qui est également le cas pour un corps chaud.

Certains dispositifs, comme les LASER, n'émettent qu'à une unique longueur d'onde : la source lumineuse est donc **monochromatique**.

Enfin, on retrouve pour de nombreux rayonnements spatiaux des spectres continus, auxquels il manque un certain nombre de raies. Ainsi, le spectre du Soleil contient plusieurs raies sombres : celles-ci correspondent à des éléments présents dans son atmosphère, qui absorbent le rayonnement du corps chaud que représente le Soleil et ne le réémettent pas forcément en direction de la Terre.

Il est à préciser qu'un objet peut également sembler émettre de la lumière par réflexion. Par exemple, le Soleil est un corps chaud émettant de la lumière par lui-même, qui se réfléchit la nuit sur la Lune que nous pouvons apercevoir. On dira alors que le Soleil est une source **primaire**, alors que la Lune est une source **secondaire**.

En optique géométrique, on utilisera le modèle de la **source ponctuelle monochromatique**, qui, comme son nom le précise :

- N'émet qu'à partir d'un seul point et non pas d'une zone étendue ;
- Ne possède qu'une raie dans son spectre lumineux, dont la valeur de l'intensité ne nous intéresse pas.

Ceci nous permettra de faire de nombreuses approximations qui restent très satisfaisantes lorsque la diffraction et la dispersion de la lumière est négligeable.

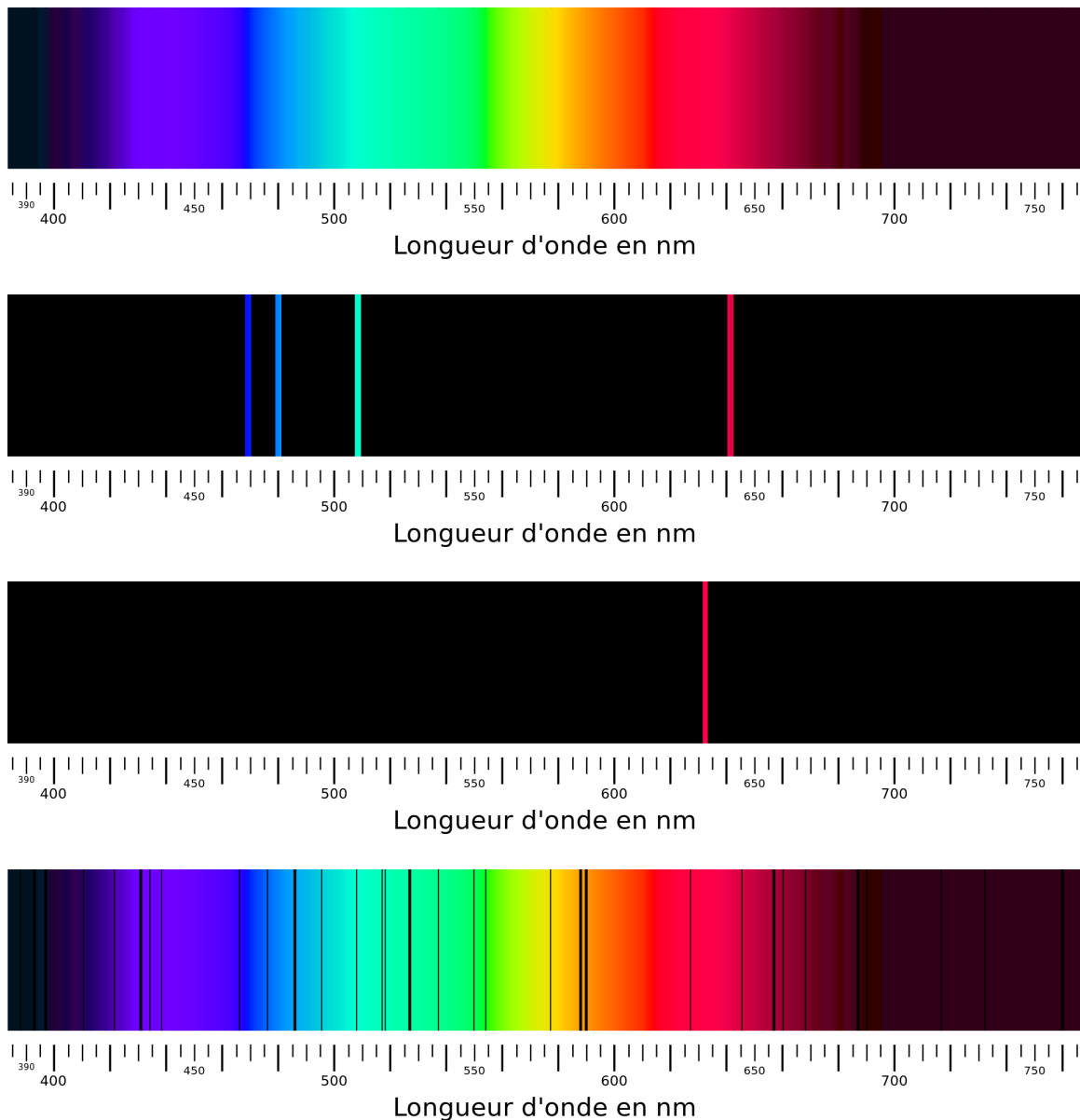


FIGURE 1.1 – Spectres lumineux d’émission d’un corps chaud (porté à 5500 K), du cadmium, d’un laser HeNe et du Soleil.

1.1.2 Indice d’un milieu transparent

Un **milieu transparent** est un milieu dans lequel un rayon lumineux peut se propager sans que son amplitude ne varie au long de sa trajectoire.

La lumière se propage à vitesse finie, qui dépend du milieu en question. Ainsi, la célérité de la lumière dans le vide, qu’il est impossible de dépasser, est égale à $c_0 = 299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, que l’on approximera souvent à $c_0 = 3,00 \times 10^8\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Indice optique d’un milieu transparent

L’**indice optique** n d’un milieu transparent est défini comme étant le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide c_0 et la vitesse de la lumière dans ce milieu c :

$$n = \frac{c_0}{c}$$

Question 1 : Quelle est l'unité de l'indice optique ? Montrer qu'il est toujours supérieur ou égal à 1.

Question 2 : On donne la vitesse de la lumière dans l'air $c_{\text{air}} = 299\,704,6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; dans l'eau $c_{\text{eau}} = 224,9 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; dans le verre $c_{\text{verre}} = 197 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. En déduire les indices optiques de chacun de ces milieux.

Considérons à présent une source lumineuse ponctuelle monochromatique, dont le champ électromagnétique vibre à une fréquence f_0 : la pulsation dépend uniquement de l'émetteur. On rappelle par ailleurs qu'il existe un lien entre la fréquence et la longueur d'onde dans un milieu : $c = \lambda f$.

Question 3 : Donner alors le lien entre la longueur d'onde λ du rayonnement dans un milieu d'indice n et sa longueur d'onde λ_0 dans le vide.

Longueur d'onde dans le vide et dans un milieu transparent

La longueur d'onde λ d'un rayonnement dans un milieu d'indice n est liée à sa longueur d'onde λ_0 dans le vide par la formule :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Ainsi, l'équivalence fréquence-longueur d'onde établie pour le spectre des ondes électromagnétiques n'est valable que dans le vide. On retiendra donc que la couleur d'un rayonnement dépend plutôt de sa fréquence que de sa longueur d'onde : un rayonnement jaune-orangée de longueur d'onde $\lambda_0 = 570 \text{ nm}$ correspondra à la longueur d'onde $\lambda = 380 \text{ nm}$ dans le verre ; la couleur restera cependant la même, car la fréquence f_0 ne varie pas entre les deux milieux.

☛ **Remarque** : L'indice optique d'un matériau transparent dépend en réalité (faiblement, mais quand même) de la longueur d'onde du rayonnement le traversant. C'est la **loi de Cauchy** : $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$

Où les constantes $A, B, C, \dots$ sont des constantes propres au matériau. C'est cette dépendance de la longueur d'onde qui permet d'expliquer, entre autres, la formation d'arcs-en-ciel. En effet, après la pluie, une multitude de gouttelettes d'eau reste en suspension dans l'air. Chaque radiation de la lumière émise par le Soleil sera déviée différemment d'une autre radiation en passant par ces gouttelettes, donnant ainsi ce gradient de couleurs caractéristique (voir TD).

1.1.3 Approximation de l'optique géométrique

L'optique géométrique modélise la lumière comme un ensemble de rayons lumineux : chaque rayon est une courbe décrite par la lumière pour aller d'un point à un autre.

Les rayons lumineux n'interfèrent pas entre eux dans cette approximation (qui est quasiment tout le temps vérifiée en pratique) : ainsi, deux rayons lumineux sont indépendants.

On suppose également dans cette approximation que les rayons sont rectilignes dans un milieu d'indice uniforme : on néglige tout effet de diffraction, les objets étant suffisamment larges par rapport à la longueur d'onde des rayonnements.

Les limites de ce modèle interviennent donc quand la diffraction et les interférences ne sont pas négligeables, ce qui demande des considérations techniques que nous n'aborderons pas dans ce cours !

1.2 Réflexion et réfraction d'un rayon lumineux

1.2.1 Lois de Snell-Descartes

Dans un milieu transparent et homogène, la lumière se propage de manière rectiligne. À l'interface entre deux milieux, une onde lumineuse incidente ne se propagera plus dans la même direction (voir figure 1.2) :

- Une partie de l'onde sera renvoyée vers le milieu d'origine : c'est le **rayon réfléchi** ;
- Une partie de l'onde peut traverser l'interface et pénétrer dans le deuxième milieu : c'est le **rayon réfracté**.

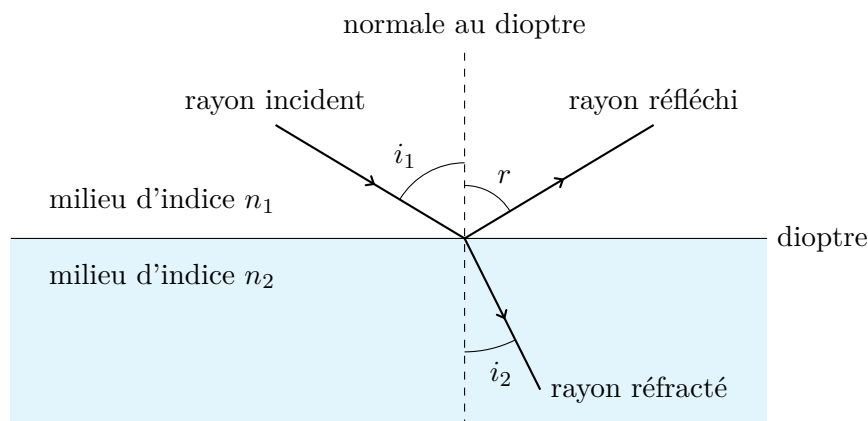


FIGURE 1.2 – Représentation des phénomènes de réflexion et de réfraction sur un dioptre.

Lois de Snell-Descartes

Première loi de Snell-Descartes : Les rayons réfléchi et réfracté sont contenus dans le plan d'incidence, défini comme étant le plan contenant le rayon incident et la normale au dioptre.

Deuxième loi de Snell-Descartes (loi de la réflexion) : L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :

$$r = i_1$$

Troisième loi de Snell-Descartes (loi de la réfraction) : Le sinus de l'angle de réfraction est proportionnel au sinus de l'angle d'incidence :

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

Ces lois retranscrivent quelques propriétés physiques de la propagation de la lumière, dont la loi de retour inverse de celle-ci ainsi que le fait que la lumière se propagera d'un point à l'autre en une durée aussi faible que possible (voir TD).

Question 4 : Exprimer littéralement l'angle de réfraction i_2 en fonction de i_1, n_1, n_2 . Quelle condition doit vérifier $\frac{n_1}{n_2} \sin i_1$ pour que i_2 soit défini ? En déduire la valeur limite i_{lim} de i_1 pour laquelle le rayon réfracté n'existe plus, en supposant que $n_2 < n_1$.

Réflexion totale

Si l'indice n_2 du deuxième milieu est plus petit que l'indice n_1 du premier milieu ^a, le rayon réfracté n'existe que lorsque l'angle d'incidence i_1 est inférieur à :

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

Si i_1 est supérieur à i_{lim} , il n'y a pas de réfraction : c'est la **réflexion totale**.

^a. On dit que le milieu 1 est plus **réfringent** que le milieu 2.

1.2.2 Application au miroir plan

Le miroir plan est certainement l'exemple le plus simple de système optique. Celui-ci ne vérifie que les deux premières lois de Snell-Descartes : on considère que le rayon réfracté n'existe pas ¹.

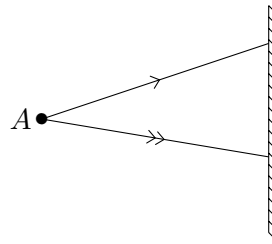


FIGURE 1.3 – Réflexion de rayons lumineux issus d'un point source A sur un miroir plan.

Question 5 : Tracer sur la figure 1.3 les rayons réfléchis par le miroir des deux rayons provenant de A .

On observe sur la figure 1.3 que l'on a $r = i$ et $r' = i'$ pour tout point du miroir. Cette construction est cependant assez complexe, puisqu'elle demande à avoir une équerre pour trouver la normale, et un rapporteur pour faire apparaître les angles r et r' .

Une astuce est de voir, puisque ces angles sont égaux, que les rayons ont « l'air » de provenir d'un point A' , symétrique de A par rapport au miroir (voir figure 1.4). On trace alors les « faux » rayons en pointillés, pour montrer qu'ils n'existent pas réellement.

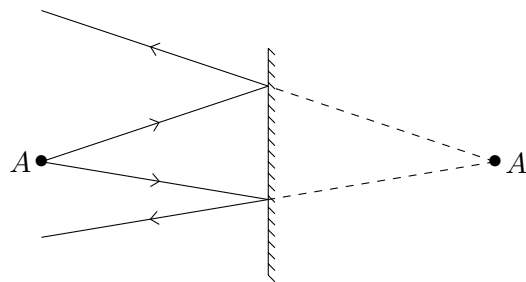


FIGURE 1.4 – Image virtuelle A' de l'objet réel A .

Image virtuelle d'un objet réel par un miroir plan

On appelle **objet réel** un point préexistant à tout système optique. L'**image** A' du point A par un miroir plan est le symétrique de ce point par rapport au miroir (voir figure 1.4). On dit que A' est une image **virtuelle**, car elle n'existe pas en réalité. De même, les rayons émis par A' pour aider à la construction seront appelés des rayons **virtuels**.

Il est intéressant de noter que nous avons une très bonne intuition de ce qu'est une image virtuelle : quand nous regardons notre reflet dans le miroir, nous voyons en fait l'image (virtuelle) de notre corps (réel) par ce miroir. Et, en effet, notre reflet semble se situer à la même distance du miroir que nous-même de celui-ci.

1. En réalité, son amplitude est extrêmement faible par rapport à celle du rayon réfléchi.

Supposons à présent qu'un système optique (comme une lentille) fasse converger tous ses rayons vers un point A , malencontreusement (ou bien intentionnellement) caché par un miroir plan (voir figure 1.5).

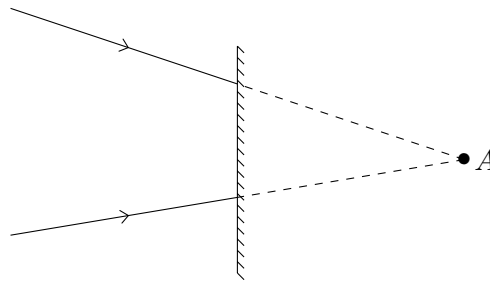


FIGURE 1.5 – Image réelle A' de l'objet virtuel A .

Question 6 : À l'aide de la loi de la réflexion, déterminer le point d'intersection A' des rayons réels, après réflexion par le miroir.

Image réelle d'un objet virtuel par un miroir plan

On appelle **objet virtuel** un point défini par la convergence de prolongement de rayons : il n'existe que par l'existence d'un système optique. L'**image** A' du point A par un miroir plan est le symétrique de ce point par rapport au miroir (voir figure 1.5). On dit que A' est une image **réelle**, car les rayons convergent bien en réalité vers ce point.

Stigmatisme et points conjugués

Soit un objet ponctuel A et un système optique ^a (Σ) . On dit que (Σ) est **stigmatique** si l'image A' de A par (Σ) est également ponctuelle. On dit alors que les points A et A' sont **conjugués**.

Un système optique est **rigoureusement stigmatique** si le stigmatisme est vérifié pour tout objet ponctuel A de l'espace.

^a. Un miroir (plan ou non), une lentille (convergente ou divergente), ...

Question 7 : Un miroir plan vérifie-t-il la propriété de stigmatisme ? De stigmatisme rigoureux ?

1.3 Application à la fibre à saut d'indice

Une **fibre optique** est un dispositif exploitant les propriétés optiques d'un matériau afin de propager un signal lumineux entre deux points sans perte d'information. Elle est constituée du **cœur**, par lequel la lumière passe, de la **gaine**, assez réfringente pour empêcher tout phénomène de réfraction, et d'une **protection** empêchant toute attaque extérieure (voir figure 1.6).

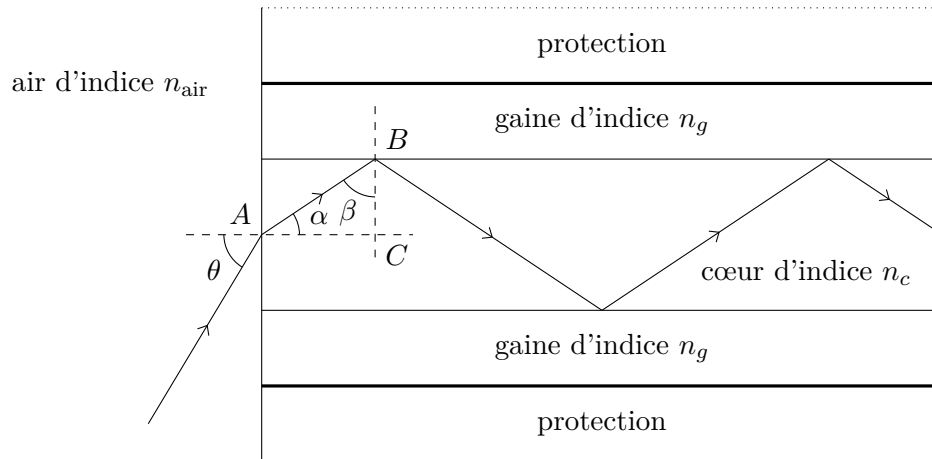


FIGURE 1.6 – Vue en coupe d'une fibre à saut d'indice.

1.3.1 Cône d'acceptance

Intéressons-nous à la réflexion ayant lieu au point B . On suppose ici qu'une partie du rayon incident se fait bien réfractée vers la gaine (voir figure 1.7).

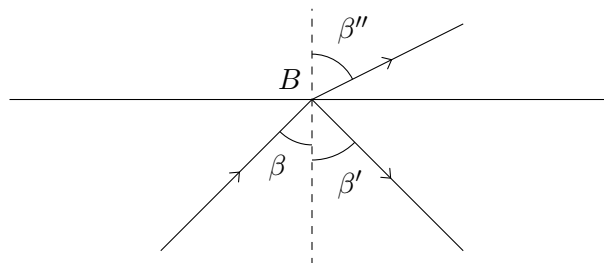


FIGURE 1.7 – Réflexion et réfraction au point B .

Question 8 : Quel lien a-t-on entre β' et β ? Justifier la réponse.

Question 9 : Quelle condition doit-on imposer entre n_c et n_g , indices du cœur et de la gaine, pour que l'angle d'incidence soit plus faible que l'angle de réfraction ? Exprimer $\sin \beta''$ en fonction de n_c , n_g et $\sin \beta$.

Question 10 : Quelle est la valeur maximale pouvant être atteinte par $\sin \beta''$? À quelle valeur de β'' correspond ce cas ?

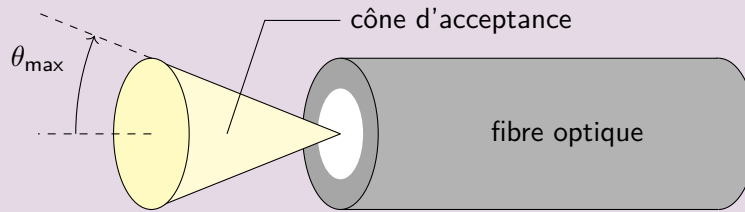
Question 11 : On note β_{lim} la valeur limite de β telle que $\sin \beta''$ est maximal. Montrer que $\beta_{\text{lim}} = \arcsin \frac{n_g}{n_c}$.

Revenons à présent sur le schéma de la figure 1.6. On se place dans le cas limite où $\beta = \beta_{\text{lim}} = \arcsin \frac{n_g}{n_c}$.

Question 12 : Déterminer l'expression de α_{lim} en fonction de n_c et n_g , puis celle de $\sin(\alpha_{\text{lim}})$. On admettra que $\sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \cos(x)$ et que $\cos(\arcsin x) = \sqrt{1 - x^2}$.

Cône d'acceptance et ouverture numérique

On appelle **cône d'acceptance** d'une fibre optique le cône dans lequel une source lumineuse ponctuelle peut émettre des rayons lumineux guidés par réflexion totale au sein de la fibre.



Si l'on note $\theta_{\max}$ le demi-angle au sommet du cône d'acceptance, l'**ouverture numérique** $O.N.$ est alors définie par $n_{\text{ext}} \sin(\theta_{\max})$ avec n_{ext} l'indice optique du milieu extérieur.

Question 13 : En prenant un indice de l'air égal à 1, montrer que l'ouverture numérique de la fibre est égale à $\sqrt{n_c^2 - n_g^2}$.

Question 14 : On a $n_c = 1,456$ et $n_g = 1,410$. Calculer l'ouverture numérique de la fibre, et en déduire la valeur maximale $\theta_{\max}$ pour l'angle d'incidence dans la fibre.

1.3.2 Dispersion intermodale

On suppose que le cœur est un cylindre de rayon $r_c = 5 \mu\text{m}$, et que la longueur L de la fibre optique est de 50 km. On note $d(\theta)$ la distance parcourue par la lumière du point A jusqu'à la sortie de la fibre optique : c'est une fonction de l'angle θ .

Question 15 : Pour quelle valeur de θ la distance d est-elle minimale ? Exprimer cette distance $d_{\min}$ en fonction des données de l'énoncé, puis la calculer.

On se place pour le reste des questions dans le cas le plus défavorable, c'est à dire lorsque $\theta = \theta_{\max}$.

Question 16 : Que représente le nombre $N = \frac{L}{AC}$? Exprimer la distance maximale $d_{\max}$ parcourue par la lumière en fonction de $AB_{\lim}$ et de N .

Question 17 : Établir une relation entre AC et AB . En déduire l'expression de $d_{\max}$ en fonction de L et de $\beta_{\lim}$, puis en fonction de L , n_c et n_g . Calculer $d_{\max}$.

Dispersion intermodale d'une fibre optique

À chaque angle θ d'incidence de la fibre optique correspond un **mode**.

La **dispersion intermodale** Δt correspond à la durée entre la sortie du rayon le plus rapide (celui en incidence normale $\theta = 0$) et la sortie du rayon le plus lent (celui en incidence $\theta_{\max}$). Elle s'exprime donc en seconde s.

Question 18 : Calculer la vitesse v_c de l'onde lumineuse dans le cœur, puis la durée maximale $T_{\max}$ prise par celle-ci pour se propager d'un bout à l'autre de la fibre.

Question 19 : Dédurre des questions précédentes l'expression puis la valeur de la dispersion intermodale de la fibre.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Donner un encadrement des longueurs d'onde du rayonnement visible dans le vide. À quelles couleurs correspondent les longueurs d'onde suivantes dans le vide : 450 nm, 550 nm, 650 nm ?
- ☐ Rappeler la définition de l'indice optique. Déterminer la célérité de la lumière dans l'eau, sachant que l'indice optique de l'eau est $n_{\text{eau}} = 1,33$.
- ☐ En quoi consiste le modèle de l'optique géométrique ? Quelles sont ses limites ?
- ☐ Rappeler les lois de Snell-Descartes en les accompagnant d'un schéma détaillé.
- ☐ Établir la condition de réflexion totale.
- ☐ Soit un objet réel A situé face à un miroir plan. Déterminer son image A' , et préciser si elle est réelle ou virtuelle en le justifiant. Peut-on dire que le miroir plan est rigoureusement stigmatique ?
- ☐  Définir, exprimer et calculer le demi-angle au sommet du cône d'acceptance d'une fibre optique d'indice optique $n_c = 1,456$ pour son cœur et $n_g = 1,410$ pour sa gaine.
- ☐  On rappelle que le demi-angle au sommet du cône d'acceptance d'une fibre optique vérifie $\sin(\theta_{\max}) = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$, avec $n_c = 1,456$ et $n_g = 1,410$ les indices optiques respectifs du cœur et de la gaine. Définir, exprimer et calculer la dispersion intermodale de la fibre, sa longueur totale étant $L = 50$ km.

Chapitre 2 : Lentilles minces

Objectifs du programme	
Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences. Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces dans l'approximation de Gauss.	Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.

2.1 Conditions de Gauss

Une **lentille optique** est un système optique transparent, très souvent en verre, qui ont pour but de faire converger ou diverger la lumière (voir figure 2.1). Très souvent (et toujours dans ce cours), les lentilles possèdent une symétrie de révolution autour d'un axe : on parle de **lentille sphérique**, et l'axe en question est nommé **axe optique**.

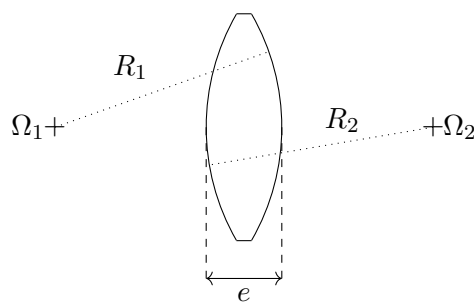


FIGURE 2.1 – Construction d'une lentille optique sphérique. Ici, la lentille est convergente, et on a $R_1 = R_2 = 3e$.

On appelle **lentille mince** une lentille optique dont les rayons de courbure R_1 et R_2 de chacune des faces est très grand par rapport à l'épaisseur e de la lentille : $R_1 \gg e$ et $R_2 \gg e$.

Afin de voir l'intérêt des lentilles minces par rapport aux lentilles épaisses, traçons différents rayons passant par une lentille mince et par une lentille épaisse (figure 2.2). On peut déterminer la trajectoire des différents rayons à l'aide de la loi de la réfraction, connaissant l'indice optique de l'air et celui du verre.

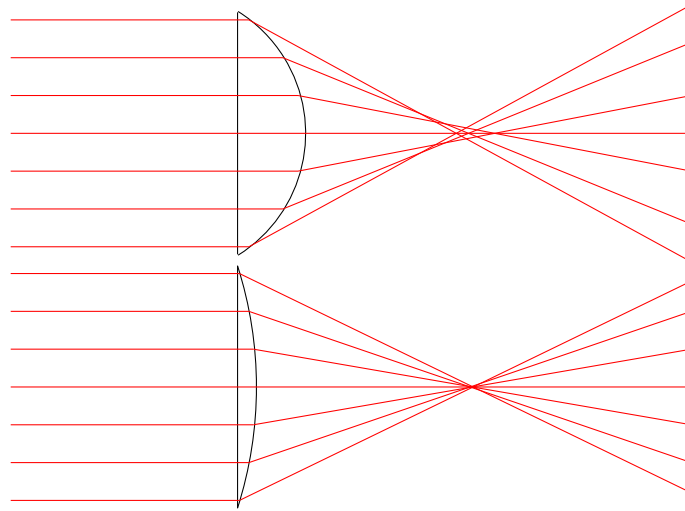


FIGURE 2.2 – Tracé des rayons lumineux passant par des lentilles convergentes. Haut : lentille épaisse, $R_1 \approx 2e$ et $R_2 = \infty$; bas : lentille mince, $R_1 \approx 20e$ et $R_2 = \infty$.

On s'aperçoit donc ici que les lentilles épaisses font converger les rayons vers une zone, mais pas en un point précis. Les lentilles minces, en revanche, font converger les rayons vers une zone tellement restreinte qu'on peut la confondre avec un point unique.

Cependant, la condition de lentille mince ne suffit pas. Effectivement, prenons comme exemple la figure 2.3, où des rayons sont très inclinés par rapport à l'axe optique.

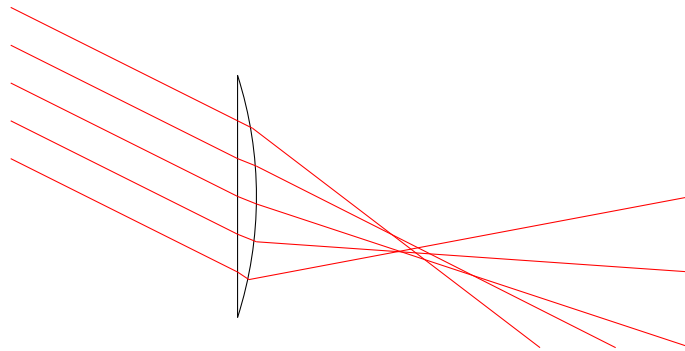


FIGURE 2.3 – Tracé de rayons lumineux très inclinés passant par une lentille mince convergente.

Conditions de Gauss et stigmatisme approché

Soit (Σ) un système optique, composé de lentilles, miroirs, ..., et A un point source objet. L'image du point A par le système (Σ) n'est généralement pas un point, mais plutôt une tache étendue.

Pour que l'image de A par (Σ) ne soit qu'un point A' , il faut se placer dans les **conditions de Gauss** :

- Les rayons incidents issus de A doivent former des angles faibles par rapport à l'axe optique ;
- Le point A doit être proche de l'axe optique.

De tels rayons sont appelés **rayons paraxiaux**.

Si l'on se place dans les conditions de Gauss, on a alors affaire à un **stigmatisme approché** : l'image de A par (Σ) est un point A' (et non pas une tache étendue). On notera que seul le miroir plan forme un point image à partir d'un point objet : on parle ici de **stigmatisme rigoureux**.

☛ *Remarque* : Les conditions de Gauss nous permettent de faire de nombreuses approximations mathématiques. Si α est l'angle que forme un rayon paraxial avec l'axe optique, on aura notamment $\sin \alpha \approx \alpha$, $\cos \alpha \approx 1$ et $\tan \alpha \approx \alpha$ si α est exprimé en radians. En pratique, l'approximation est valable pour $\alpha \leq 10^\circ$.

Question 1 : Supposons qu'un système optique fasse converger les rayons sur une tache étendue dont l'ordre de grandeur du rayon est $\delta \approx 0,5 \text{ mm}$. On place au niveau de la tache un photodétecteur comportant $N = 25\,000$ photodiodes sur une surface $S = 2 \text{ cm}^2$. Peut-on parler de stigmatisme approché ici ?

2.2 Lentilles minces convergentes

2.2.1 Modélisation

Une lentille convergente se modélise, sur un schéma optique, par une double flèche qui rappelle la forme générique d'une lentille convergente (voir figure 2.4).

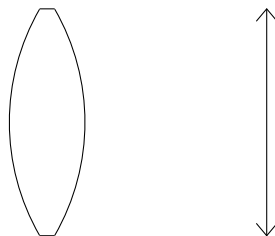
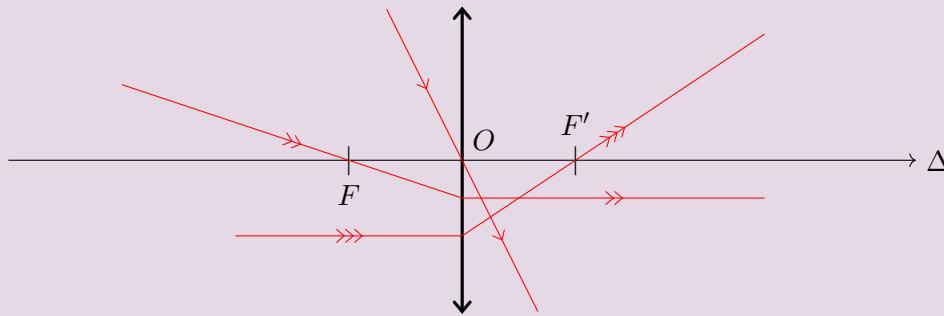


FIGURE 2.4 – Lentille mince convergente (gauche) et modélisation d'une lentille mince convergente (droite).

Points et rayons particuliers d'une lentille mince convergente

On associe à une lentille mince convergente trois points particuliers, dont les rayons passant par eux possèdent des propriétés :

- Le **centre optique** O représente le centre de la lentille, par lequel passe l'axe optique (Δ). Un rayon passant par le centre optique n'est pas dévié.
- Le **foyer (principal) objet** F , qui se situe à gauche d'une lentille convergente et sur son axe optique. Un rayon incident passant par F ressort de la lentille parallèle à l'axe optique.
- Le **foyer (principal) image** F' , qui se situe à droite d'une lentille convergente et sur son axe optique. Un rayon incident parallèle à l'axe optique ressort de la lentille en passant par F' .



On remarquera que la distance entre les points F et O est la même qu'entre les points O et F' .

☛ **Remarque :** En optique géométrique, le sens des rayons a une signification, tout comme le sens des objets et des images que l'on obtient par un système optique. Par exemple, si l'image formée par un système optique inverse le haut et le bas par rapport à l'objet initial, il est intéressant de le faire remarquer.

On utilise donc, en optique, des **mesures algébriques** pour signifier dans quel sens la mesure d'un objet ou d'une image est faite. Par exemple, la distance OF' est bien égale à la distance OF , mais on n'a pas $\overline{OF'} = \overline{OF}$, où $\overline{OF'}$ est la mesure algébrique de OF' . En revanche, on a bien $\overline{FO} = \overline{OF'}$.

Convention des mesures algébriques

La convention la plus courante est de compter positivement les distances *de la gauche vers la droite* et *du bas vers le haut*. Ainsi, $\overline{OF'} > 0$ et $\overline{OF} < 0$.

Distances focales

On note $f' = \overline{OF'}$ la **distance focale image** et $f = \overline{OF}$ la **distance focale objet** de la lentille. On a donc $f' = -f$, avec $f' > 0$ pour une lentille convergente.

2.2.2 Image d'un objet réel par une lentille mince convergente

On suppose qu'un objet AB réel est situé en amont du foyer objet F d'une lentille mince convergente (figure 2.5).

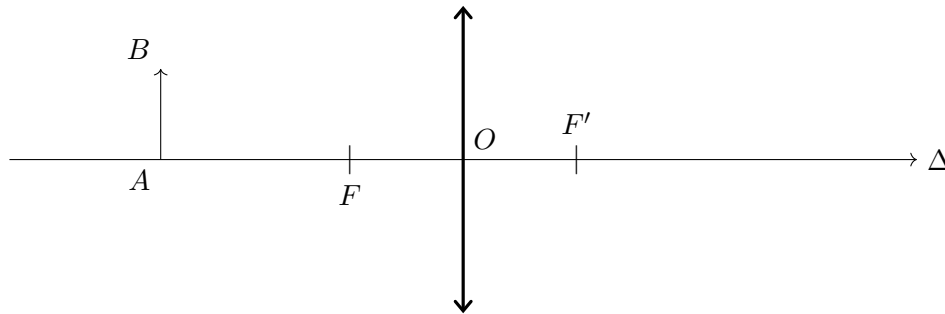


FIGURE 2.5 – Image d'un objet situé en amont du foyer objet d'une lentille mince convergente.

Question 2 : Tracer les trois rayons particuliers issus de B et passant par la lentille. En déduire la position de B' , image de B par la lentille.

Aplanétisme

Un système optique est généralement construit pour représenter la réalité, toutes proportions gardées. Un moyen d'assurer cette conservation des proportions est l'**aplanétisme** : un système optique (Σ) est aplanétique si l'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe optique par Σ est également perpendiculaire à l'axe optique. Les lentilles minces possèdent cette propriété.

Question 3 : Déduire du point sur l'aplanétisme la position de A' , image de A par la lentille. Dessiner enfin l'image $A'B'$ de l'objet AB par la lentille.

Question 4 : Que dire de l'image $A'B'$ par rapport à l'objet AB ? Est-elle réelle ou virtuelle ?

Grandissement transversal

On définit le **grandissement (transversal)** γ d'un objet AB par rapport à un système optique comme étant égal au rapport de la mesure algébrique de l'image $A'B'$ par celle de l'objet AB :

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

Le signe de γ révèle si l'image est **droite** ($\gamma > 0$) ou **renversée** ($\gamma < 0$) par rapport à l'objet.

La valeur absolue de γ révèle si l'image est plus **rétrécie** ($|\gamma| < 1$) ou **agrandie** ($|\gamma| > 1$) que l'objet.

L'objet AB est à présent situé entre le foyer objet F et le centre optique O (voir figure 2.6).

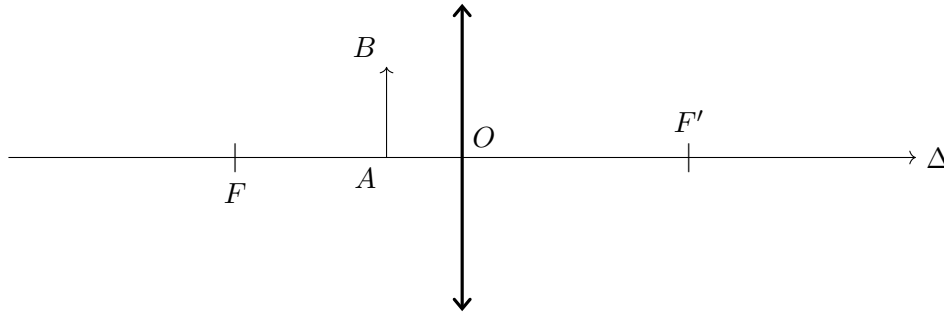


FIGURE 2.6 – Image d'un objet situé entre le foyer objet et le centre optique d'une lentille mince convergente.

Question 5 : Tracer sur la figure 2.6 la course du rayon issu de B passant par O ainsi que celle du rayon issu de B arrivant parallèlement à l'axe optique sur la lentille.

Question 6 : Les rayons ne convergent pas en aval de la lentille, mais en amont de celle-ci. Déterminer, à l'aide de rayons virtuels, le point d'intersection B' (et donc l'image B') de B par la lentille. Vérifier que le rayon issu de B passant *virtuellement* par F ressort bien de la lentille en passant virtuellement par B' .

Question 7 : En déduire la position de l'image $A'B'$. Quels commentaires peut-on faire ?

Cette image $A'B'$ virtuelle agrandie est caractéristique d'un objet placé entre le foyer objet et le centre optique d'une lentille convergente. Il faut l'interpréter en comprenant ce que nous avons tracé : les rayons réels montrent que l'image diverge en aval de la lentille ; en d'autres termes, si l'on place un écran en aval de la lentille, on ne verra jamais d'image nette.

En revanche, si l'on place notre œil (qui est un système optique permettant de refaire converger les rayons, comme nous le verrons plus tard) en aval de la lentille, nous verrons l'objet AB agrandi et de l'autre côté de celle-ci. Autrement dit, nous avons dessiné ici le principe d'un *loupe* !

Prenons à présent un objet A_∞ situé à l'infini (c'est-à-dire à une distance très grande devant la distance focale (image) de la lentille convergente). Ainsi, tous les rayons issus de A_∞ incidents à la lentille sont quasiment parallèles (voir figure 2.7).

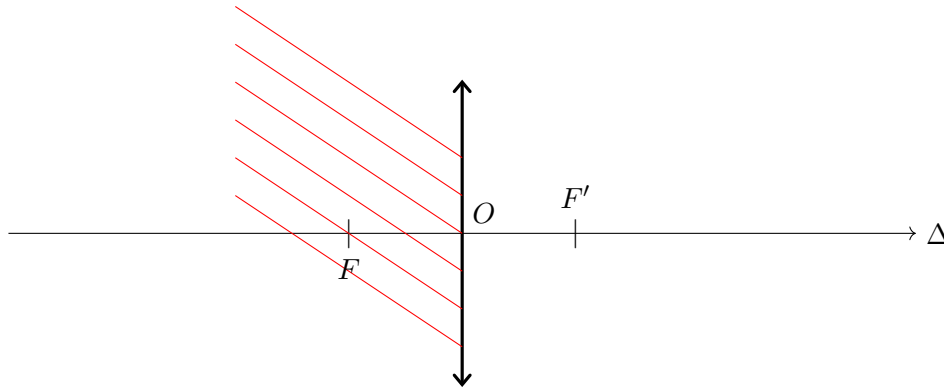


FIGURE 2.7 – Image d'un objet à l'infini par une lentille mince convergente.

Question 8 : Dessiner sur la figure 2.7 le trajet de deux des rayons incidents après la lentille. À l'aide de l'hypothèse de stigmatisme approché, en déduire la position du point image A' de A par la lentille.

Plans focaux et foyers secondaires

Le plan passant par F' (respectivement F) et perpendiculaire à l'axe optique est le **plan focal image** Π' (respectivement **plan focal objet** Π).

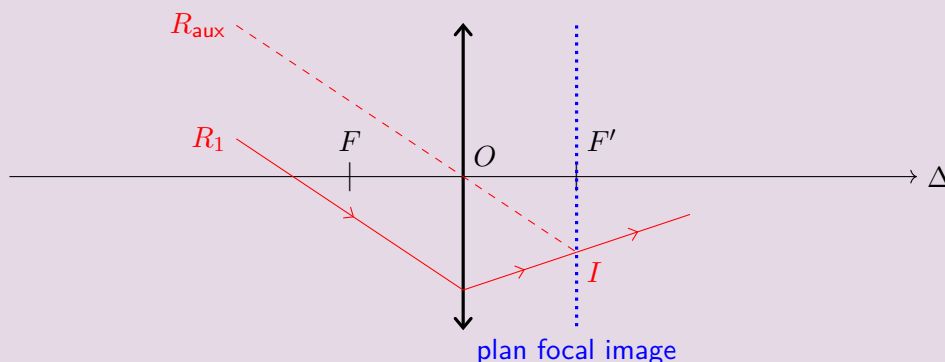
Tout rayon provenant d'un objet placé à l'infini convergera, après passage par une lentille convergente, dans son plan focal image. Par la loi de retour inverse de la lumière, on peut en déduire que si un objet est placé dans le plan focal objet d'une lentille convergente alors son image sera renvoyée à l'infini après passage par celle-ci.

Tout point appartenant à Π' (respectivement Π) est ainsi appelé **foyer image secondaire** (respectivement **foyer objet secondaire**).

Tracé de rayons quelconques

La construction de la figure 2.7 nous permet de comprendre comment tracer la trajectoire d'un rayon lumineux quelconque R_1 arrivant sur une lentille convergente.

En effet, il suffit de tracer un rayon **auxiliaire** R_{aux} (n'existant pas en réalité) parallèle au premier rayon et passant par O sans être dévié. R_1 continuera alors sa route en passant par I , point d'intersection entre R_{aux} et le plan focal image.



2.3 Lentilles minces divergentes

2.3.1 Modélisation

L'étude des lentilles minces divergentes se rapprochent, dans l'idée, des considérations que nous avons précédemment établies pour les lentilles convergentes. Nous allons donc surtout nous attarder sur les différences entre celles-ci.

Une lentille divergente se modélise, sur un schéma optique, par une double flèche qui rappelle la forme générique d'une lentille divergente (voir figure 2.8).

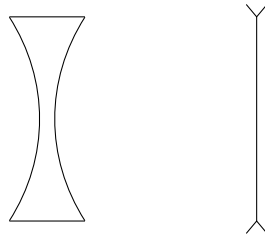
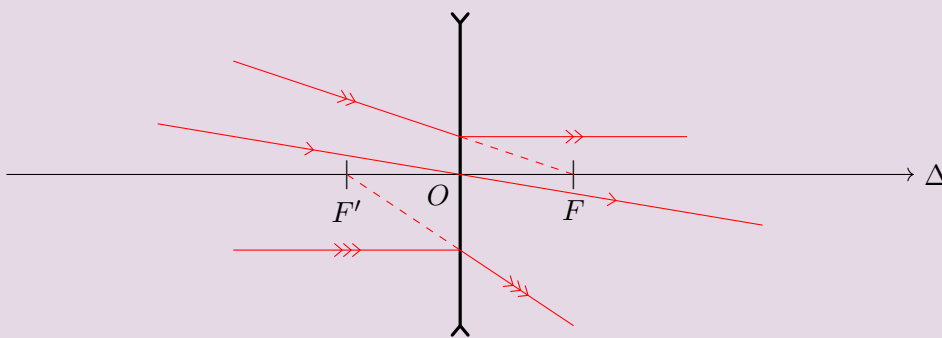


FIGURE 2.8 – Lentille mince divergente (gauche) et modélisation d'une lentille mince divergente (droite).

Points et rayons particuliers et distances focales d'une lentille mince divergente

On associe à une lentille mince divergente trois points particuliers, dont les rayons passant par eux possèdent des propriétés :

- Le **centre optique** O représente le centre de la lentille, par lequel passe l'axe optique (Δ). Un rayon passant par le centre optique n'est pas dévié.
- Le **foyer (principal) objet** F , qui se situe à droite d'une lentille divergente et sur son axe optique. Un rayon incident semblant passer par F ressort de la lentille parallèle à l'axe optique.
- Le **foyer (principal) image** F' , qui se situe à gauche d'une lentille divergente et sur son axe optique. Un rayon incident parallèle à l'axe optique ressort de la lentille en semblant provenir de F' .



Comme pour la lentille convergente, la distance entre les points F et O est la même qu'entre les points O et F' .

Les définitions de la lentille mince convergente sont conservées pour la lentille mince divergente : on note $f' = \overline{OF'}$ la **distance focale image** et $f = \overline{OF}$ la **distance focale objet** de la lentille. On a donc $f' = -f$, avec cependant $f' < 0$ pour une lentille divergente.

On notera que la propriété d'aplanétisme ainsi que les caractéristiques des plans focaux restent inchangés. Entre autres, tout foyer image secondaire est l'image d'un point objet situé à l'infini, et tout foyer objet secondaire a son image à l'infini.

2.3.2 Image d'un objet réel par une lentille mince divergente

On suppose qu'un objet AB réel est situé en amont du foyer image F' d'une lentille mince divergente (figure 2.9).

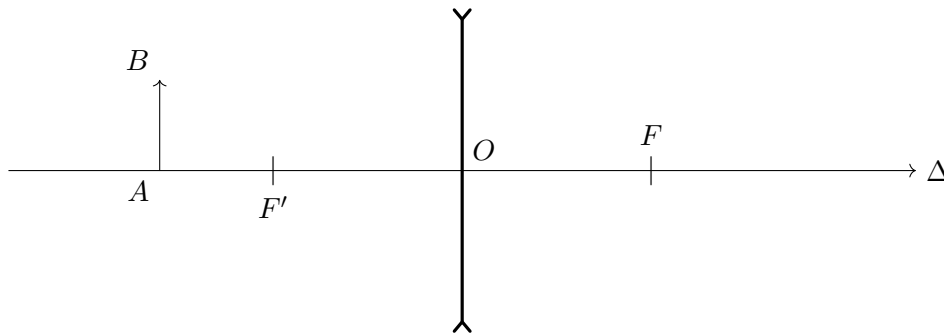


FIGURE 2.9 – Image d'un objet situé en amont du foyer image d'une lentille mince divergente.

Question 9 : Tracer les trois rayons particuliers issus de B et passant par la lentille. En déduire, avec l'hypothèse d'aplanétisme, la position de l'image $A'B'$. Quels commentaires peut-on faire sur l'image ? Calculer le grandissement transversal.



2.4 Formules de conjugaison et de grandissement transversal

Une formule (ou relation) de conjugaison est une formule reliant, pour un système optique stigmatique, la position d'un point objet à celle du point image correspondant. Ces formules reposent sur des considérations de triangles semblables : les démonstrations ne sont pas à savoir, mais plutôt à comprendre pour les réutiliser intelligemment plus tard.

2.4.1 Formules de Newton

Prenons l'exemple d'un objet réel AB , d'image $A'B'$ par lentille mince convergente (figure 2.10).

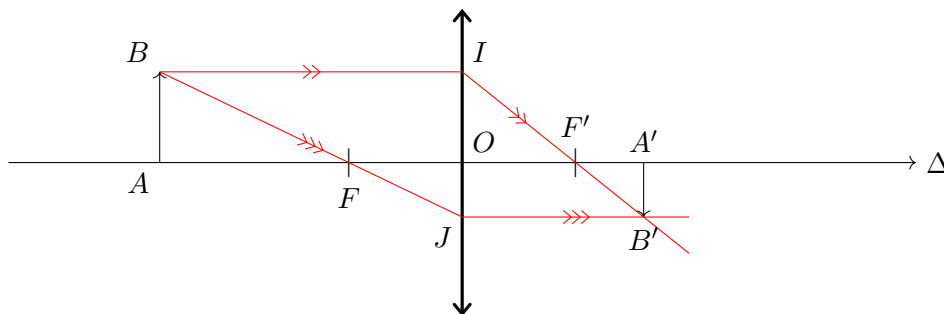


FIGURE 2.10 – Image d'un objet par une lentille mince convergente.

Question 10 : Que peut-on dire des angles $\widehat{B'F'A'}$ et $\widehat{OF'I}$? En déduire que $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$.

Question 11 : De même, à l'aide des triangles BAF et OFJ , montrer que $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}}$.

Question 12 : En déduire que le produit $\overline{FA} \times \overline{F'A'}$ est égal à une constante indépendante des positions de A et de A' .

Formules de conjugaison et de grandissement de Newton

La **formule de conjugaison de Newton** lie les positions d'un objet A sur l'axe optique d'une lentille mince (convergente ou divergente) et de son image A' aux foyers de la lentille :

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = -f'^2$$

Les **formules de grandissement de Newton** lient le grandissement γ d'un objet par une lentille mince (convergente ou divergente) aux foyers de la lentille :

$$\gamma = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$$

2.4.2 Formules de Descartes

Reprenons le schéma de la figure 2.10 mais en ne prenant en compte que le rayon passant par l'origine (figure 2.11).

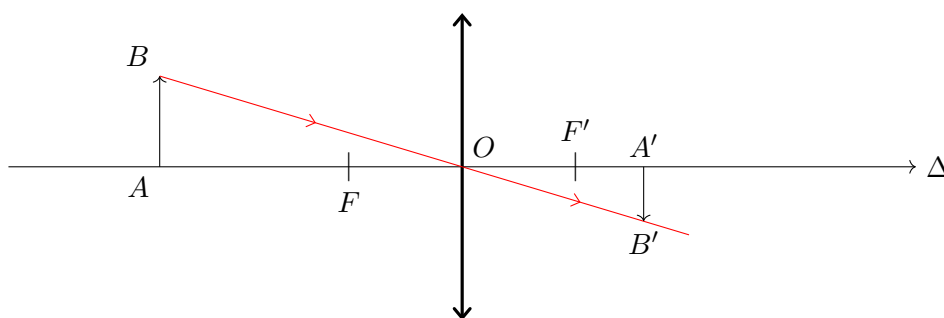


FIGURE 2.11 – Image d'un objet par une lentille mince convergente.

Question 13 : Montrer que $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$. En observant que $\overline{F'A'} = \overline{F'O} + \overline{OA'}$ puis en utilisant une formule de grandissement de Newton, en déduire alors que $\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = 1 - \frac{\overline{OA'}}{f'}$.

Formules de conjugaison et de grandissement de Descartes

La **formule de conjugaison de Descartes** lie les positions d'un objet A sur l'axe optique d'une lentille mince (convergente ou divergente) et de son image A' au centre optique de la lentille :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

La **formule de grandissement de Descartes** lie le grandissement γ d'un objet par une lentille mince (convergente ou divergente) au centre optique de la lentille :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

2.4.3 Application à l'appareil photographique

Un appareil photographique peut être réduit à ses plus simples éléments : son objectif, assimilable à une lentille mince¹ convergente, et son capteur en aval de l'objectif, modélisable par un écran (voir figure 2.12).

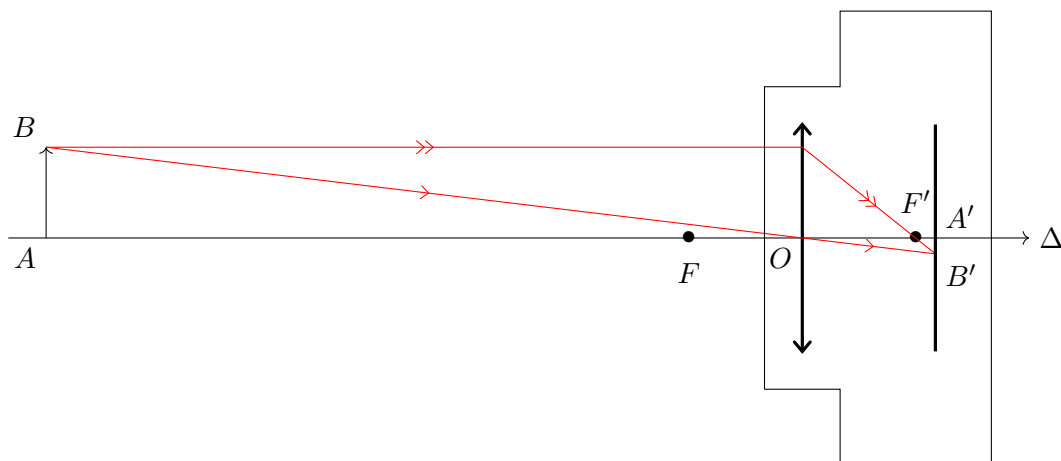


FIGURE 2.12 – Modélisation d'un appareil photographique.

La position du capteur par rapport à la lentille fixe est réglable dans un appareil photographique : c'est ce qui permet de faire la **mise au point**.

1. Pour peu que l'objectif ne soit pas un *fisheye*...

Notons D la distance (que l'on suppose ici fixée) entre l'objet AB et l'écran (c'est-à-dire là où se forme l'image $A'B'$), $x = OA$ et $x' = OA'$. f' sera la distance focale (image) de l'objectif.

Question 14 : Donner le lien entre x, x', f' , puis y remplacer l'expression de x' en fonction de x et D . En déduire une équation du second degré en x .

Question 15 : Quelle condition doit être imposée sur D pour que x soit un nombre réel ?

Formation par une lentille convergente d'une image réelle sur un écran

Pour former une image réelle sur un écran à partir d'un objet réel et d'une lentille convergente de focale f' , il faut que la distance D entre l'objet et l'écran vérifie :

$$D \geq 4f'$$

Question 16 : Un appareil photographique jetable classique possède une focale de 32 mm. Quelle doit-être la distance minimale entre un objet et l'objectif pour former une image nette sur la pellicule de l'appareil ?

Dans un appareil photographique réel, le capteur est constitué d'un très grand nombre de pixels de taille finie. Par exemple, un appareil photo moderne possède typiquement des pixels de quelques micromètres ($2\text{ }\mu\text{m}$ à $10\text{ }\mu\text{m}$).

Ainsi, l'image d'un point objet n'a pas nécessairement besoin d'être exactement ponctuelle sur le capteur : tant que la tache formée reste plus petite que quelques pixels, l'image est perçue comme nette. Il existe donc une certaine marge de manœuvre sur la position de l'image, et donc sur la position de l'objet observé.

L'ensemble des positions de l'objet pour lesquelles l'image est considérée comme nette est appelé la **profondeur de champ**. Celle-ci peut être déterminée par une simple construction géométrique, que nous allons exploiter ci-après.

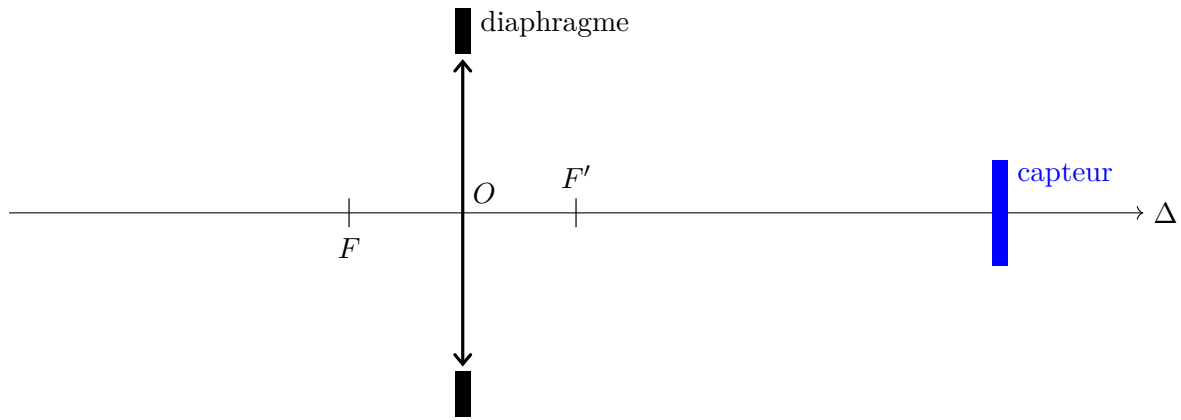
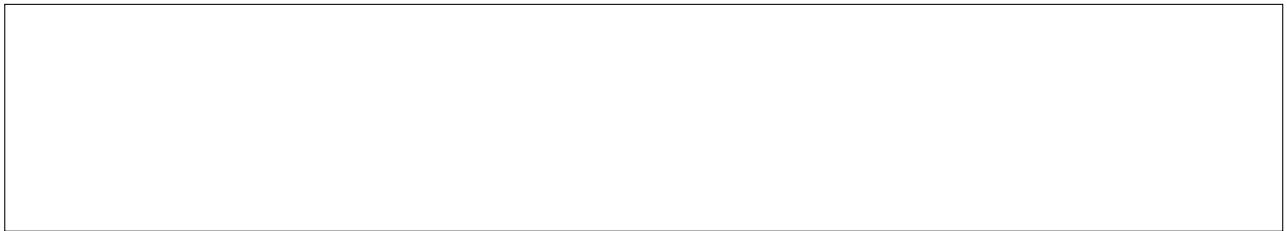


FIGURE 2.13 – Construction géométrique de la profondeur de champ.

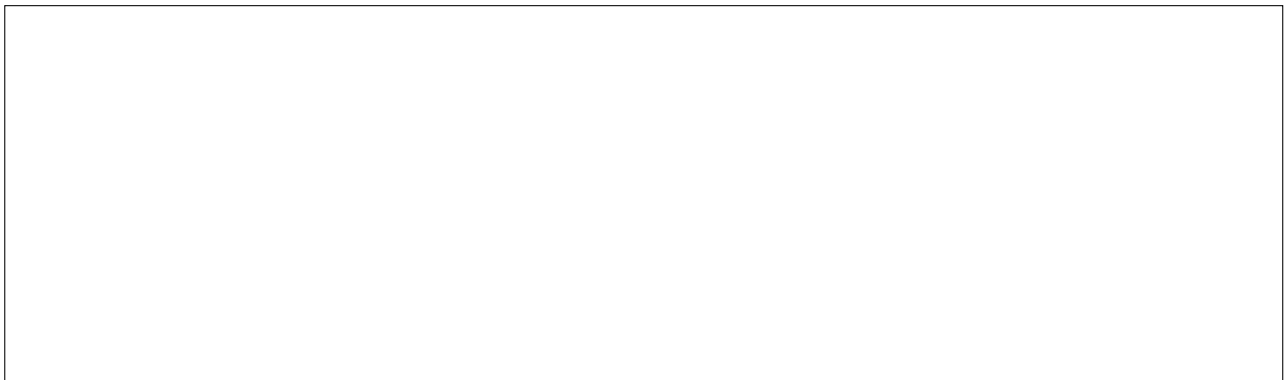
Question 17 : Placer sur la figure 2.13 un point image A'_1 en aval du capteur de telle manière à ce que les rayons parvenant jusqu'à A'_1 couvrent entièrement et uniquement le capteur. En déduire, à l'aide d'un rayon auxiliaire, la position du point objet A_1 par la lentille.

Question 18 : Placer sur la figure 2.13 un point image A'_2 en amont du capteur de telle manière à ce que les rayons parvenant jusqu'à A'_2 couvrent entièrement et uniquement le capteur. En déduire, à l'aide d'un rayon auxiliaire, la position du point objet A_2 par la lentille.

Question 19 : On appelle « premier plan net » le plan vertical contenant le point A_1 et « dernier plan net » le plan vertical contenant le point A_2 . Justifier ces appellations.



Question 20 : La lentille a une distance focale $f' = 30$ mm. Déterminer graphiquement la distance du premier plan net et du dernier plan net par rapport à la lentille, puis l'étendue numérique de la profondeur de champ.



Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss, définir le stigmatisme et donner le lien entre ces deux notions.
- ☐ Décrire et tracer les trois rayons particuliers d'une lentille convergente, en nommant explicitement les points particuliers de cette lentille. Définir et donner le signe de la distance focale de cette lentille.
- ☐ Décrire et tracer les trois rayons particuliers d'une lentille divergente, en nommant explicitement les points particuliers de cette lentille. Définir et donner le signe de la distance focale de cette lentille.
- ☐ Définir le grandissement transversal d'un objet AB par un système optique. Que renseignent son signe et sa valeur ? À l'aide d'un schéma, démontrer succinctement les formules de grandissement de Newton et Descartes.
- ☐  Soit une lentille convergente ($\mathcal{L}$), et un objet réel AB entre le foyer objet et le centre optique. Construire l'image $A'B'$ de AB par ($\mathcal{L}$). Préciser si l'image est virtuelle ou réelle. Que modélise-t-on ?
- ☐  Soit une lentille divergente ($\mathcal{L}$), et un objet réel AB entre en amont du foyer image. Construire l'image $A'B'$ de AB par ($\mathcal{L}$). Préciser si l'image est virtuelle ou réelle.
- ☐  On rappelle la relation de conjugaison de Descartes : $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$. En déduire que la distance objet-écran doit être supérieure à $4f'$ pour observer une image réelle par une lentille mince.
- ☐  Définir puis construire géométriquement la profondeur de champ pour un appareil photographique.

Chapitre 3 : Associations de lentilles minces

Objectifs du programme

L'œil.
Punctum proximum, punctum remotum.

Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe.
Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.

3.1 Principe

Un système optique n'est souvent pas constitué d'une seule lentille : comme nous avons pu le voir, les utilisations restent limitées à l'observation d'un objet lointain sur un écran dont on ne peut pas choisir la position... et encore, uniquement quand la lentille ne nous fournit pas une image virtuelle, et donc impossible à représenter sur un écran !

L'association de plusieurs lentilles nous permet d'avoir une plus grande marge de manœuvre, et donc une plus grande souplesse sur l'observation d'une image.

Prenons l'exemple simple de deux lentilles convergentes, séparées par une distance $O_1O_2 > f'_1 + f'_2$ (figure 3.1).

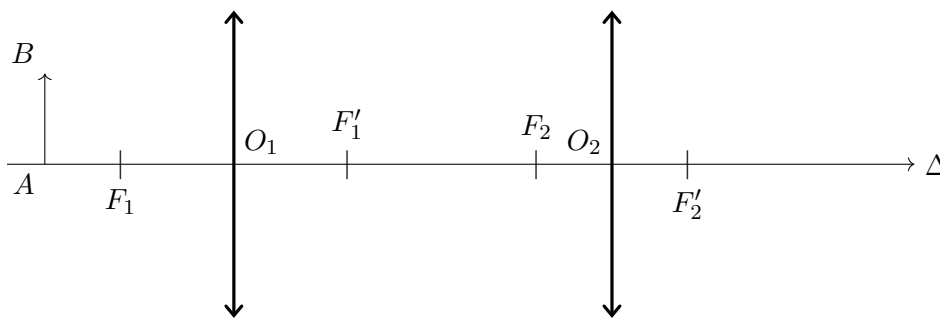


FIGURE 3.1 – Image d'un objet par deux lentilles convergentes, avec $O_1O_2 > f'_1 + f'_2$.

Question 1 : Dessiner l'image A_1B_1 de l'objet AB par la première lentille L_1 .

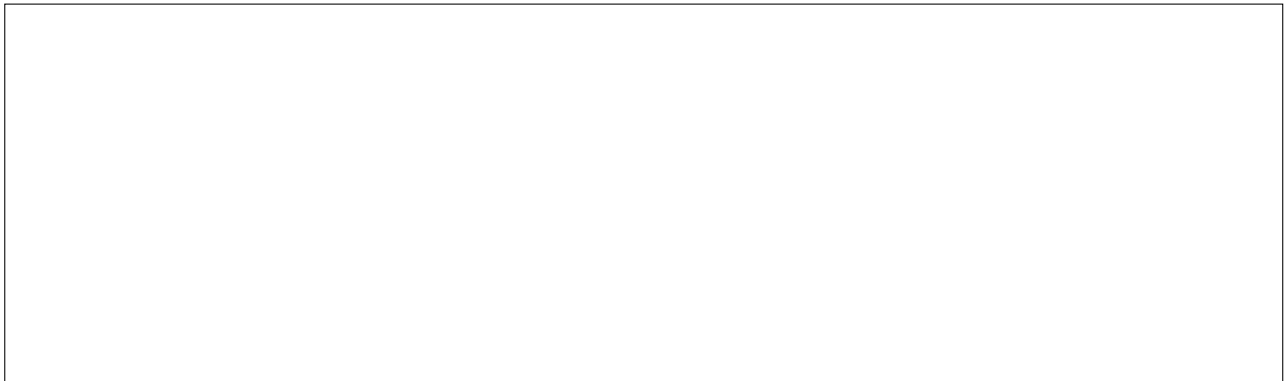
Question 2 : Dessiner l'image $A'B'$ de A_1B_1 , que l'on considère ici comme un objet, par la seconde lentille L_2 .

Le but est maintenant de déterminer si l'association de ces deux lentilles L_1 et L_2 peut correspondre à une lentille unique L .

Question 3 : À l'aide d'un des trois particuliers transformant A en A' , déterminer le centre optique de cette lentille L hypothétique. La représenter sur le schéma.

Question 4 : En déduire alors les positions des foyers objet F et image F' de cette lentille à l'aide des deux autres rayons particuliers.

Question 5 : On donne $O_1A = 5\text{ m}$; $f'_1 = 10\text{ cm}$; $f'_2 = 3\text{ cm}$; $O_1O_2 = 15\text{ cm}$; $AB = 50\text{ cm}$. Montrer que le grandissement total du système optique γ est égal à $\gamma_1 \times \gamma_2$; en déduire la taille de l'image $A'B'$. Quel est l'intérêt d'un tel dispositif ?



Association de deux lentilles

Deux lentilles minces peuvent, dans certaines conditions, être remplacées par une lentille unique dite équivalente.

L'image donnée par la première lentille constitue l'objet de la seconde.

Le grandissement total γ est égal au produit des grandissements γ_1 et γ_2 de chaque lentille : $\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2$.

3.2 Description et modélisation de l'œil

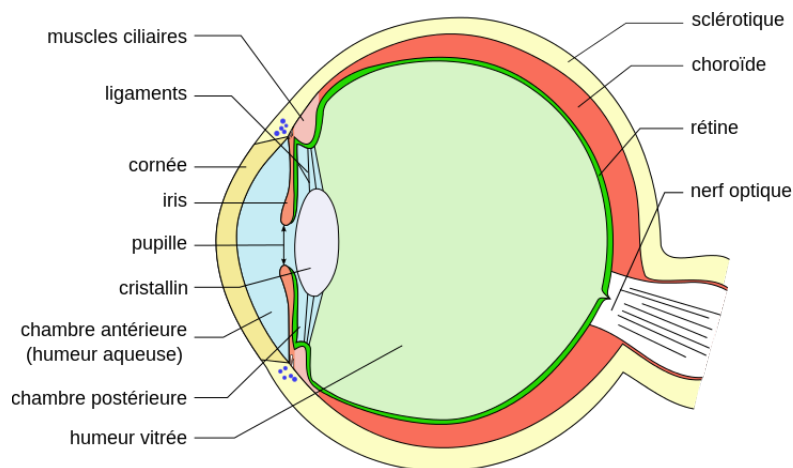


FIGURE 3.2 – Schéma de l'œil humain.

L'œil humain est un organe, qui peut être approximé comme un ensemble d'éléments optiques. Il est notamment composé de :

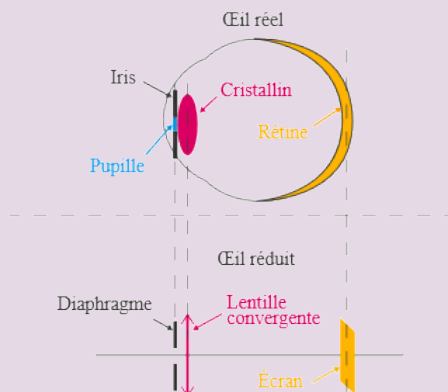
- La **cornée**, qui est la première partie par laquelle la lumière passe. C'est elle qui commence à réfracter la lumière pour la transmettre plus en profondeur vers le cristallin et la rétine. Son rôle est également de faire une première barrière physique entre l'extérieur et l'intérieur de l'œil ;
- L'**iris**, qui est une membrane circulaire constituant la partie colorée visible de l'œil. Il est percé en son centre d'un orifice : la **pupille**. Chez l'humain, la taille de la pupille est contrôlée par le réflexe pupillaire. En modifiant son diamètre, la pupille va ainsi pouvoir laisser passer plus ou moins de lumière ;

- Le **cristallin**. C'est le seul organe dont la forme est contrôlée par le cerveau. Il permet, tout comme la cornée, de dévier la lumière jusqu'à la rétine. Sous l'action des muscles ciliaires, le cristallin peut modifier sa courbure afin de voir des objets nettement : c'est le phénomène d'**accommodation**. Il est à noter que le cristallin diminue sa distance focale lorsqu'il se contracte ; cette distance focale ne peut donc être plus faible que lorsqu'il est totalement décontracté (donc quand l'œil est au repos, lorsqu'il n'accommodé pas). Un œil **emmétrope** (ne possédant pas de pathologie de la vision) est au repos lorsqu'il regarde un objet situé à l'infini ;
- La **rétine**, qui est l'organe responsable de la vision. Elle est tapissée de milliers de photorécepteurs : environ 5 millions de cônes et 120 millions de bâtonnets. Les cônes détectent la lumière diurne et colorée, alors que les bâtonnets détectent la lumière peu intense. Ces photorécepteurs sont cependant absents au niveau de la liaison entre la rétine et le **nerf optique**¹. Celui-ci transmet l'information, c'est-à-dire la lumière observée sur la rétine, jusqu'au cerveau.

Œil réduit

L'optique est la science première de la vision ; la modélisation de l'œil est donc primordiale :

- Le but de la cornée, des humeurs et du cristallin est de faire converger les rayons jusqu'à la rétine. On modélisera donc l'ensemble {cornée + humeur aqueuse + humeur vitrée + cristallin} par une **lentille mince convergente** de distance focale variable ;
- La rétine est l'endroit où les images se forment : on la modélisera donc par un **écran** ;
- L'ensemble {iris + pupille} permet de faire entrer seulement une partie des rayons jusqu'à la rétine : on le modélisera donc par un **diaphragme**.



Ce modèle de l'œil est appelé **œil réduit**, car l'organe est réduit à ses principales fonctions optiques.

👉 **Remarque** : La distance focale d'un œil est de l'ordre de vingt millimètres.

Question 6 : Pourquoi la rétine est-elle modélisée par un écran fixe et non par un écran mobile ?

1. C'est ce qu'on appelle le **point aveugle**.

Accommodation

Contrairement à un appareil photographique, l'œil ne déplace pas son capteur. La mise au point est réalisée par courbure du cristallin sous l'action des muscles ciliaires : c'est l'**accommodation** de l'œil.

De nombreux dispositifs optiques fonctionnent de telle manière à ce que l'œil n'accommode pas : ainsi, celui-ci est au repos et permet d'éviter notamment un travail intense de l'organe et des maux de tête.

Question 7 : Un œil emmétrope au repos regarde un objet situé à l'infini. Le cristallin est-il contracté ou relâché ?

Question 8 : Lorsqu'un objet se rapproche de l'œil, comment doit évoluer la distance focale du cristallin ?

Question 9 : Peut-on diminuer indéfiniment cette distance focale ? Que peut-on en déduire ?

Punctum remotum et punctum proximum

Le **punctum remotum** (PR) est le point objet le plus éloigné vu net lorsque l'œil est au repos.

Le **punctum proximum** (PP) est le point objet le plus proche pouvant être vu net après accommodation maximale.

Pour un œil emmétrope : $PR = +\infty$ et $PP \approx 25 \text{ cm}$.

Question 10 : Une personne tient un livre à 15 cm de ses yeux. Un œil emmétrope au repos peut-il former une image nette ? Que doit faire le cristallin ?

Résolution angulaire

La **résolution angulaire** est le plus petit angle séparant deux objets pouvant être distingués. Pour un œil emmétrope, son ordre de grandeur est d'environ une minute d'arc ^a, soit environ 3×10^{-4} rad ou $0,017^\circ$.

a. Une minute d'arc correspond à un soixantième de degré ; une seconde d'arc correspond à un soixantième de minute d'arc.

Question 11 : Une règle graduée est située à quatre mètres d'une personne emmétrope. Peut-elle distinguer deux graduations successives ?

3.3 Corrections optiques

Considérons une personne, que l'on nommera Bob, possédant une pathologie de l'œil : la myopie. Celle-ci consiste à avoir une profondeur d'œil trop grande par rapport à la distance focale de l'œil au repos (figure 3.3). Ainsi, l'image se formant sur la rétine sera toujours floue, même si Bob essaie d'accommoder (faire se contracter le cristallin ne fera qu'empirer le problème !).

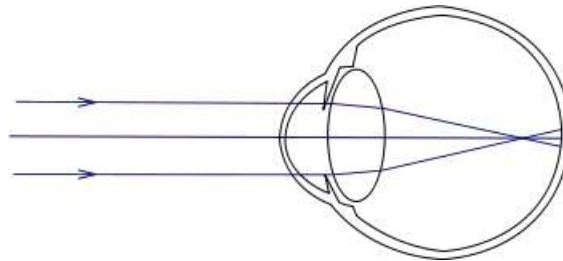
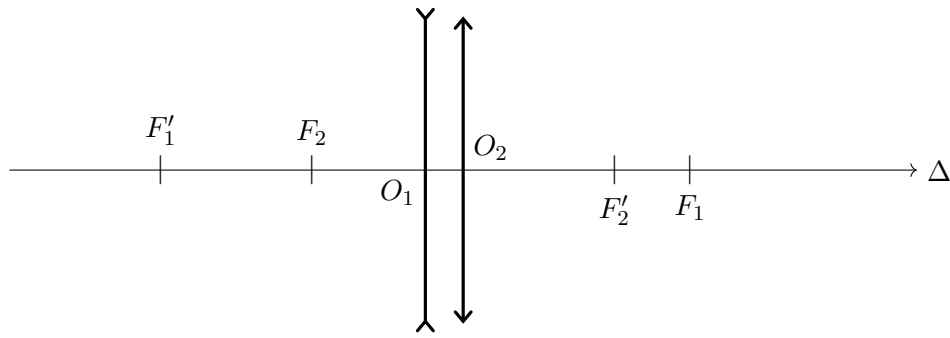


FIGURE 3.3 – Schéma d'un œil myope.

Afin de corriger la myopie, on place en amont de l'œil des verres correcteurs assimilables à une lentille divergente (figure 3.4).

Un objet B_∞ , situé à l'infini, forme des rayons parallèles avec un angle α par rapport à l'axe optique.

FIGURE 3.4 – Correction de la myopie de l'œil L_2 par une lentille divergente L_1 .

Question 12 : En l'absence de lentille divergente, où se formerait l'image de B_∞ par l'œil L_2 ?

Question 13 : Dessiner l'image B_1 de B_∞ par la lentille divergente L_1 . En déduire la position de B' , image de B_∞ par l'ensemble $\{L_1 + L_2\}$. En quoi la présence d'une lentille divergente permet-elle de corriger la myopie ?

On suppose que la distance O_1O_2 est négligeable devant les différentes distances focales : le verre correcteur est accolé à la cornée de Bob. On notera $O \approx O_1 \approx O_2$. Le but est de montrer que l'ensemble $\{L_1 + L_2\}$ est équivalent à une lentille, dont la focale f' est à déterminer.

Question 14 : À l'aide des relations de conjugaison de Descartes des deux lentilles, montrer que pour un objet A situé sur l'axe optique en amont des deux lentilles, formant une image A' en sortie de ces deux mêmes lentilles, on a $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$.

Vergence d'une lentille et association de lentilles

On définit la **vergence** V d'une lentille comme étant l'inverse de sa distance focale image :

$$V = \frac{1}{f'}$$

L'unité de la vergence est la **dioptrie** δ .

Deux lentilles accolées, de vergences V_1 et V_2 , sont équivalentes à une lentille de vergence $V = V_1 + V_2$.

☞ *Remarque* : On n'a donc pas $f' = f'_1 + f'_2$!

☞ *Remarque* : La vergence d'un verre correcteur est généralement comprise entre quelques dixièmes et une dizaine de dioptries. Plus la valeur absolue de la vergence est grande, plus la correction est importante.

☞ *Remarque* : La myopie n'est pas le seul défaut optique de l'œil.

Un œil hypermétrope est insuffisamment convergent : au repos, l'image d'un objet situé à l'infini se formerait en arrière de la rétine. Cette pathologie est corrigée par une lentille convergente.

La presbytie correspond à une diminution progressive de la capacité d'accommodation du cristallin avec l'âge. Le punctum proximum s'éloigne alors de l'œil, ce qui rend la vision de près difficile. Elle est également corrigée par une lentille convergente.

Enfin, l'astigmatisme est dû à une courbure non uniforme de la cornée ou du cristallin. Les rayons lumineux ne convergent alors pas de la même manière selon leur direction, ce qui entraîne une vision déformée ou floue. Cette pathologie est corrigée par des verres dont la courbure dépend de la direction considérée.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Définir le modèle de l'œil réduit (on expliquera ce que modélise chaque élément), et expliquer en quoi consiste le phénomène d'accommodation.
- ☐ Définir le punctum remotum, le punctum proximum et la résolution angulaire d'un œil. Donner leurs valeurs dans le cas d'un œil emmétrope.
- ☐ Construire l'image d'un objet à l'infini par l'association d'une lentille divergente et d'un œil myope, de telle manière à ce que l'œil n'ait pas besoin d'accommoder.
- ☐ Soient deux lentilles minces accolées, de distances focales respectives $f'_1 = 20 \text{ cm}$ et $f'_2 = -5 \text{ cm}$. Quelle est la distance focale f' équivalente de cet ensemble ?