



Département de Physique
Faculté des Sciences Exactes
Université A/MIRA de Béjaïa

Cours d'optique géométrique

Pour

Le niveau L2 physique

Réalisé par

Mr. BOUFALA KHALED

Sommaire

Chapitre1 : Généralités sur les ondes électromagnétiques et lumière

1. Introduction	02
2. L'optique géométrique	02
3. Les ondes électromagnétiques	03
4. Indice de réfraction d'un milieu	05
4.1. Propagation rectiligne de la lumière	06
4.2. Principe du retour inverse	06
4.3. Indépendance des rayons lumineux	06
5. Exercices sur le cours	07

Chapitre 2 : Dioptré et miroirs

1. Dioptrés et miroirs	10
1.1. Définition	10
1.2. Les lois de Snell-Descartes	10
1.3. Réflexion totale	11
1.4. Exemple d'application ; fibre optique	11
1.5. Application; Fibre optique	11
2. Énoncé du principe de Fermat	11
2.1. Notion du chemin optique	11
2.2. Théorème de Malus	13
3. Image d'un objet dans un milieu non homogène	13
4. Notion d'objet et d'image	14
4.1. L'objet	14
4.2. L'image	15

5. L'image d'un objet à travers un système optique	15
- l'Image d'un objet étendu	16
- Stigmatisme rigoureux et stigmatisme approché	16
6. Etude du prisme	17
-6.1. Déviation du prisme	17
-6.2. Déviation minimale	18
7. Relation de conjugaison d'un dioptre plan	20
8. Notion de foyers	22
8.1. Foyer image	22
8.2. Foyer objet	22
8.3. Plan focal objet et plan focal image	22
8.4. Propriété	22
9. Dioptre sphérique	23
9.1. Relation de conjugaison d'un dioptre sphérique avec origine au sommet	23
9.2. Grandissement du dioptre sphérique	25
9.3. Foyer objet et image d'un dioptre sphérique	25
9.4. Construction géométrique	26
10. Relation de conjugaison d'un miroir sphérique	27
10.1. Construction géométrique de l'image d'un objet à travers un miroir sphérique	28
11. Exercices d'applications	29
12. Références Bibliographique utilisées dans le cours	30

Chapitre 3 : Les lentilles

1. Les lentilles en optique géométrique	33
1.1. Lentilles épaisses	33
1.2. Vergence d'une lentille épaisse	34
1.3. Lentilles minces	34

1.4. Vergences des lentilles convergentes et divergentes	35
1.5. Relation de conjugaison d'une lentille épaisse	36
2. Etude des lentilles minces	37
2.1. Relation de conjugaison d'une lentille mince	38
2.2. Notations des lentilles convergentes et divergentes	39
2.3. Construction géométrique de l'image d'un objet réel à travers une lentille convergente	39
2.4. Image d'un objet virtuel à travers une lentille convergente	41
2.5. Image d'un objet à l'infini	41
2.6. Lentilles divergentes	42
2.7. La vergence d'une lentille	44
2.8. Formule de conjugaison de Newton	44
3. Association de lentilles	45
4. Exercices d'application sur les lentilles minces	46

Chapitre 4 : Instruments optiques

1. Introduction	50
2. La loupe	50
2.1. Grandissement linéaire d'une loupe	50
2.2. La puissance d'une lentille	50
2.2.1. Pour un œil placé sur le plan focal image de la lentille (puissance intrinsèque)	51
2.2.2. Œil placé dans le plan de la lentille	51
2.3. Le grossissement d'une loupe	52
2.4. Grossissement commercial d'une loupe	52
2.5. Exercice d'application	53
3. Microscope optique	53
3.1. Principe du microscope optique	53

3.2. Image d'un objet par un microscope optique	54
3.3. Représentation géométrique	54
3.4. Puissance d'un microscope	55
3.5. Puissance intrinsèque d'un microscope	56
3.6. Grossissement d'un microscope optique	56
4. La lunette astronomique	57
4.1. La lunette de Galilée	57
4.2. Grossissement de la lunette de Galilée	58
5. Etude de l'œil en optique géométrique	59
5.1 Anatomie de l'œil	59
5.2. Phénomène d'accommodation	60
5.3. Punctum proximum	60
5.4. Punctum remotum	60
5.5. Amplitude d'accommodation	60
5.6. Les défauts de la vision	60
5.6.1. L'œil myope	60
5.6.2. L'œil hypermétrope	62
5.6.3. L'œil astigmatique	63
a/ Astigmatisme simple	64
b/ Astigmatisme composé	64
6. Exercices d'application	64

Chapitre I : Généralités sur les ondes électromagnétiques et lumière.

Sommaire

1. Introduction	02
2. L'optique géométrique	02
3. Les ondes électromagnétiques	03
4. Indice de réfraction d'un milieu	05
5. Principes de l'optique géométrique	
5.1. Propagation rectiligne de la lumière	06
5.2. Principe du retour inverse	06
5.3. Indépendance des rayons lumineux	06
6. Exercices sur le cours	07

1. Introduction

L'optique géométrique est une science connue depuis plusieurs siècles, elle s'intéresse à la trajectoire de la lumière visible dans des milieux différents, à la réfraction et à la réflexion. Les premiers savants, comme Galilée et Newton ont réalisé des systèmes optiques à base de miroirs et de lentilles qui ont permis d'améliorer le champ de vision de l'homme et de voir à travers l'espace. En effet, Galilée [1] (1564-1642) a pu élaborer grâce, à des lentilles, la première lunette astronomique avec laquelle il a observé des planètes lointaines comme Jupiter et certains de ses satellites. Newton [1] (1642-1726) a amélioré la lunette astronomique de Galilée et il a introduit les miroirs paraboliques qui lui ont permis d'inventer le télescope beaucoup plus sophistiqué que la lunette. A partir du 18^e siècle, l'optique a connue une révolution après la découverte du comportement ondulatoire des ondes électromagnétique qui s'étendait sur un spectre beaucoup plus large. Par ailleurs l'avancée remarquable des moyens technologique a rendu cette science plus précise et plus évolué avec des télescopes et microscopes de plus en plus puissant couvrant une large gamme de fréquence, comme les ondes radio, infrarouge, rayons, X etc.

2. L'optique géométrique

Dans cette approximation, on considère que la lumière se propage sous forme de rayons lumineux qui représente la trajectoire suivie par la lumière dans un milieu transparent. Il est utile de souligner que dans cette approche, on s'intéresse uniquement à l'aspect géométrique de la lumière visible à l'œil nu sans aborder sa nature ondulatoire. Les lois de l'optique géométrique que nous allons aborder par la suite sont valable lorsque les longueurs d'ondes de la lumière sont très petites devant les longueurs caractéristiques du milieu considéré. Dans la partie réservée à l'optique géométrique, la lumière se propage dans des milieux transparents, homogènes et isotropes. Un milieu est

dit homogène lorsque ses propriétés sont identiques en chaque point et isotrope lorsque ses caractéristiques ne dépendent pas de la direction.

Avant d'entamer la partie consacrée à l'optique géométrique et les lois qui le gouvernent, nous allons donner dans ce qui suit, un aperçu sur la nature ondulatoire de la lumière.

3. Les Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide avec une vitesse caractéristique c égale à $3 \cdot 10^8$ m/s, dans d'autres milieux différents du vide, sa vitesse est inférieure à c . l'onde électromagnétique est caractérisée par une longueur d'onde, une fréquence, une vitesse de propagation et un champ électrique couplé à un champ magnétique. Les lois qui régissent le phénomène de propagation de ces ondes sont les équations de Maxwell [1]. Ce physicien avait établie quatre équations qui expliquent tous les phénomènes de l'électromagnétisme, de l'électrostatique et de l'électrocinétique. Les équations de Maxwell sont données ci-dessous :

$$\text{div}(\vec{B}) = 0$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

\vec{E} et \vec{B} , représentent respectivement le champ électrique et magnétique. ρ , la densité de charge électrique. μ_0 , la perméabilité magnétique du vide, ϵ_0 , la permittivité électrique du vide et \vec{J} représente la densité de courant électrique.

La propagation d'une onde électromagnétique se traduit par la variation de plusieurs grandeurs physiques comme le champ électrique et le champ

magnétique. La lumière est considérée comme une onde électromagnétique avec laquelle on peut réaliser des expériences d'interférences.

La fréquence d'une onde électromagnétique est reliée à son énergie par la relation de Planck [2]; $E=h\nu$, h est la constante de Planck et ν représente sa fréquence. Cette grandeur peut prendre des valeurs allant de quelques hertz à 10^{20} Hz, mais le domaine de la lumière visible ne couvre que la gamme $4 \cdot 10^{14}$ à $8 \cdot 10^{14}$ Hz. La longueur d'onde, la fréquence et la vitesse de propagation sont reliées par la relation :

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \quad (1-1)$$

v est la vitesse de propagation de l'onde dans un milieu quelconque.

Les longueurs d'onde de la lumière visible sont associées à des couleurs comme montré sur le tableau 1 ci-dessous.

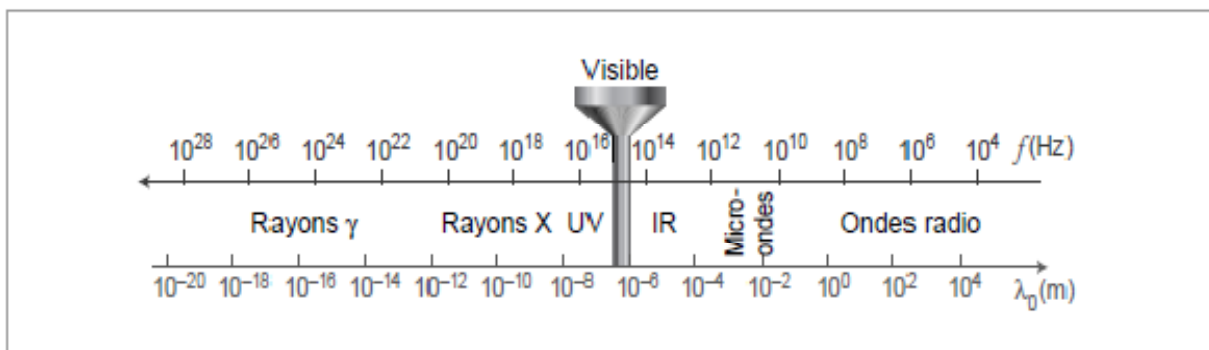


Figure 1-1 : spectre des ondes électromagnétique [2].

Remarques

- Dans ce cours nous nous intéressons qu'au domaine de la lumière visible où la longueur d'onde varie entre $4\mu\text{m}$ à $8\mu\text{m}$. Il est important de noter que toutes les ondes électromagnétiques appartenant au spectre représenté sur la figure

I-1 obéissent aux mêmes lois qui régissent l'optique géométrique dans le domaine visible.

couleur	Longueur d'onde (nm)
Violet extrême	400
Violet moyen	420
Violet - bleu	440
Bleu moyen	470
Bleu - vert	500
Vert moyen	530
Vert - jaune	560
Jaune moyen	580
Jaune - orangé	590
Orangé moyen	600
Orangé - rouge	610
Rouge moyen	650
Rouge extrême	780

Tableau 1-1 : Couleurs des ondes lumineuses dans le vide.

- Lorsque l'onde électromagnétique change de milieu, sa fréquence reste inchangée, par contre, sa vitesse de propagation et sa longueur d'onde varient en fonction du milieu. Ce milieu est caractérisé par une grandeur dite «indice de réfraction».

4. Indice de réfraction d'un milieu

L'indice de réfraction n d'un milieu transparent est obtenu par le rapport de la vitesse de l'onde dans le vide sur la vitesse de l'onde dans le milieu considéré, il est donné par la relation suivante:

$$n = \frac{c}{v} \geq 1 \quad (1-2)$$

v : est la vitesse de la lumière dans le milieu et c : la vitesse de la lumière dans le vide qui est égale à $3 \cdot 10^8$ m/s.

A partir des relations (1-1) et (1-2), on peut dire que l'indice de réfraction d'un milieu est fonction de la longueur d'onde de la lumière qui le traverse.

Ci-dessous, sur le tableau 1-2, on donne l'indice de réfraction de quelques matériaux à 20°, pour trois longueurs d'onde.

Le milieu à 20°C	$n(\lambda_{\text{bleu}})=486\text{nm}$	$n(\lambda_{\text{jaune}})=589\text{nm}$	$n(\lambda_{\text{rouge}})=655\text{nm}$	Coefficient de dispersion (ν)
Crown	1.523	1.517	1.514	168.55
Flint léger	1.585	1.575	1.570	105.00
Flint moyen	1.665	1.650	1.645	82.50
Flint lourd	1.919	1.890	1.879	47.25
Diamant	2.435	2.417	2.410	96.68
Eau	1.338	1.333	1.331	190.45

Tableau 1-2 : Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

Le coefficient de dispersion ν est donné par la relation ci-dessous.

$$\nu = \frac{n(\lambda_{\text{jaune}})}{n(\lambda_{\text{bleu}}) - n(\lambda_{\text{rouge}})} \quad (1-3)$$

Remarque

L'indice de réfraction peut aussi varier sous l'effet d'autre paramètre, comme la température, dans ce cas on définit le coefficient thermique de l'indice optique comme $\frac{dn}{dT}$ qui est compris entre 3.10^{-4} K^{-1} et $16.10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

5. Principes de l'optique géométrique

5.1. Propagation rectiligne de la lumière

Dans un milieu homogène et isotrope, un rayon lumineux suit une ligne droite [2].

5.2. Principe du retour inverse

Lorsqu'un rayon lumineux se déplace d'un point A vers un point B, ou de B vers A, il emprunte le même chemin avec la même trajectoire [2].

5.3. Indépendance des rayons lumineux

Les rayons lumineux se déplacent suivant des trajectoires indépendantes et lorsqu'ils se croisent, un rayon lumineux ne peut dévier l'autre rayon. En d'autres termes, les rayons lumineux n'interagissent pas entre eux [2].

6. Exercices sur le chapitre 1

Exercice 1

La vitesse de la lumière dans le vide est de $3 \cdot 10^8$ m/s. Calculer la vitesse de la lumière lorsqu'elle pénètre dans un bloc de verre d'indice de réfraction : $n_v = 1.5$.

Exercice 2

Un rayon lumineux est constitué de la superposition de deux couleurs ou radiations, rouge et violette. Ce rayon se propage dans un verre dont les indices pour la lumière rouge et violette sont respectivement égaux à $n_r = 1.595$ et $n_v = 1.625$. Ce rayon arrive sur la surface de séparation avec l'air.

1/ - Calculer les angles d'incidence critique pour les lumières rouge et violette dans le verre.

2/ - Quelles couleurs observe-t-on dans l'air si le rayon arrive dans ce milieu sous un angle d'incidence égal à 35° .

3/ - Même question si le rayon arrive sous un angle d'incidence de 38.5° .

4/ - Quel est l'intérêt de ce type de montage.

Exercice. 3

Le tableau ci-contre donne les longueurs d'ondes, dans le vide de deux radiations monochromatiques et les indices correspondants pour deux types de verre différents.

Couleur	λ (nm)	n(crown)	n(flint)
Rouge	656.3	1.504	1.612
Bleu	486.1	1.521	1.671

1/- Calculer les fréquences de ces ondes lumineuses. Dépendent-elles de l'indice du milieu.

2/- Calculer les célérités et les longueurs d'onde de la radiation rouge dans les deux verres.

3/- Un rayon de lumière blanche arrive sur un dioptre plan air-verre sous l'incidence $i=60^\circ$. L'indice de l'air est pris égal à 1. Rappeler les lois de Descartes relatives à la réfraction de la lumière. Calculer l'angle que fait le rayon bleu avec le rayon rouge pour un verre crown, puis pour un verre flint. Faire une figure.

4/- Quel est le verre le plus dispersif.

Chapitre 2 : Dioptrics et miroirs dans l'approximation de Gauss

Sommaire

1. Dioptrics et miroirs	10
1.1. Définition	10
1.2. Les lois de Snell-Descartes	10
1.3. Réflexion totale	11
1.4. Exemple d'application	12
2. Enoncé du principe de Fermat	13
2.1. Notion du chemin optique	13
2.2. Théorème de Malus	14
3. Image d'un objet dans un milieu non homogène	14
4. Notion d'objet et d'image	15
4.1. L'objet	15
4.2. L'image	15
5. L'image d'un objet à travers un système optique	16
- l'Image d'un objet étendu	17
- Stigmatisme rigoureux et stigmatisme approché	17
6. Etude du prisme	18
-6.1. Déviation du prisme	18
-6.2. Déviation minimale	19
7. Relation de conjugaison d'un dioptrics plan	21
8. Notion de foyers	23
8.1. Foyer image	23
8.2. Foyer objet	23
8.3. Plan focal objet et plan focal image	23
8.4. Propriété	23
9. Dioptrics sphérique	24
9.1. Relation de conjugaison d'un dioptrics sphérique avec origine au sommet	24
9.2. Grandissement du dioptrics sphérique	26
9.3. Foyer objet et image d'un dioptrics sphérique	27
9.4. Construction géométrique	27
10. Relation de conjugaison d'un miroir sphérique	28
10.1. Construction géométrique de l'image d'un objet à travers un miroir sphérique	29
11. Exercices d'applications	30

1. Dioptrés et miroirs

1.1. Définition

Un dioptré est une surface quelconque qui sépare deux milieux transparents d'indices optiques différents. Un dioptré peut permettre la réflexion et la réfraction de la lumière dans le deuxième milieu.

Exemple 1 : Cette surface peut être plane comme la surface qui sépare l'eau de mer et l'air, ces deux milieux possèdent des indices de réfraction différents et l'interface entre ces deux milieux s'appelle dioptré plan.

Exemple 2 : La surface qui sépare une bille en verre sphérique et l'air peut être considérée comme un dioptré sphérique.

Un miroir est une surface réfléchissante qui ne laisse pas passer la lumière, par contre, elle est complètement renvoyée dans le même milieu suivant un certain angle.

La réfraction et la réflexion sont régies par les lois de Snell-Descartes [3].

1.2. Les lois de Snell-Descartes

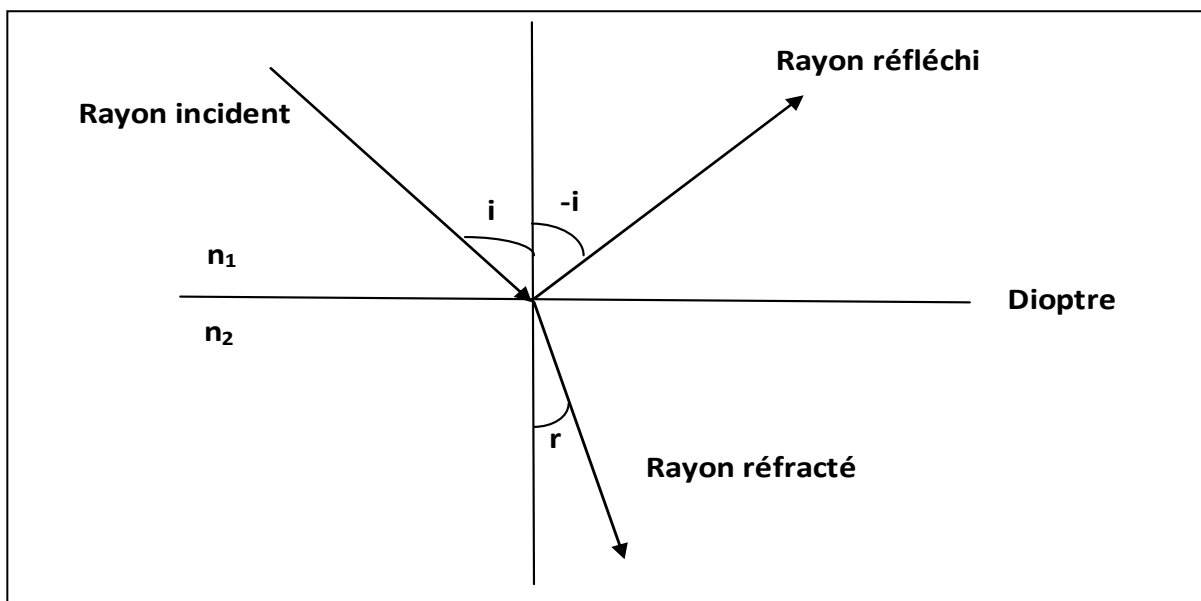


Figure 2-1 : Trajectoire d'un rayon lumineux après réflexion et réfraction.

- La première loi de Snell-Descartes, prévoit la trajectoire du rayon réfléchi, elle stipule que l'angle entre le rayon réfléchi et la normale au dioptre est égale à l'angle entre le rayon incident et la normale au dioptre. i est appelé angle d'incidence. L'angle d'incidence est égal à l'angle entre la normale et le rayon incident.
- La deuxième loi prévoit l'angle entre le rayon réfracté dans le deuxième milieu " r " en fonction de l'angle d'incidence " i ". la relation est donnée par l'équation (2-1).

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r) \quad (2-1)$$

Remarque : Les trois rayons de la figure 1 appartiennent au même plan dit plan d'incidence.

1.3. Réflexion totale

A partir de la relation (1), nous avons, $\sin(i) = \frac{n_2}{n_1} \sin(r)$, lorsque $n_1 > n_2$, on peut définir un angle d'incidence critique qu'on note i_c pour lequel il y'aura une réfraction rasante avec un angle $r=90^\circ$. Cet angle d'incidence s'appelle « angle critique de réflexion totale ». Lorsque $i > i_c$, il y'aura pas de réfraction, mais uniquement de la réflexion. On donne i_c par la relation :

$$i_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

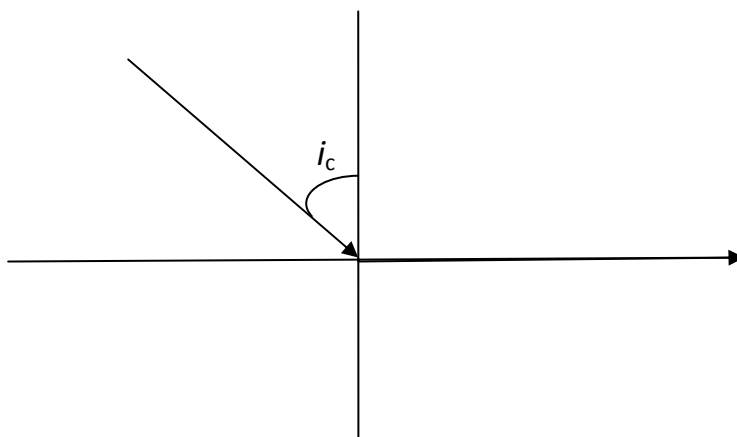


Figure 2-3: Illustration du phénomène de la réflexion totale

1.4. Exemple d'application; Fibre optique

Le phénomène de la réflexion totale peut être utilisé pour transporter de la lumière à travers une fibre optique, ce dispositif est conçu pour minimiser les pertes d'énergie de l'onde lors de sa propagation. La fibre optique est constituée de deux cylindres coaxiaux, la couche externe représente l'indice n_2 et la couche interne représente le milieu d'indice n_1 avec $n_1 > n_2$. Le rayon lumineux incident va subir uniquement des réflexions sans qu'il soit réfracté (figure II-2).

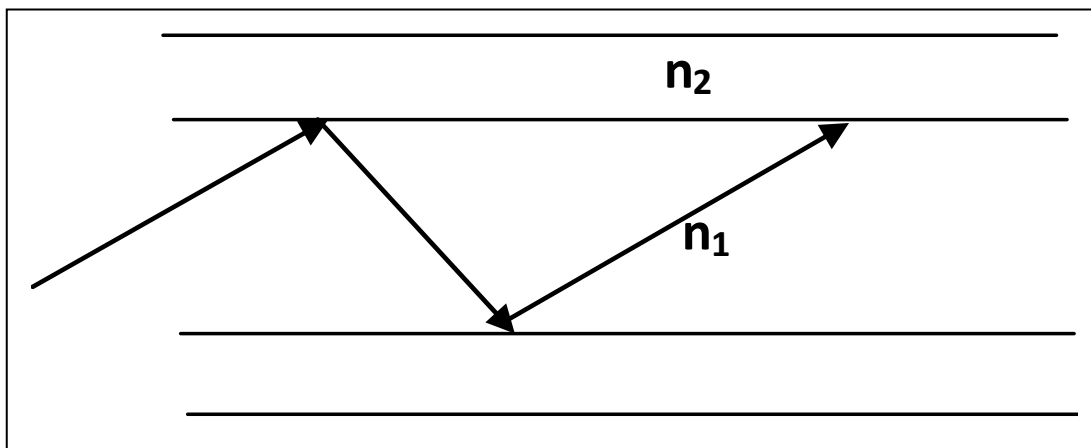


Figure 2-2 : Schéma explicatif d'une fibre optique.

Remarque

Lorsque les angles i et r sont très petits, $\sin(i) \approx i$ et $\sin(r) \approx r$, les relations de Snell-Descartes vont s'écrire alors :

$$n_1 i = n_2 r \quad (2-3)$$

Cette nouvelle relation s'appelle la loi de Kepler. Cette loi est utilisée lorsque les angles d'incidence et de réfraction sont très petits [2].

2. Enoncé du principe de Fermat [2, 4]

« Le trajet effectivement suivi par la lumière pour aller d'un point A à un point B correspond à une valeur stationnaire du chemin optique par rapport aux trajets fictifs voisins allant de A à B. »

Selon ce principe, la lumière emprunte le chemin le plus rapide pour aller d'un point A à B. ce principe permet d'expliquer les lois de Snell-Descartes.

2.1. Notion du chemin optique

Le principe de Fermat est basé sur la minimisation du temps de parcours de l'onde allant d'un point A vers le point B avec la vitesse V, cette intervalle de temps est donnée par l'intégrale suivante :

$$t_{A-B} = \int_A^B \frac{ds}{V(M)}$$

dM représente un élément de longueur

On multipliant cette équation par la vitesse de la lumière dans le vide, on aura :

$$ct_{A-B} = \int_A^B \frac{cdM}{V(M)} = \int_A^B n(M)dM = L_{A-B}$$

$n(M)=c/V(M)$.

Cette distance est appelée chemin optique qui est notée L_{A-B} , qui peut s'écrire encore comme :

$$L_{A-B} = \int_A^B n(M)\vec{u}d\vec{M} \quad (2-4)$$

$d\vec{M}$, représente le vecteur déplacement élémentaire sur la trajectoire entre A et B.

\vec{u} est un vecteur tangent à la trajectoire entre A et B au point M.

Ce principe confirme la trajectoire linéaire suivie par un rayon lumineux dans un milieu homogène. En effet dans ce cas $L_{A-B} = L(A)-L(B)$ qui est la distance séparant deux points sur une droite.

2.2. Théorème de Malus

Selon ce théorème, la trajectoire des rayons lumineux sont perpendiculaire aux surfaces d'onde. En combinant ce théorème et le principe de Fermat, on aura la relation :

$$\overrightarrow{grad}(n) = \frac{d(n\vec{u})}{ds}$$

\vec{u} est un vecteur unitaire porté sur le trajectoire du rayon lumineux.

3. Image d'un objet à travers un milieu non homogène

On dit qu'un milieu est non homogène, du point de vue optique, lorsque l'indice de réfraction varie d'une zone à une autre mais supposé localement constant. Dans ce cas la lumière va subir des déviations successives à chaque fois qu'elle change de milieu conduisant à la courbure des rayons lumineux issus de l'objet. L'image finale se forme suivant la tangente de la courbe à la fin de son parcours. Parmi les phénomènes les plus connus qui illustrent cette situation, on trouve le mirage. Dans le cas du mirage et sous l'effet du gradient de température qui varie avec la hauteur par rapport au sol, les rayons lumineux issus d'un objet lointain seront courbés et l'image finale est projetée suivant la tangente au point finale en contact avec l'œil. Ce phénomène peut se produire dans le cas où la surface de la terre est chaude (mirage inférieur) où dans le cas d'une surface froide (mirage supérieur). La figure 4 illustre ce phénomène.

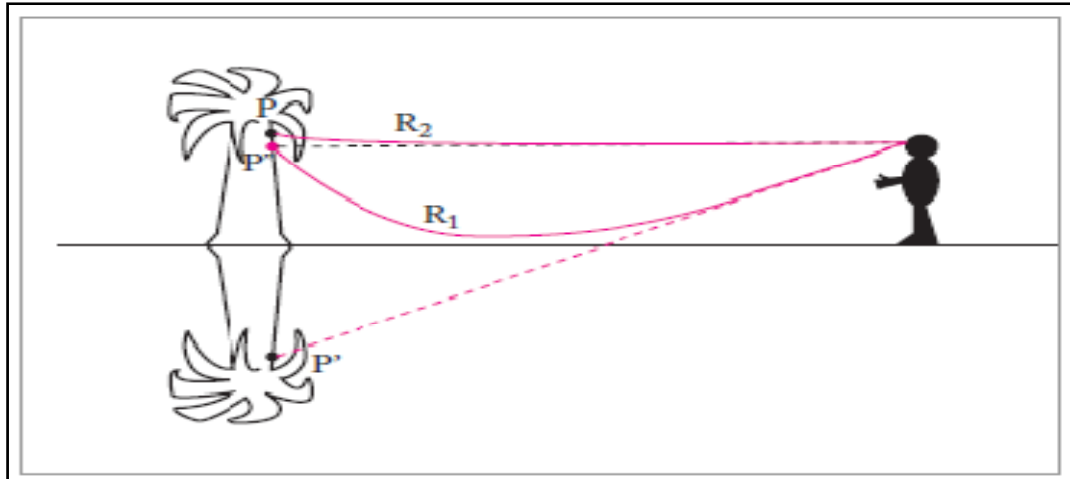


Figure 2-3 : Illustration du phénomène de mirage inférieur [2].

4. Notion d'objet et d'image

4.1. L'objet

Un objet réel est formé par une infinité de points lumineux où chacun d'eux joue le rôle d'une source indépendante qui émet des rayons dans toutes les directions (Fig. 2-4(a)). Un objet virtuel est l'image d'un objet réel obtenue par un autre système optique (Fig. 2-4(b)). Un objet virtuel n'émet pas de rayons, il est le point de convergence par prolongation de rayons virtuels, c'est-à-dire, des rayons réels qui divergent.

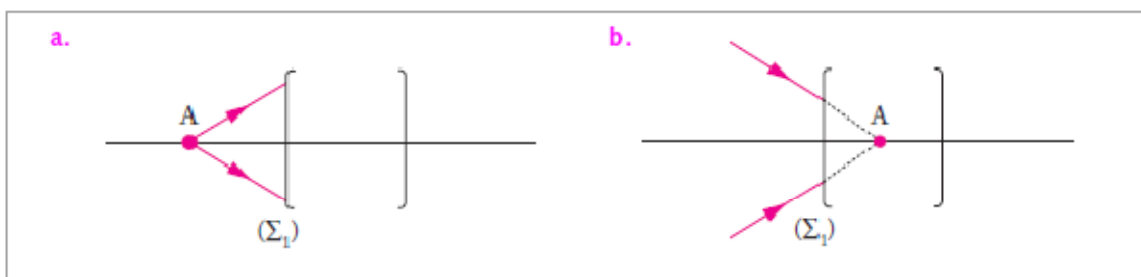


Figure 2-4 : (a) : Objet réel ; (b) Objet virtuel [2].

4.2. L'image

L'image d'un objet est dite réelle si on peut la projeter sur un écran. L'image virtuelle ne peut pas se former sur un écran car les rayons réels divergent. Pour voir une

image virtuelle il faut soit regarder directement par les yeux soit utiliser une lentille convergente pour la projeter sur un écran (voir la figure 6).

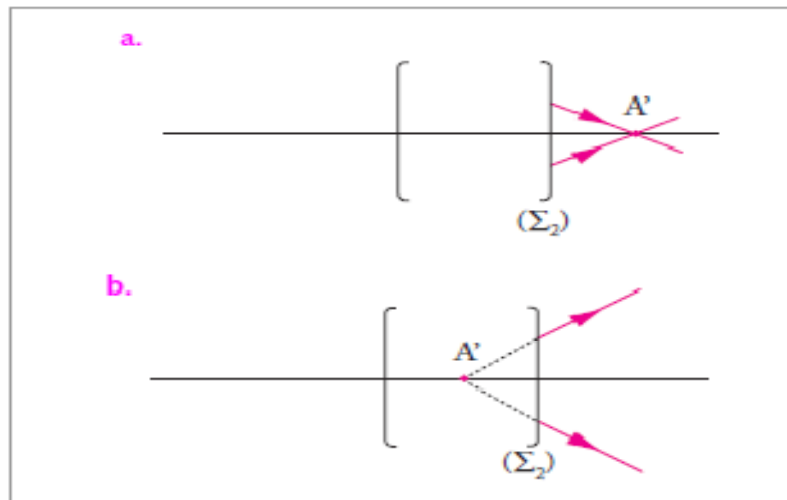


Figure 2-5 : (a) : image réelle ; (b) : image virtuelle [2].

5.L'image d'un objet à travers un système optique

Un système optique est constitué de dioptries et/ou de miroirs. Dans le cas où le système est constitué uniquement de dioptries, on dit qu'il est dioptrique et dans le cas où le système comporte au moins un miroir, il s'appelle système catadioptrique.

Un objet lumineux est constitué d'un grand nombre de sources lumineuses ponctuelles, chaque point de l'objet émet des rayons dans toutes les directions. Nous allons commencer à construire d'abord l'image d'une source ponctuelle considérée comme un objet. Les rayons lumineux issus de l'objet arrivent au système optique avec des angles différents, en traversant le système, ils vont subir des déviations et se croisent en un point. La position de l'image correspond au point où ils vont se rencontrer. Ce cas correspond à un objet réel et une image réelle.

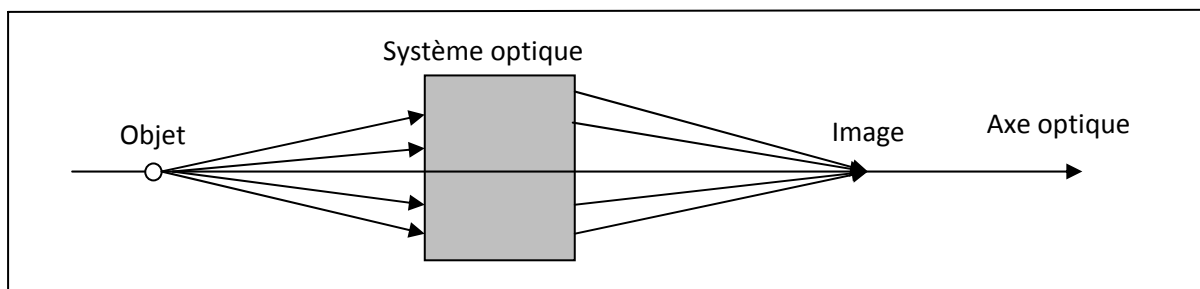


Figure 2-6 : Construction de l'image d'un objet ponctuel

L'image d'un point peut être située au point correspondant à l'intersection d'au moins deux rayons ayant traversé le système optique.

5.1. Stigmatisme rigoureux et stigmatisme approché

Lorsque à un point de l'objet correspond un point image où tous les rayons issus de l'objet convergent vers un seul point image, on dit que le stigmatisme est rigoureux et l'image dans ce cas est nette. Dans le cas où les rayons issus de l'objet ne convergent pas, l'image obtenue représente une tâche et sera floue. Pour remédier à ce problème on limite l'inclinaison des rayons lumineux en plaçant un diaphragme. Le diaphragme est une petite ouverture qui permet de filtrer et ne laisse passer que les rayons avec faible incidence. Cela conduit à l'amélioration de la qualité de l'image. Le stigmatisme est dit approché et on parle aussi de l'approximation de Gauss.

5.2. Image d'un objet étendu

Dans le cas d'un objet étendu, celui-ci est constitué d'un nombre infini de points et chaque point peut être assimilé à une source lumineuse. Chaque point de l'objet lui correspond une image constituée de la même façon qu'un point isolé et l'image de l'objet se formera par l'assemblage de tous les points. Habituellement on considère les points situés aux extrémités de l'objet qu'on va relier ensemble pour constituer l'image. Sur la figure 2-7, A'B' représente l'image de l'objet AB à travers le système optique (S).

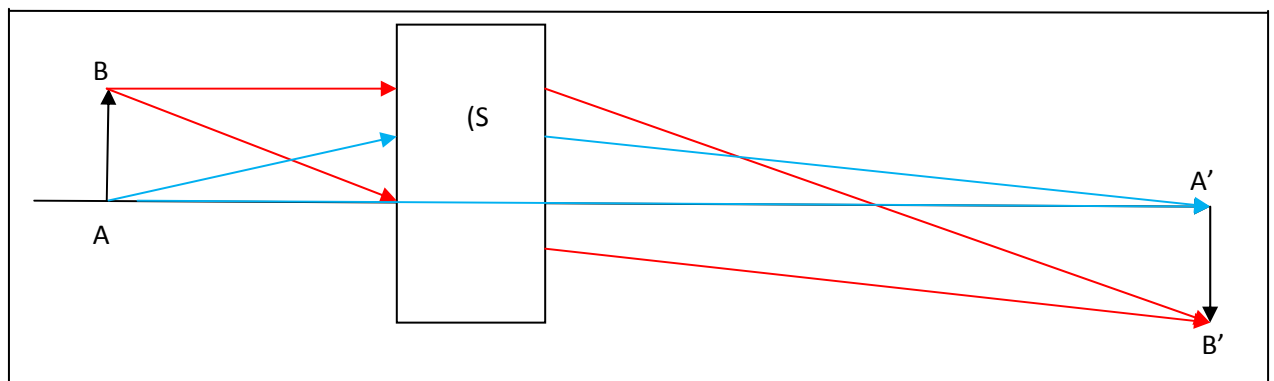


Figure 2-7 : Construction de l'image d'un objet placé verticalement à l'axe optique.

6. Etude du prisme

Le prisme est un système optique constitué de deux dioptrés plans écartés d'un angle A appelé l'angle du prisme. Sur la figure 2-8, est représenté le parcours d'un rayon lumineux à travers un prisme. Le prisme est utilisé en spectrométrie qui permet de séparer les raies selon la longueur d'onde.

6.1. Déviation d'un prisme

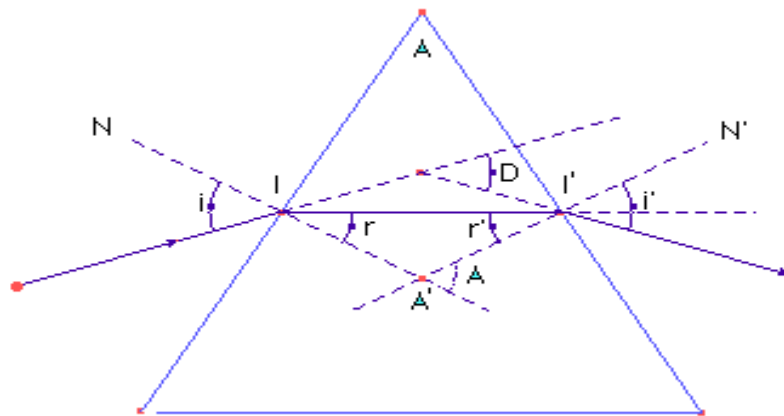


Figure 2-8 : Représentation du parcours d'un rayon lumineux à travers un prisme [4]. i et r sont les angles d'incidences et de réfraction sur le premier dioptré (air/verre) et r' et i' sont les angles d'incidences et de réfraction sur le deuxième dioptré (verre/air). D est la déviation du prisme, qui représente l'angle entre le rayon incident et le rayon émergent du prisme. À partir de considérations géométriques appliquées sur la figure 2-8.

Formules du prisme

$$\sin(i) = n \sin(r)$$

$$\sin(i') = n \sin(r')$$

$$A = r + r'$$

La déviation est donnée par :

$$D = i + i' - r - r' - A$$

Lorsque l'angle d'incidence est fixé, la déviation dans ce cas ne dépendra que de l'indice de réfraction (lois de Snell-Descartes) et comme l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde selon la formule de Cauchy, on déduit que la déviation est une fonction de la longueur d'onde. A cet effet, les rayons qui émergent du prisme sont déviés de façons différentes et de ce fait seront séparés selon la longueur d'onde.

Remarque

La formule de Cauchy donne l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde, elle a la forme suivante :

$$n = B \frac{1}{\lambda^2} + A$$

C'est une droite qui coupe l'axe des ordonnées au point $n=B$.

6.2. Déviation minimale

Lorsque on varie l'angle d'incidence, la déviation passe par un minimum, cela peut être visible expérimentalement par le changement de sens de déplacement du spectre ayant traversé le prisme.

L'expression de la déviation minimale est donnée par :

$$D_m = 2i_m - A, i_m = \arcsin(n \sin(A/2))$$

Dans ce cas $r = r' = A/2$.

L'indice de réfraction peut être obtenu par l'expression suivante :

$$n = \frac{\sin(D_m + A)/2}{\sin(A/2)} \quad (2-6)$$

Sur la figure ci-dessous, nous avons représenté la déviation en fonction de l'angle d'incidence i . On voit que le minimum de déviation dépend de la longueur d'onde

(représenté par des couleurs). Dans cette figure nous avons représenté le spectre de l'atome de mercure.

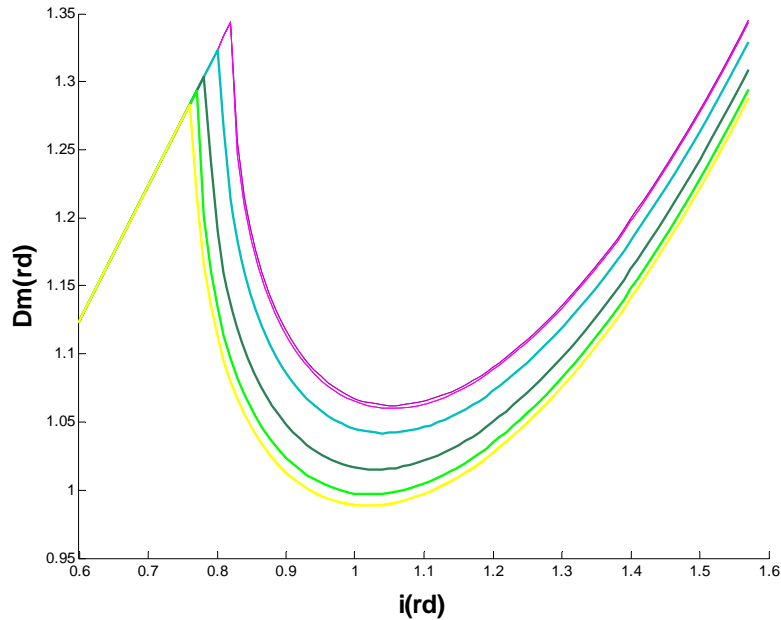


Figure 2-9 : Déviation minimale du spectre de l'atome de mercure.

Remarque : A partir de la déviation minimale, on peut remonter à l'indice de réfraction selon la relation (6) et retrouver la relation de dispersion du prisme, c'est-à-dire $n(\lambda)$. Pour un milieu homogène la relation de Cauchy a la forme suivante :

$$n(\lambda) = B \frac{1}{\lambda^2} + A \quad (2-7)$$

Dans le cas d'un prisme de type "flint", la relation de dispersion est représentée sur la figure 2-10.

Remarque: Le flint fait référence à la matière qui compose le prisme.

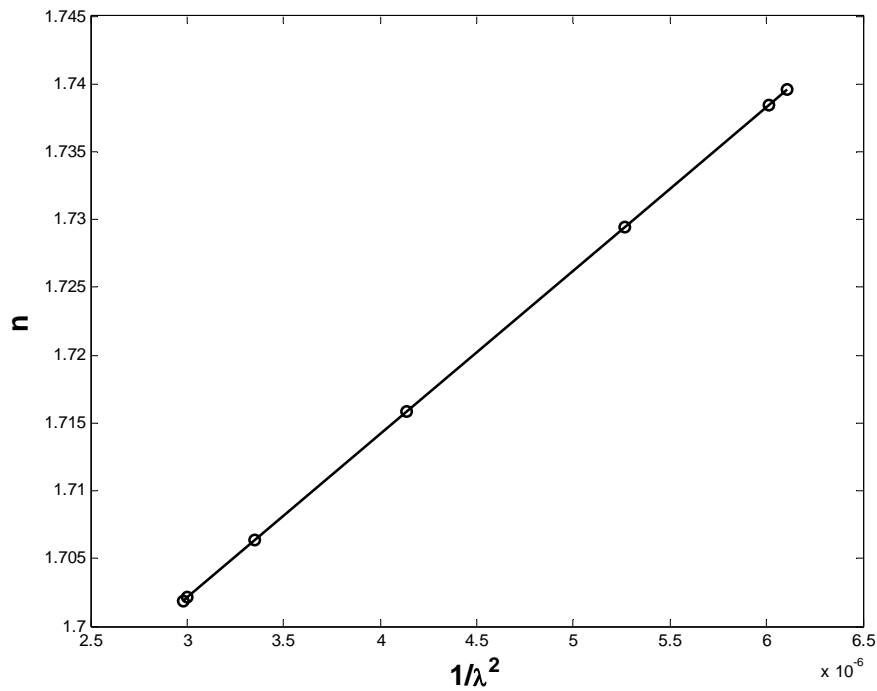


Figure 2-10 : Relation de dispersion du prisme de flint.

7. Relation de conjugaison d'un dioptré plan

Un dioptré plan est la surface qui sépare deux milieux d'indices de réfraction différents. La relation de conjugaison relie la position de l'objet et celle de l'image à travers le dioptré sur l'axe optique.

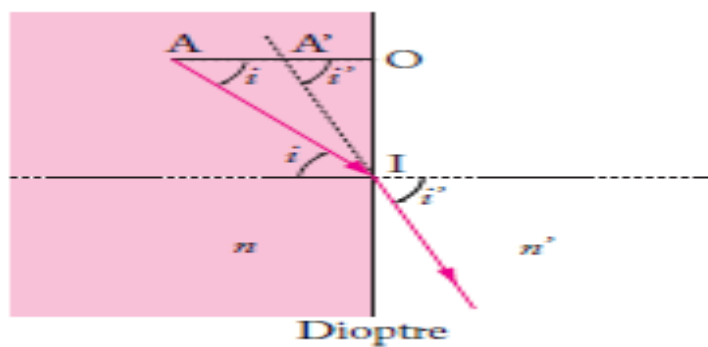


Figure 2-11 : Chemin optique entre les points A et A' [2].

Le chemin optique L entre A et A' est donné par :

$$L = nAI - n'IA'$$

Dans le triangle AOI et A'OI, on'a

$$AI = \frac{OA}{\cos(i)} \text{ et } A'I = \frac{OA'}{\cos(i')}$$

$$L = n \frac{OA}{\cos(i)} - n' \frac{OA'}{\cos(i')}$$

En appliquons le principe de Fermat, on'a

$$\frac{dL}{di} = \frac{nOA \sin(i)}{\cos(i)^2} - \frac{n'OA' \sin(i')}{\cos(i')^2} \frac{di'}{di} \quad (2-7)$$

Avec $n \sin(i) = n' \sin(i')$ et après différentiation, on aura :

$$n \cos(i) di = n' \cos(i') di'$$

En remplaçant di par di' dans l'équation (7), on aura :

$$\frac{dL}{di} = n^2 \sin(i) \cos(i) \left(\frac{OA}{n \cos(i)^3} - \frac{OA'}{n' \cos(i')^3} \right) = 0$$

De cette dernière relation, on déduit que :

$$\frac{n}{OA} = \frac{n'}{OA'} \quad (8)$$

Qui représente la relation de conjugaison d'un dioptré plan

Le grandissement d'un dioptré plan est égal à 1, cela peut être démontré facilement par une construction géométrique.

8. Notion de foyers

8.1. Foyer image

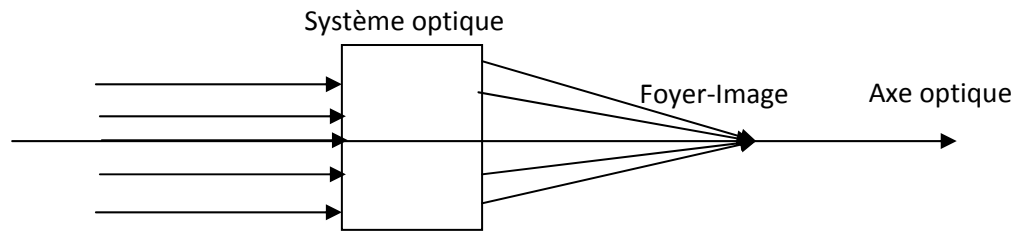


Figure 2-12 : Foyer image d'un système optique.

Lorsque l'objet est situé à l'infini, les rayons qui arrivent sur le système optique sont parallèles à l'axe optique. Le foyer image du système optique représente le point d'intersection des rayons lumineux sur l'axe optique (Figure 2-12).

Remarque : Lorsque les rayons émergents du système ne convergent pas (converge à l'infini), le foyer image dans ce cas est situé à l'infini.

8.2. Foyer objet

Le foyer objet est la position d'un objet dont l'image est située à l'infini.

Exemple

Dans le cas d'un dioptre plan, les foyers objet et image sont situés à l'infini.

8.3. Plan focal objet et plan focal image

Le plan focal objet/image est un plan perpendiculaire à l'axe optique et passe par les foyers objets et image respectivement.

8.4. Propriétés

1/ Les rayons lumineux qui arrivent sur un système optique avec un même angle d'incidence, convergent à la sortie du système optique vers un point situé sur le plan focal image. Les rayons qui passent par un point sur l'axe focal objet émergent du système avec le même angle (figure 2-13).

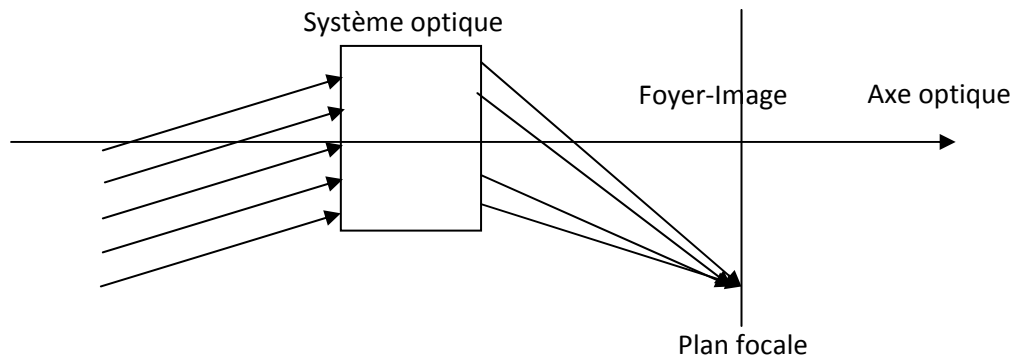


Figure 2-13 : Plan focale image

2/ Un système optique est dit afocal, lorsque les rayons lumineux sont parallèles à la sortie du système.

Relation de conjugaison d'un dioptré et miroirs sphériques

Un dioptré sphérique peut être soit concave ou convexe, selon l'orientation des rayons incidents (Figure 14). Il est caractérisé par un sommet S et un centre C.

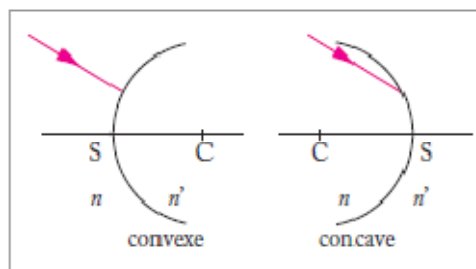


Figure 2-14 : Rayons incidents sur un dioptré concave ou convexe ([2]).

9. Dioptré sphérique

9.1. Relation de conjugaison d'un dioptré sphérique avec origine au sommet

Pour établir la relation de conjugaison du dioptré, nous allons utiliser le principe de Fermat et calculer le chemin optique entre le point objet A et image A' (figure 15).

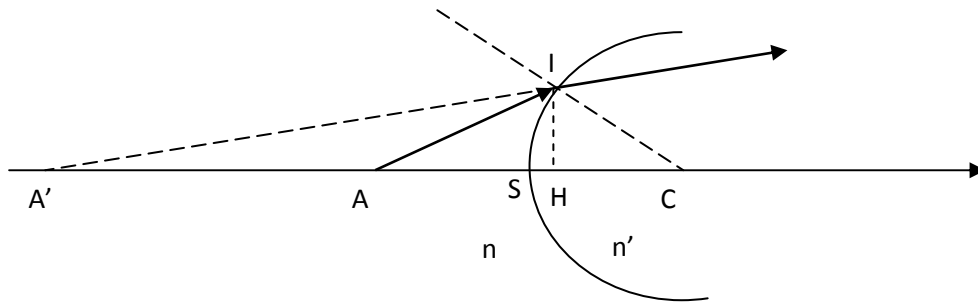


Figure 2-15 : Image d'un objet à travers un dioptré sphérique convexe.

Le rayon est donné par, $R = \overline{SC}$, $p = \overline{SA}$, $p' = \overline{SA'}$ et $x = \overline{HI}$

Le chemin optique est donné par

$$L_{AA'} = np \sqrt{1 + 2 \frac{x}{p} \left(\frac{R}{p} - 1 \right)} - n'p' \sqrt{1 + 2 \frac{x}{p'} \left(\frac{R}{p'} - 1 \right)}$$

Comme le dioptré sphérique n'est pas rigoureusement stigmatique, on se limite aux petits angles d'incidence pour satisfaire la condition de Gauss, pour cela nous considérons ici uniquement le développement limité au premier ordre en x du chemin optique:

$$L_{AA'} \approx np \left(1 + \frac{x}{p} \left(\frac{R}{p} - 1 \right) \right) - n'p' \left(1 + \frac{x}{p'} \left(\frac{R}{p'} - 1 \right) \right)$$

Après minimisation de cette expression par rapport à x , on obtient la relation de conjugaison du dioptré sphérique :

$$\frac{n'}{p'} - \frac{n}{p} = \frac{n' - n}{R} \quad (2-9)$$

Cette relation est valable pour un dioptrics sphérique concave et convexe. Pour un dioptrics concave, on écrit, $\overline{SC} = -R$, où R représente le rayon du dioptrics. Lorsque le dioptrics est convexe, $\overline{SC} = R$.

On retrouve la relation de conjugaison d'un dioptrics lorsque le rayon tend vers l'infini.

Remarque

La relation de conjugaison avec origine au centre est donnée par :

$$\frac{n'}{CA} - \frac{n}{CA'} = \frac{n-n'}{SC} \quad (2-10)$$

9.2. Grandissement du dioptrics sphérique

Le grandissement transversal d'un dioptrics sphérique est donné par :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{np'}{n'p} \quad (11)$$

Cette relation est obtenue dans le cas des petits angles d'incidences (voir la figure 16).

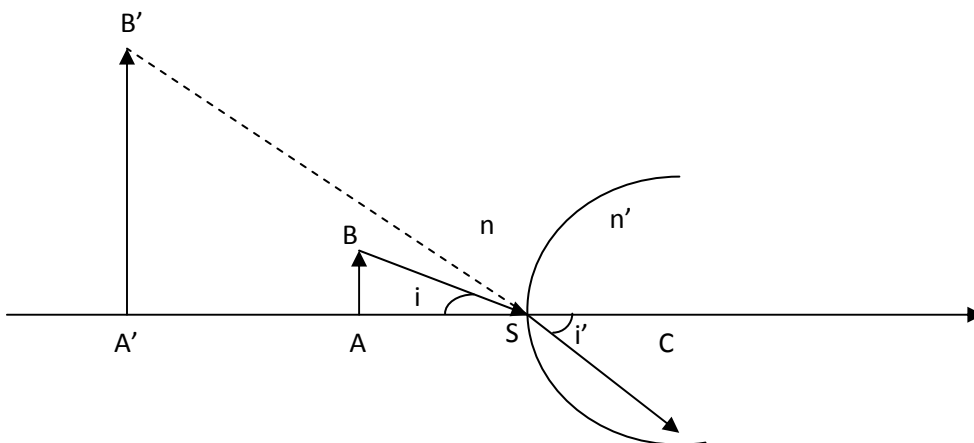


Figure 2-16 : Image d'un objet AB par un dioptrics sphérique convexe ($n > n'$)

Démonstration

$$i \approx \frac{\overline{AB}}{\overline{SA}} = \frac{AB}{p} \text{ et } i' \approx \frac{\overline{A'B'}}{\overline{SA'}} = \frac{A'B'}{p'}$$

D'autre part et selon la loi de Kepler : $n_i = n'_i$

On déduit le grandissement transversal d'un dioptré sphérique donné par la relation (11).

9.3. Foyer objet d'un dioptré sphérique

Le foyer objet F peut être calculé à partir de la relation (10) lorsque p' tend vers l'infini.

$$\overline{SF} = \frac{n\overline{SC}}{n - n'} = f$$

Pour le foyer image F' , p tend vers l'infini.

$$\overline{SF'} = \frac{n'\overline{SC}}{n' - n} = f'$$

9.4. Construction géométrique

L'image d'un point est obtenue en utilisant l'intersection de deux rayons caractéristiques; le premier rayon, il passe par le centre C du dioptré et le deuxième rayon est parallèle à l'axe optique et passe par le foyer image F' .

On choisit le cas d'un dioptré concave et $n > n'$.

1^{er} cas : L'objet AB est situé derrière le 'foyer objet'.

$n=1.5$, $n'=1$, $R=5\text{cm}$, $p=-20\text{cm}$.

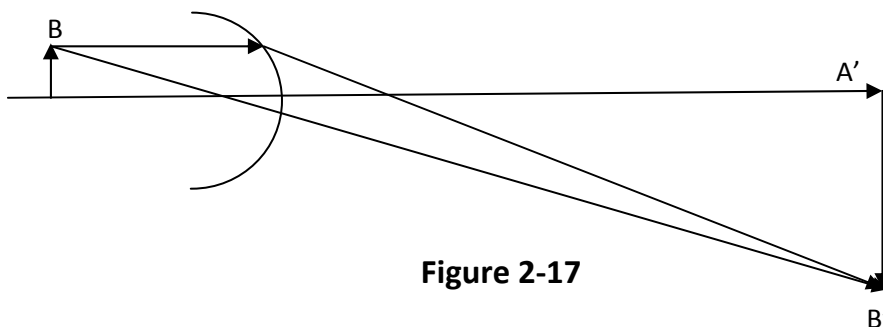


Figure 2-17

$f = -15\text{cm}$, $f' = 10\text{cm}$

$p' = 40\text{cm}$.

Le grandissement transversal est donné par la relation (11) est égal à -3.

Le signe - traduit l'inversion de l'image par rapport à l'objet. On conclut que l'image est réelle, agrandie et inversée.

2^{ème} cas : L'objet AB est situé devant le 'foyer objet'.

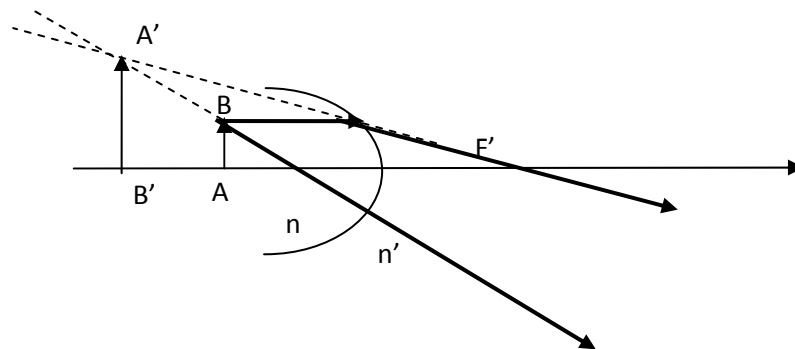


Figure 2-18 : Image d'un objet à travers un dioptré sphérique concave

L'image est virtuelle agrandie dans le même sens que l'objet.

$P' = -20\text{cm}$, le grandissement est égal à 3.

10. Relation de conjugaison d'un miroir sphérique

La relation de conjugaison d'un miroir sphérique peut être déduite facilement de celle du dioptré sphérique en remplaçant n' par $-n$. Dans ce cas, la relation s'écrit :

$$\frac{1}{SA'} + \frac{1}{SA} = \frac{2}{SC} \quad (12)$$

Le foyer objet et le foyer image sont situés au même point qu'on appelle F.

$$\overline{SF} = \frac{\overline{SC}}{2} = \overline{SF'} = f = f'$$

Avec $R = \overline{SC}$

Remarque : la relation de conjugaison d'un miroir plan est donnée par :

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = 0$$

Le grandissement d'un miroir sphérique est donné par :

$$\gamma = \frac{-p'}{p}$$

Dans le cas du miroir plan, le grandissement est égal à 1.

10.1 Construction géométrique de l'image d'un objet à travers un miroir sphérique

1^{er} cas : Objet situé derrière le centre. $p=2R$.

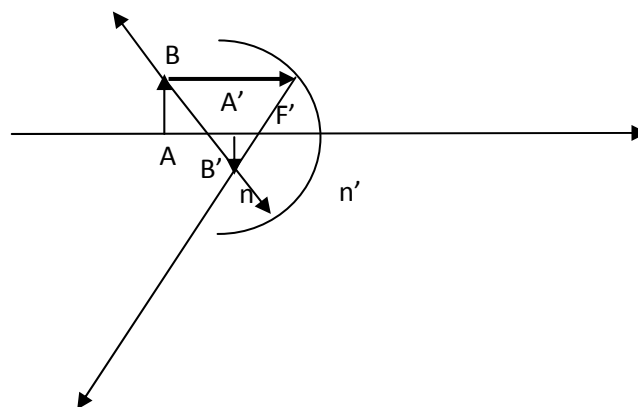


Figure 2-19 : Image d'un objet à travers un miroir sphérique concave

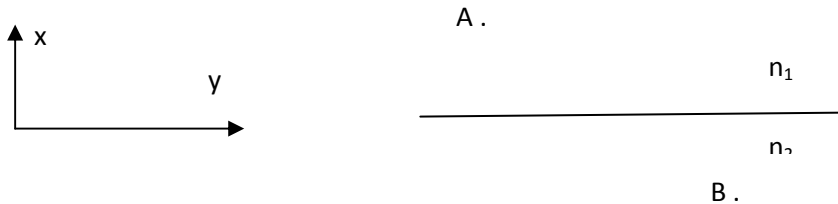
$f' = -R/2$, on appliquant la relation de conjugaison du miroir sphérique (relation 12), on obtient $p' = -2R/3$ et l'agrandissement est égale à $-1/3$. L'image est inversée.

II-8 Exercices d'applications

Exercice 1

Un dioptrics plan sépare deux milieux d'indices de réfraction n_1 et n_2 . On cherche le rayon lumineux qui se propage du point A, dans le premier milieu, vers le point B dans le deuxième milieu. I est le point d'intersection du dioptrics plan avec le rayon.

1. Recopier et compléter le schéma ci-dessus, placer le point I sur le dioptrics plan, le rayon AI puis IB, les angles i_1 et i_2 de ces deux rayons par rapport à la normale au dioptrics passant par I, ainsi que (x_1, y_1) et (x_2, y_2) coordonnées respectives de A et B dans un repère orthonormé Ixy .
2. Exprimer le chemin optique $L(AB)$ en fonction des grandeurs n_1, n_2, x_1, x_2, y_1 et $y = y_2 + y_1$. De combien de variables $L(AB)$ dépend-il ?
3. Retrouver la loi de Snell-Descartes en appliquant le principe de Fermat qui prévoit que le chemin optique est minimal (on dit aussi stationnaire).



Exercice 2

Les rayons du Soleil couchant viennent frapper la surface d'un lac sous une incidence égale à 90° . On assimile l'air au vide d'indice égal à 1 et on prend l'indice de l'eau $n = 4/3$. Un faisceau étroit de rayons est reçu par un poisson.

1. Quelle est pour un poisson dans le lac la direction apparente du Soleil qui se couche ?
2. Existe-t-il une position du Soleil pour laquelle sa direction apparente pour le poisson coïncide avec sa direction réelle ?

Exercice 3

Un poisson se trouve dans un bocal supposé sphérique et dont l'épaisseur est négligée. On note C le centre de ce dioptrics sphérique eau/air et R son rayon. Un observateur en O dans l'air examine le poisson qui se déplace sur l'axe CO du bocal. On donne

$$n(\text{eau}) = 4/3.$$

1. Exprimer le grandissement transverse $\gamma(x)$ en fonction de x , n et R , lorsque le poisson se trouve à la distance x de la paroi du bocal (x est mesuré sur l'axe CO).
2. Tracer la courbe de variation de $\gamma(x)$. Peut-on voir le poisson inversé ?
3. Quelles sont les positions extrêmes de l'image du poisson ?

Exercice 4

On place devant un dioptré sphérique un objet réel perpendiculairement à l'axe optique (voir la figure ci-contre). (R et C sont respectivement le rayon et le centre du dioptré).

1/ Construire les images possibles obtenues de l'objet obtenues par le dioptré sphérique dans les cas suivants :

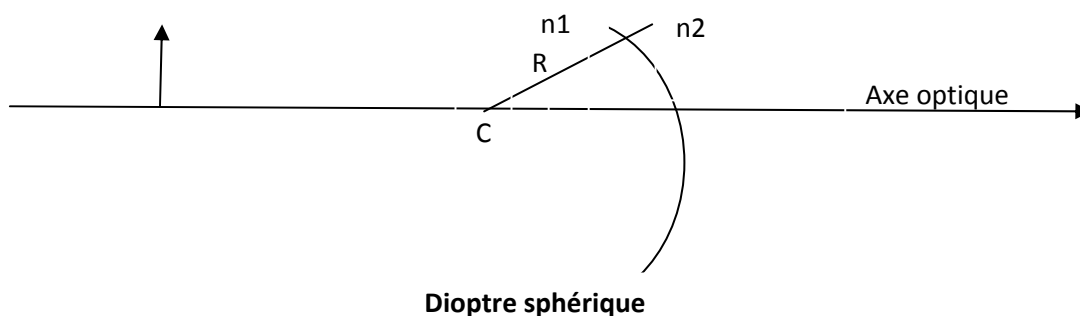
a/ $n_1 < n_2$, l'objet est placé avant le centre du dioptré

b/ $n_1 < n_2$, l'objet est situé devant le centre du dioptré.

c/ $n_1 > n_2$, l'objet est placé avant le centre du dioptré

d/ $n_1 > n_2$, l'objet est situé après le centre du dioptré.

2/ Donner la nature des images construites.



Chapitre 3 : Les lentilles minces

Sommaire

1. Les lentilles en optique géométrique	33
1.1. Lentilles épaisses	33
1.2. Vergence d'une lentille épaisse	34
1.3. Lentilles minces	34
1.4. Vergences des lentilles convergentes et divergentes	35
1.5. Relation de conjugaison d'une lentille épaisse	36
1.6. Foyer objet et foyer image d'une lentille épaisse	36
1.6.1. Foyer image	36
1.6.2. Foyer objet	36
2. Etude des lentilles minces	37
2.1. Relation de conjugaison d'une lentille mince	38
2.2 Grandissement d'une lentille mince	38
2.2. Notations des lentilles convergentes et divergentes	39
2.3. Construction géométrique de l'image d'un objet réel à travers une lentille convergente	39
2.4. Image d'un objet virtuel à travers une lentille convergente	41
2.5. Image d'un objet à l'infini	41
2.6. Lentilles divergentes	42
2.7. La vergence d'une lentille	44
2.8. Formule de conjugaison de Newton	44
3. Association de lentilles	45
4. Exercices d'application sur les lentilles minces	46

1. Les lentilles en optique géométrique

Définition : En optique géométrique, on appelle une lentille, un matériau transparent limité par deux dioptries souvent sphériques ou plans. Lorsque les rayons des dioptries sont comparables à l'épaisseur maximum de la lentille on dit que la lentille est épaisse. Dans le cas où les rayons des dioptries sont très grands devant l'épaisseur de la lentille, celle-ci est considérée comme lentille mince. Avant d'aborder le sujet sur les lentilles minces, nous allons faire un aperçu sur les lentilles épaisses, puis étendre notre étude aux lentilles minces qui sont une approximation utiles dans de multitudes applications lors de la conception des instruments optiques.

1.1. Lentilles épaisses

Une lentille épaisse est constituée de l'association de deux dioptries de rayons R_1 et R_2 , de sommets S_1 et S_2 et de centres C_1 et C_2 . L'image d'un objet par un tel système est obtenue par la méthode suivante : Chercher l'image de l'objet par le premier dioptre qui sera considéré comme objet par rapport au deuxième dioptre (voir le schéma ci-dessous).

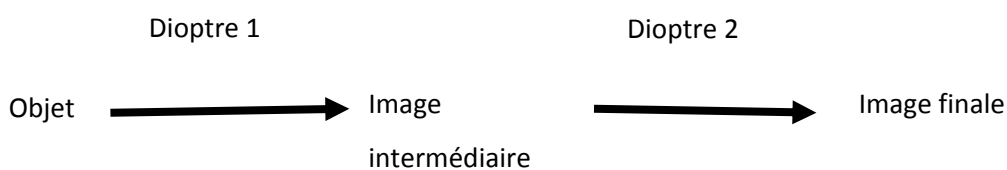


Figure 3-1 : Schéma illustrant le parcours d'un rayon lumineux à travers une lentille

L'image intermédiaire à travers le premier dioptre va jouer le rôle d'un objet par rapport au deuxième dioptre.

Les images, intermédiaire et finale, sont obtenues en utilisant les relations de conjugaisons des deux dioptries (voir chapitre 2). La trajectoire suivi par le rayon incident jusqu'à l'image finale est représentée sur la figure 3-1.

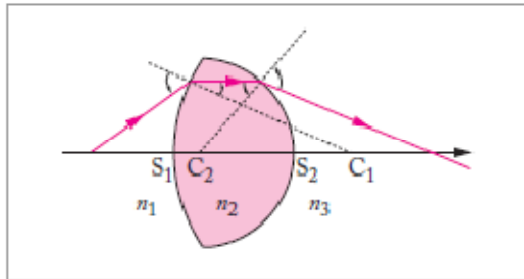


Figure 3-2 : Trajectoire d'un rayon lumineux à travers une lentille épaisse [2].

1.2. Vergence d'une lentille épaisse

Soit une lentille épaisse constituée par deux dioptries de rayons $R_1 = \overline{S_1C_1}$ et $R_2 = \overline{S_2C_2}$.

Les vergences des deux dioptries sont donnés par :

$$V_1 = \frac{n_2 - n_1}{R_1} \quad , \quad V_2 = \frac{n_3 - n_2}{R_2}$$

La vergence équivalente de la lentille est donnée par la formule de Gussstrang.

$$V = \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_3 - n_2}{R_2} - \frac{e_0 (n_2 - n_1)(n_3 - n_2)}{n_2 R_1 R_2}$$

e_0 représente la distance entre les sommets des deux dioptries, S_1 et S_2 .

Dans le cas d'une lentille épaisse se trouvant dans l'air ; $n_1 = n_3 = 1$, $n_2 = n$.

$$V = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{e_0 (n-1)^2}{n R_1 R_2} \quad (3-1)$$

1.3. Lentilles minces

Lorsque les rayons de courbures des deux dioptries composant la lentille sont très grands devant l'épaisseur maximale de la lentille, on peut faire l'approximation et considérer que la lentille est mince.

Dans ce cas, $e_0 \ll R_1$ et $e_0 \ll R_2$ et la relation (1) devient alors :

$$V = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3-2)$$

La vergence d'une lentille en fonction de la distance au centre h est donnée par :

$$V(h) = e_0 - \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3-3)$$

Cette relation représente la vergence d'une lentille mince.

1.4. Vergences des lentilles convergentes et divergentes

La vergence d'une lentille est une grandeur exprimée en m^{-1} , qui représente l'inverse de la distance focale image de la lentille. Les lentilles convergentes sont caractérisées par une vergence positive et les lentilles divergentes par une vergence négative. En s'appuyant sur la relation (2), le signe de la vergence est déterminé par le signe du terme $\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$. Les lentilles convergentes et divergentes sont représentées sur la figure 3-2.

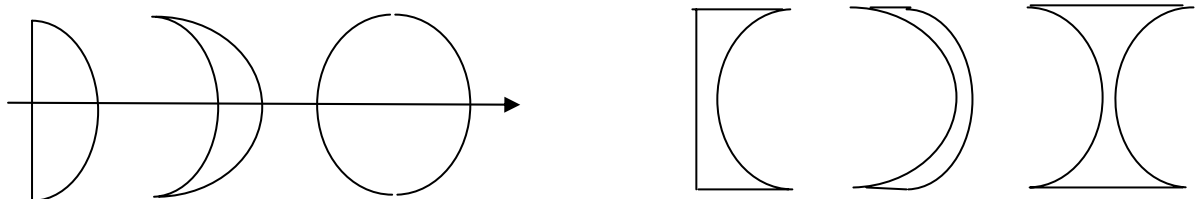


Figure 3-2 : A gauche les lentilles convergentes et à droite les lentilles divergentes.

Remarque : Les lentilles convergentes sont caractérisées par une épaisseur maximale au centre et pour les lentilles divergentes, l'épaisseur est maximale aux bords.

1.5. Relation de conjugaison d'une lentille épaisse

On cherche la relation qui lie la position de l'objet A avec la position de l'image finale A'. A₁ est la position de l'image de l'objet A à travers le premier dioptre (de sommet S₁ et de rayon R₁). L'image finale A' est l'image de A₁ à travers le deuxième dioptre (de sommet S₂ et de rayon R₂).

La relation de conjugaison du dioptre 1 est :

$$\frac{1}{\overline{S_1 A}} - \frac{n}{\overline{S_1 A_1}} = \frac{1-n}{R_1}$$

Celle du dioptre 2

$$\frac{n}{\overline{S_2 A_1}} - \frac{n}{\overline{S_2 A'}} = \frac{n-1}{R_2}$$

De ces deux relations, on déduit :

$$\frac{\overline{S_1 A_1}}{n} = \frac{R_1 \overline{S_1 A}}{R_1 - (1-n)\overline{S_1 A}} = \frac{e_0}{n} + \frac{R_2 \overline{S_2 A'}}{R_2 + (n-1)\overline{S_2 A'}}$$

$$e_0 = \overline{S_1 S_2},$$

La relation de conjugaison exprime $\overline{S_1 A}$ en fonction de $\overline{S_2 A'}$. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\frac{1}{\overline{S_2 A'}} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{1}{\overline{S_1 A}} + \frac{(n-1)}{R_1}\right)} - \frac{e_0}{n}} - \frac{(n-1)}{R_2} \quad (4)$$

C'est la relation de conjugaison d'une lentille épaisse.

1.6. Foyers objets et foyers image d'une lentille épaisse

1.6.1. Foyer image

Le foyer image représente la position de l'image A' , lorsque l'objet A est situé à l'infini. De la relation (4), on déduit que, la position du foyer image F' est donnée par :

$$\frac{1}{S_2 F'} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1 - \frac{n-1}{n} e_0} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (3-5)$$

1.6.2. Foyer objet

$$\frac{1}{S_1 F} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2 + \frac{n-1}{n} e_0} \right] \quad (3-6)$$

2. Etude des lentilles minces

Une lentille est considérée comme mince lorsque son épaisseur est très petite devant les rayons de courbures de ses dioptries. Dans ce cas, on considère $R_1 \approx R_2$ et le terme $(n-1) e_0/n$ est négligeable devant R_1 et R_2 . Dans cette approximation, S_1 et S_2 sont assimilés au même point qu'on note O appelé centre optique de la lentille. L'équation (3-5) devient :

$$\frac{1}{S_2 F'} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] = \frac{1}{f'}$$

f' est la distance focale image de la lentille.

L'équation (6) nous donne la distance focale objet de la lentille :

$$\frac{1}{S_1 F} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] = \frac{1}{f} = -\frac{1}{f'}$$

Conclusion : Le foyer objet et le foyer image d'une lentille mince sont symétrique par rapport au centre optique O de la lentille.

2.1. Relation de conjugaison d'une lentille mince

En appliquant l'approximation de la lentille mince sur l'équation (3-4), on déduit facilement la relation de conjugaison d'une lentille mince suivante.

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f'} \quad (3-7)$$

2.2. Grandissement d'une lentille mince

Le grandissement de la lentille est déduit des grandissements des deux dioptrés.

Le grandissement du premier dioptré est donné par :

$$\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = n \frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA}}$$

Le grandissement du deuxième dioptré

$$\gamma_2 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{1}{n} \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA_1}}$$

Le grandissement de la lentille est

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \gamma_1 \gamma_2$$

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

Remarque

Du fait que le centre optique d'une lentille mince correspond aux points principaux objet et image et aux points nodaux objet et image. Le point O est donc son point conjugué par la lentille. De ce fait, son grossissement angulaire et son grandissement sont égales à l'unité et par conséquent, le rayon qui passe par le point O n'est dévié.

2.3. Notations des lentilles convergentes et divergentes

La figure ci-dessous illustre les symboles utilisés pour les lentilles convergentes et divergentes (figure 3-3).

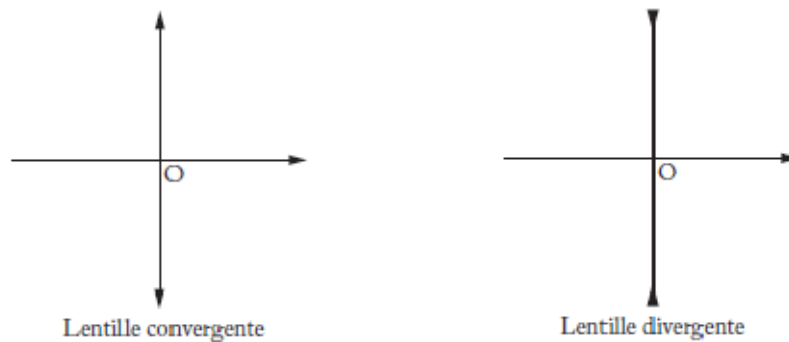


Figure 3-3 : Notation des lentilles

2.4. Construction géométrique de l'image d'un objet réel à travers une lentille convergente

1^{er} cas : Objet situé derrière le foyer objet

Soit une lentille convergente de centre optique O et de foyer objet/image F/F'. On peut construire l'image d'un objet AB à partir de l'intersection de deux rayons. Le rayon issue du point B passe par le point O sans être dévié et le rayon issue de B parallèle à l'axe optique passe par le foyer image (figure 3-4).

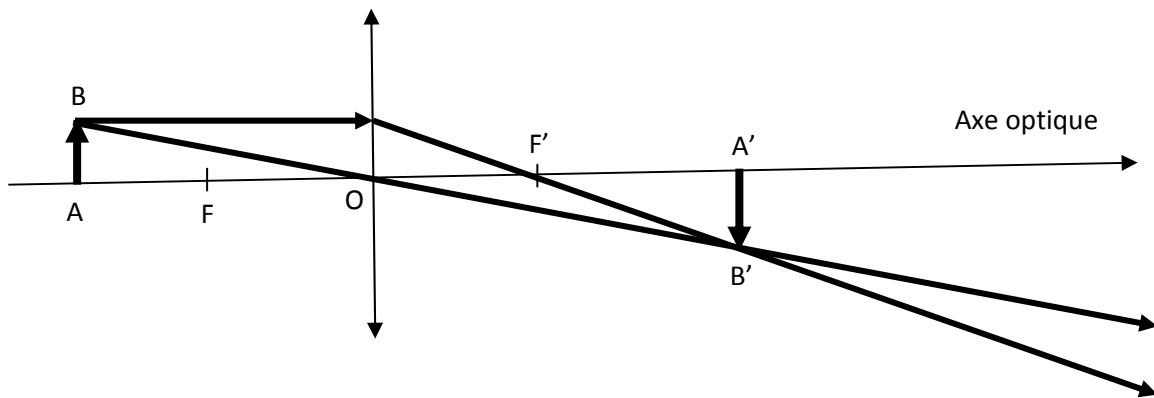


Figure 3-4 : Image d'un objet AB placé derrière le foyer objet à travers une lentille convergente.

Remarque

Dans ce cas, l'image est réelle et inversée et le grandissement dépend de la distance AF.

2^{ème} cas : Objet placé devant le foyer objet F

L'objet AB sera placé dans ce cas entre les points O et F.

L'image est virtuelle et directe (même sens que l'objet).

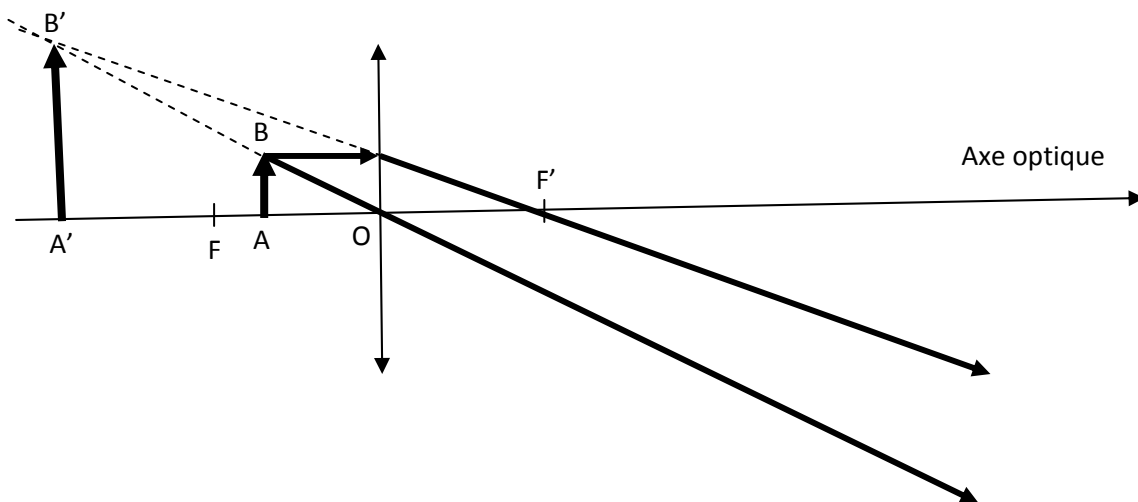


Figure 3-5 : Image d'un objet AB placé devant le foyer Objet d'une lentille convergente.

L'image virtuelle est obtenue par le prolongement des rayons réels.

Remarque

Lorsque l'objet est situé sur le foyer objet, l'image est renvoyée à l'infini.

2.4. Image d'un objet virtuel à travers une lentille convergente

Prenons le cas précédent, où AB est considéré comme un objet virtuel et cherchons son image à travers une lentille convergente.

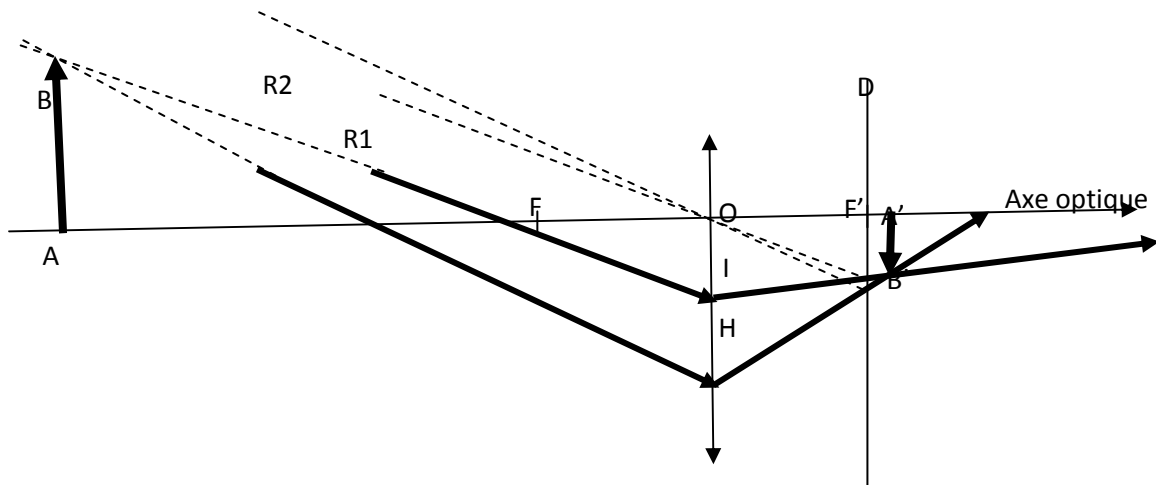


Figure 3-6 : Image d'un objet virtuel à travers une lentille convergente.

Pour retrouver le parcours des rayons BI et BH à la sortie de la lentille, nous avons utilisé l'une des propriétés du plan focal image. En effet, R1 est parallèle à BI et convergent tous les deux vers le même point sur le plan focal (D). R2 est parallèle à BH et convergent vers le même point sur le plan focal image (D). Avec cette méthode, on peut retrouver l'intersection des deux rayons BI et BH qui représente l'image du point B. R1 et R2 sont des rayons qui passent par le point O sans être déviés.

2.5. Image d'un objet à l'infini

Les rayons d'un objet situé à l'infini arrivent parallèles entre eux avec un angle par rapport à l'axe optique. Ces rayons convergent vers un point situé sur le plan focal image de la lentille. Pour déterminer la position sur le plan focal, on utilise le rayon qui passe par le centre O (figure 3-7).

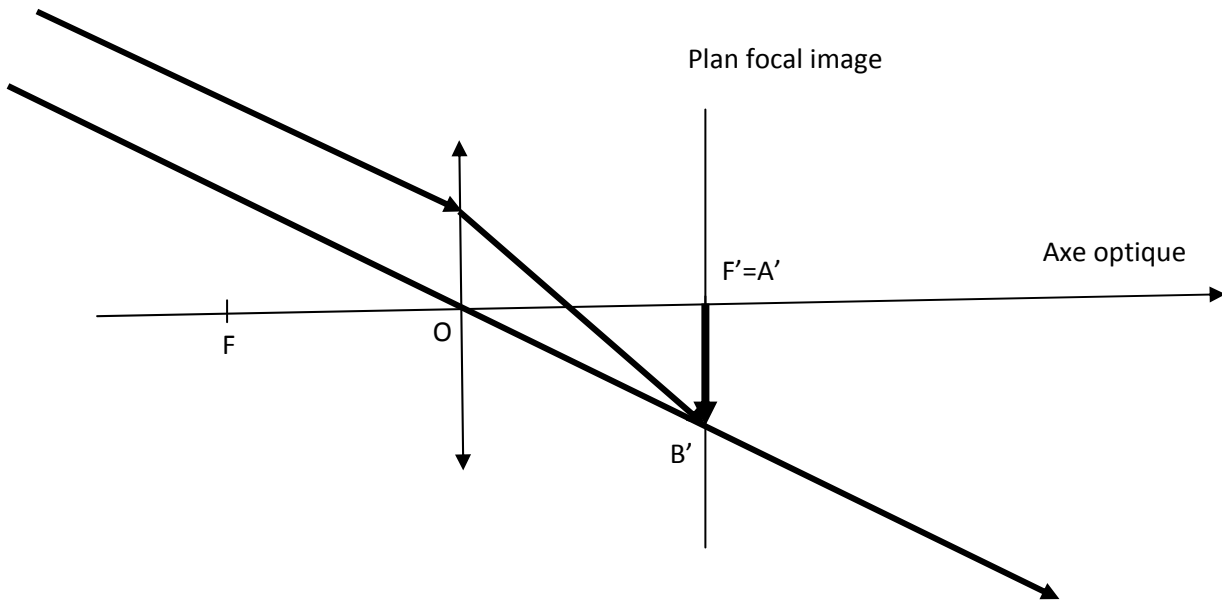


Figure 3-7 : Image d'un objet à l'infini à travers une lentille convergente

2.6. Lentilles divergentes

Les lentilles divergentes sont caractérisées par une distance focal image négative, c'est-à-dire que le foyer image est situé à gauche de la lentille et le foyer objet, à droite de la lentille.

1^{er} cas : Objet situé derrière le foyer image (figure 3-7)

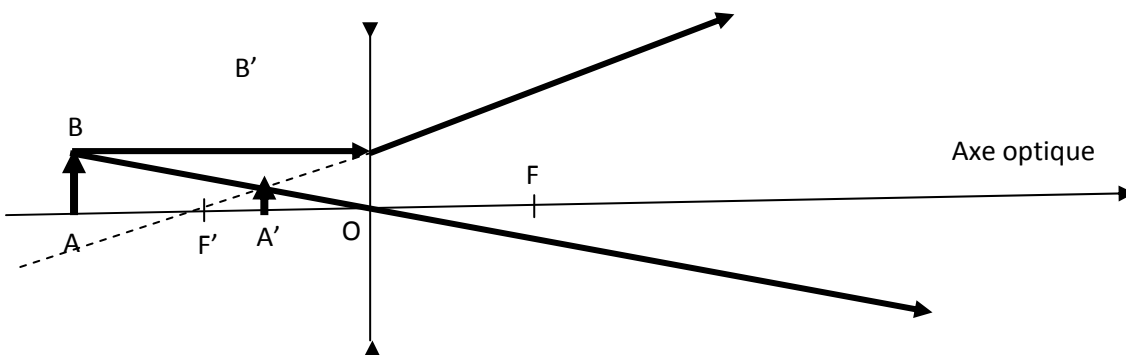


Figure 3-8 : Image d'un objet réel placé entre F' et O à travers une lentille divergente. L'objet est réel, l'image est virtuelle est directe et le grandissement est inférieur à 1.

2^{ème} cas : Objet placé entre F' et O (figure 3-8)

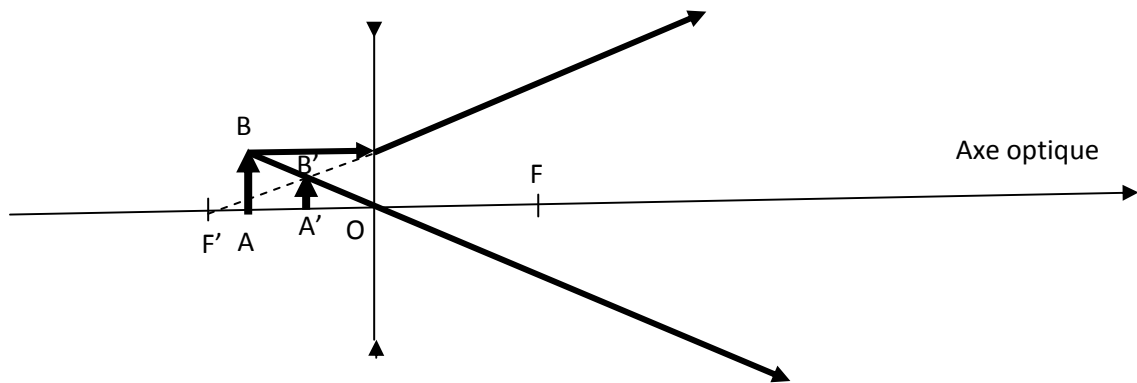


Figure 3-9 : Image d'un objet à travers une lentille divergente

Image d'un objet situé à l'infini

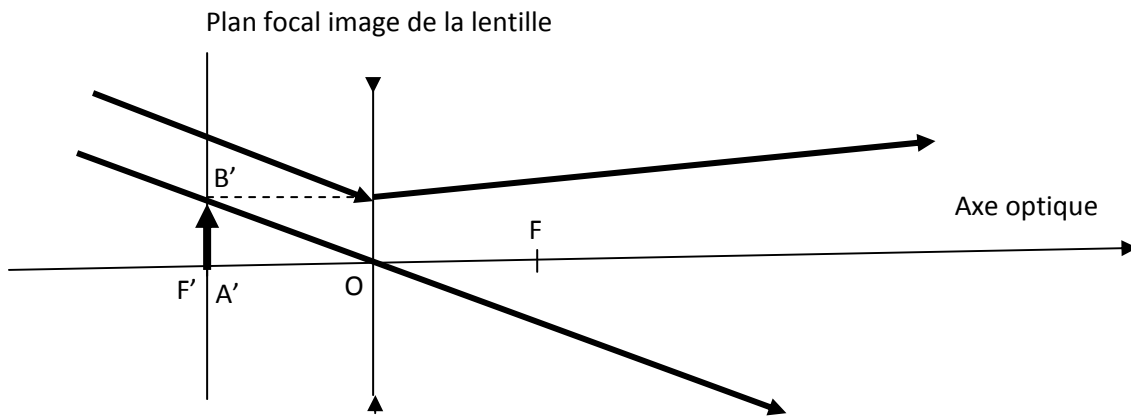


Figure 3-10 : Image d'un objet situé à l'infini

Grandissement angulaire d'une lentille

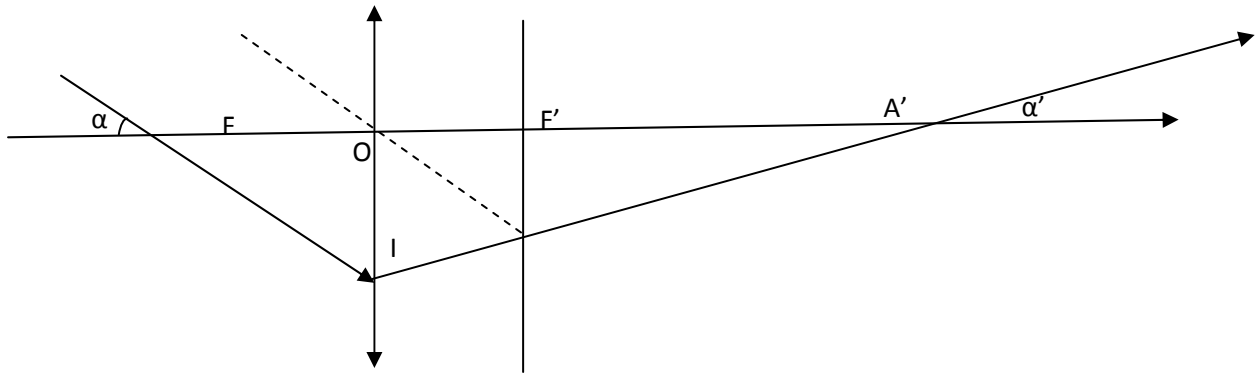


Figure 3-10 : Grandissement angulaire $g(\alpha) = \frac{\alpha'}{\alpha}$ d'une lentille mince.

Par définition, le grandissement angulaire d'une lentille est donné par la relation :

$$g(\alpha) = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

Démonstration :

Sur la figure 3-10, lorsque les angles α et α' sont petits, on'a :

$$\alpha' = \frac{\overline{IO}}{\overline{OA'}} \text{ et } \alpha = \frac{\overline{IO}}{\overline{OA}}$$

$$g(\alpha) = \frac{\overline{OA}}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\gamma}$$

Remarque

Cette formule est utilisée, lorsqu'on ignore la taille de l'objet mais l'angle d'incidence est connu (objet situé à l'infini).

2.7. La vergence d'une lentille

La vergence d'une lentille est égale à l'inverse de la distance focal image. Elle peut être positive ou négative. L'unité de la vergence est le dioptre (m^{-1}). Cette grandeur exprime le degré de convergence ou de divergence d'une lentille.

2.8. Formule de conjugaison de Newton

La formule de conjugaison de Newton est la relation de conjugaison avec origine aux foyers.

Le grandissement peut être écrit sous la forme :

$$\gamma = -\frac{f}{\overline{FA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'}$$

On obtient la relation de conjugaison d'une lentille mince non symétrique :

$$\overline{FAF'A'} = ff'$$

Pour une lentille symétrique

$$\overline{FAF'A'} = -f'^2$$

3. Association de lentilles

Vergence des lentilles accolées

Pour des raisons pratiques, on peut associer plusieurs lentilles pour avoir la bonne distance focale. Lorsque les lentilles se touchent et toutes sont perpendiculaires à l'axe optique, on dit qu'elles sont accolées. On cherche la relation entre la vergence de la lentille équivalente et les lentilles qui la composent.

La vergence de la lentille équivalente est égale à la somme des vergences des lentilles associées.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_N$$

Le grandissement de la lentille équivalente est égal au produit de tous les agrandissements des lentilles associées.

Ce résultat est appliqué dans le cas de l'association de plusieurs lentilles accolées [2].

$$\gamma = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_N$$

Le centre optique de la lentille équivalente est situé au centre du système de lentilles.

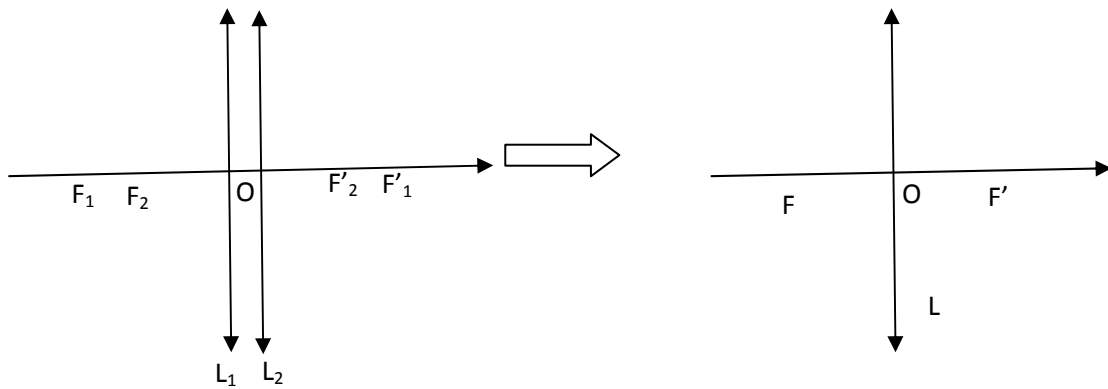


Figure 3-11 : Lentille équivalente

Démonstration

L'image de l'objet A à travers la première lentille L_1 est un objet par rapport à la deuxième lentille. L'image de A_1 à travers L_2 est A'

L_1 est caractérisée par les foyers objet et image F_1 et F'_1 , la deuxième lentille par F_2 et F'_2 .

La relation de conjugaison des lentilles sont données par :

$$\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1}$$

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = \frac{1}{f'_2}$$

A partir de ces deux relations, on obtient la relation de conjugaison de la lentille équivalente:

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'}$$

A partir de cette relation, on déduit que la distance focale de la lentille équivalente f' est donnée par la relation :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$$

Ce résultat est valable pour N lentilles.

Exercices d'application sur les lentilles minces

Exercice 1

Un objet lumineux AB de 6cm de hauteur est placé, perpendiculairement à l'axe optique d'une lentille mince convergente de distance focale 5cm, à 20cm devant celle-ci. Le point A est sur l'axe principal.

1/ Déterminer, en utilisant les formules de conjugaison des lentilles, la position, la nature, le sens et la hauteur de l'image A'B'.

Réponse : $OA' = 6.7\text{cm}$, l'agrandissement est : -0.335 , $A'B' = -2.01\text{cm}$.

2/ confirmer le calcul par une représentation géométrique.

Exercice 2

Un objet lumineux AB de 5cm de hauteur est placé, perpendiculairement à l'axe optique d'une lentille mince convergente de distance focale 25cm. Le point A est sur l'axe principal.

1/ Déterminer par le calcul, la position, la nature, le sens et la grandeur de l'image dans les quatre cas suivants. Vérifier pour chaque cas le résultat par une construction géométrique.

1/ L'objet est à 2m de la lentille ($OA = -2\text{m}$)

2/ L'objet est à 50cm de la lentille ($OA = -50\text{cm}$)

3/ L'objet est à 20cm de la lentille

4/ L'objet est à 15cm de la lentille

Réponses : $OA' = 28.6, 50\text{cm}, -100\text{cm}, -37.5\text{cm}$

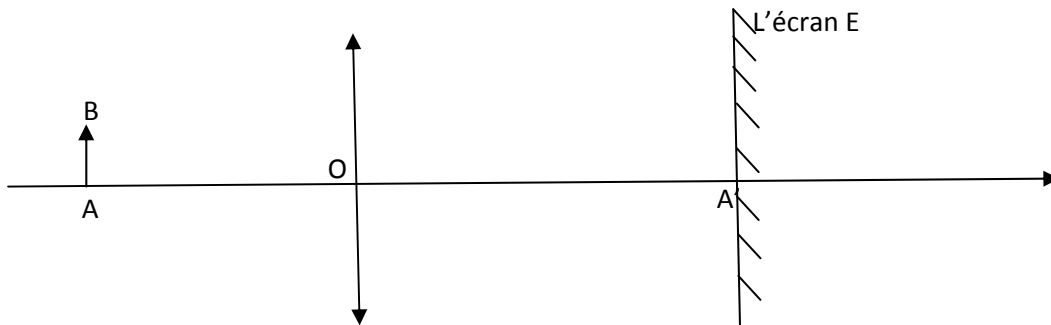
Image : réelle, réelle, virtuelle, virtuelle

$AB' = -0.7\text{cm}, -5\text{cm}, 25\text{cm}, 12.5\text{cm}$

Exercice 03

On assimile l'objectif d'un appareil photographique à une lentille mince convergente de centre optique O et de distance focale image f' que l'on se propose de déterminer.

La pellicule est représentée l'écran (E), la mise au point ayant été faite pour obtenir une image nette sur l'écran (voir la figure ci-dessous).



1. Sur la figure reproduite à l'échelle $\frac{1}{2}$.
 - a/représenter la lentille
 - b/construire l'image A'B' de AB sur l'écran (E).
 - c/déterminer la position du foyer image F', en déduire la position du foyer objet F.
 - d/déterminer la distance focale image f' de la lentille.
2. en appliquant les formules de conjugaison, calculer la distance focale f' , comparer avec le résultat obtenu géométriquement.

Exercice 4 (lentille épaisse)

Soit une lentille épaisse constituée par deux dioptries sphériques S_1 et S_2 ayant les centres C_1 et C_2 respectivement. On donne :

$$\overline{S_1 C_1} = 2cm \text{ et } \overline{S_2 C_2} = -2cm. \text{ Le sens est déterminé par la direction de l'axe optique.}$$

1/Peut-on considérer cette lentille comme mince

2/sans faire l'approximation d'une lentille mince, déterminer :

a/la relation de conjugaison de la lentille

b/déterminer les foyers objet et image de la lentille

3/dans le cas où la lentille est considérée comme mince, c'est-à-dire : $\overline{S_1 S_2} = 0$,

a/écrire la relation de conjugaison de la lentille

b/ déterminer les foyers objet et image de la lentille

c/comparer aux résultats obtenus dans le question 2.

Exercice 5

La vergence d'une lentille convergente est égale à $V_1=2\delta$, déterminer la valeur de la lentille divergente qu'on doit placer devant la première lentille pour avoir une lentille de vergence $V=1 \delta$.

Chapitre 4 : Instruments optiques

Sommaire

1. Introduction	50
2. La loupe	50
2.1. Grandissement linéaire d'une loupe	50
2.2. La puissance d'une lentille	51
2.2.1. Pour un œil placé sur le plan focal image de la lentille (puissance intrinsèque)	51
2.2.2. Œil placé dans le plan de la lentille	52
2.3. Le grossissement d'une loupe	52
2.4. Grossissement commercial d'une loupe	52
2.5. Exercice d'application	53
3. Microscope optique	53
3.1. Principe du microscope optique	53
3.2. Image d'un objet par un microscope optique	54
3.3. Représentation géométrique	54
3.4. Puissance d'un microscope	55
3.5. Puissance intrinsèque d'un microscope	55
3.6. Grossissement d'un microscope optique	56
4. La lunette astronomique	57
4.1. La lunette de Galilée	57
4.2. Grossissement de la lunette de Galilée	58
5. Etude de l'œil en optique géométrique	58
5.1 Anatomie de l'œil	59
5.2. Phénomène d'accommodation	60
5.3. Punctum proximum	60
5.4. Punctum remotum	60
5.5. Amplitude d'accommodation	60
5.6. Les défauts de la vision	60
5.6.1. L'œil myope	60
5.6.2. L'œil hypermétrope	62
5.6.3. L'œil astigmatique	62
a/ Astigmatisme simple	63
b/ Astigmatisme composé	63
6. Exercices d'application	64

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier quelques instruments optiques utilisés souvent pour agrandir des objets très petits ou des objets situés à de très grandes distances. Un instrument optique est constitué de plusieurs systèmes simples comme les lentilles, les dioptrés ou miroirs. Dans ce chapitre, il y a lieu d'étudier la loupe, l'œil, la lunette astronomique et le microscope.

2. La loupe

La loupe est un instrument optique simple constitué d'une lentille convergente de faible distance focale. Elle est utilisée pour obtenir d'un objet réel une image virtuelle agrandie. Pour cela, il faut placer l'objet entre le foyer objet et le centre de la lentille (figure 4-1).

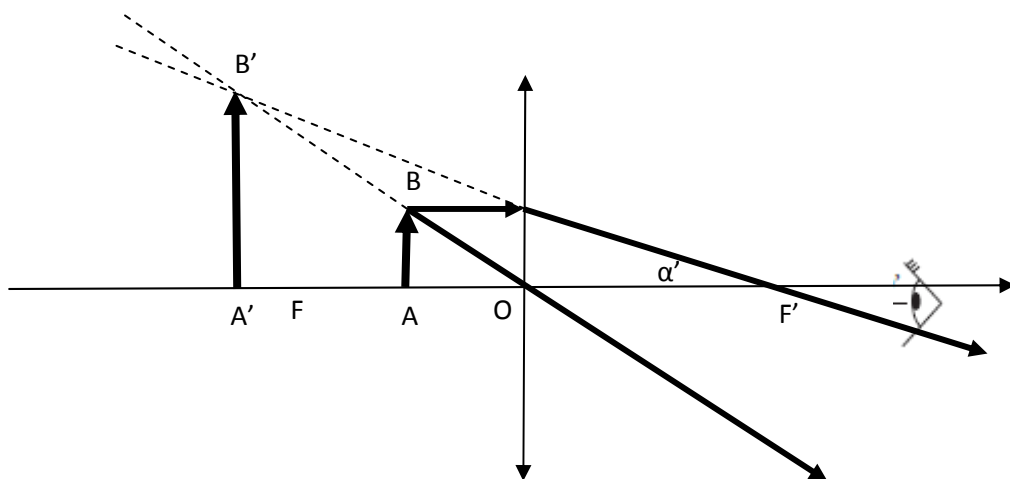


Figure 4-1 : Image d'un objet à travers une loupe.

2.1. Grandissement linéaire d'une loupe

Le grandissement linéaire d'une loupe est donnée par :

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

2.2. La puissance d'une lentille

C'est le rapport entre le rapport du diamètre angulaire apparent de l'image α' et la taille de l'objet AB. Elle est donnée en dioptrie.

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

On a (figure 4-3),

$$\alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{O'A'}} = \frac{\overline{A'B'}}{\delta}$$

Ce qui implique :

$$P = \frac{\gamma}{\delta}$$

Avec $\delta = \overline{O'A'}$, qui représente la distance de visé qui est lié à la vision, puisque l'image est virtuelle et ne sera visible que directement par l'œil.

En utilisant la relation de conjugaison avec origine aux foyers, nous avons :

$$\gamma = \frac{\overline{F'A'}}{f'}$$

La puissance devient :

$$P = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{\overline{F'O'}}{\delta} \right)$$

2.2.1. Pour un œil placé sur le plan focal image de la lentille (puissance intrinsèque)

$$\overline{F'O'} = 0$$

La puissance est donnée par :

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

2.2.2. Œil placé dans le plan de la lentille

Dans ce cas : $\overline{F'O'} = -f'$, soit :

$$P = \frac{1}{f'} \left(1 + \frac{f'}{\delta}\right)$$

2.3. Le grossissement d'une loupe

Le grossissement d'une loupe est le rapport de l'angle α' avec lequel on voit l'image et l'angle sous lequel on voit l'objet figure 4-2.

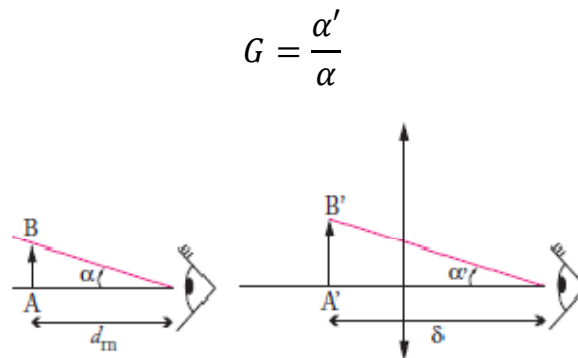


Figure4-2 : A gauche: vision de l'objet à la distance minimale de vision distincte. A droite vision de l'image à travers la loupe à la distance δ [1].

Dans le cas des petits angles :

$$\alpha = \frac{\overline{AB}}{d_m} \text{ et } \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\delta}$$

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = P d_m$$

2.4. Grossissement commercial d'une loupe

Il est donné pour un œil normal (emmétrope), pour lequel $d_m=25\text{cm}$ et un œil placé au foyer image de la loupe. Le grossissement est donné par la relation :

$$G = G_C = \frac{P_i}{4}$$

Dans le cas où l'œil est placé en contact avec la loupe, on a :

$$G = \frac{d_m}{f'} \left(1 + \frac{f'}{\delta}\right)$$

2.5. Exercice d'application

Une lentille convergente de vergence $V = 25 \delta$ est utilisée comme loupe. On place un objet AB de 1 cm de hauteur, à 1 cm de son foyer objet, entre le foyer et la lentille.

1.a. Réaliser la construction géométrique à l'échelle 1/2 suivant l'axe optique et à l'échelle 1 dans la direction perpendiculaire de l'objet AB et de son image A'B' à travers la lentille.

b. Quelle est la nature de l'image obtenue ?

2.a. Trouver par le calcul la position de cette image en fonction du point O, centre optique de la lentille.

b. Quelle est la taille de l'image A'B' ?

Un observateur se place au point F', foyer image de la lentille.

3.a. Sous quel angle α' voit-il l'image A'B' ?

b. Calculer l'angle α sans loupe quand l'œil est placé à $D_m = 25$ cm de AB.

c. En déduire le grossissement G de la loupe.

4. Calculer la distance minimale entre deux points XY, vus en utilisant la loupe sachant que l'œil ne peut séparer deux points vus sous un angle égal à une minute d'arc ($\theta = 3 \cdot 10^{-4}$ rad).

3. Microscope optique

3.1. Principe du microscope optique

Le microscope optique est un système composé de deux lentilles convergentes. L'objectif étant d'agrandir des objets très petits pour être visibles à l'œil nu. L'idée de base est d'utiliser la première lentille pour former une image intermédiaire qui va être agrandie par la deuxième lentille. La distance entre les deux lentilles est très importante, elle est ajustée pour obtenir une image finale nette. Le microscope optique est utilisé généralement dans le domaine du visible. Sur la figure 4-3, est représenté un schéma du microscope optique.

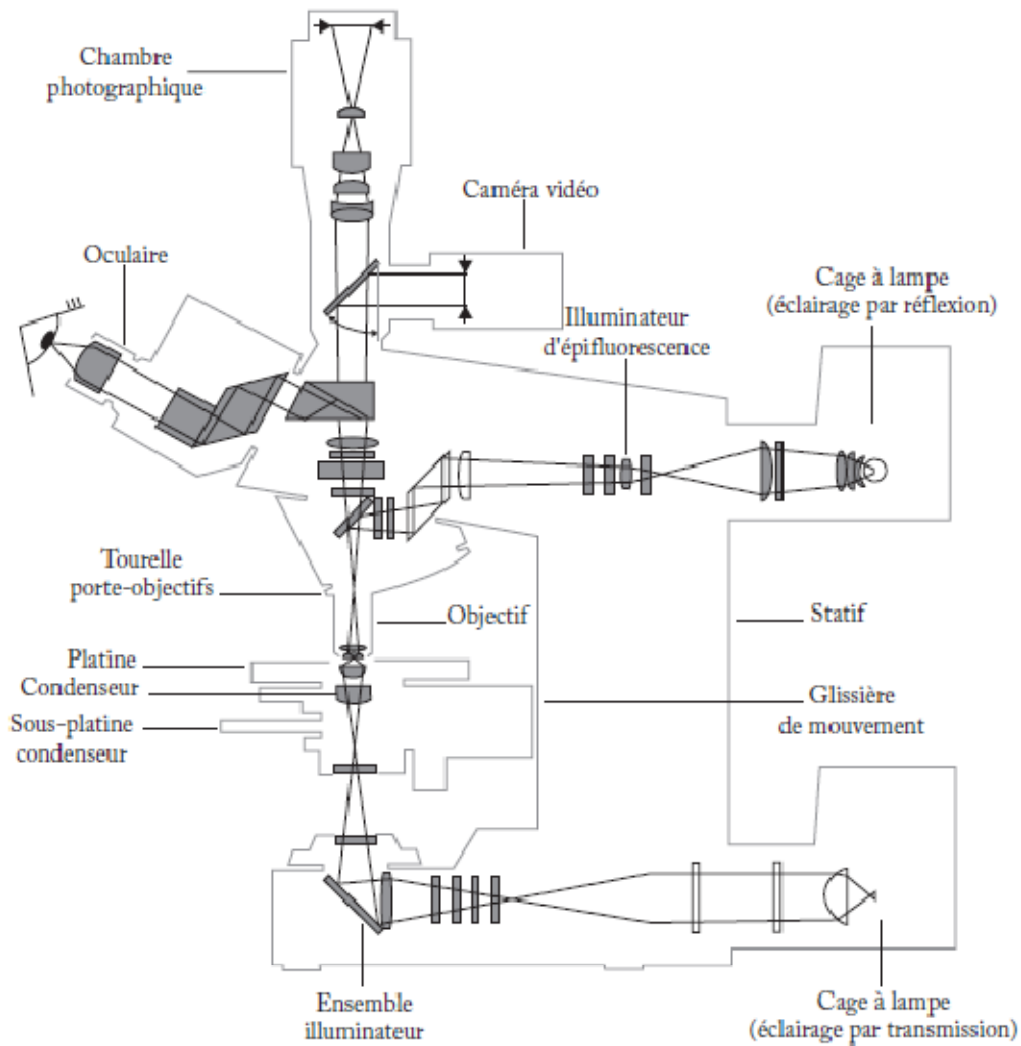


Figure 4-3 : Schéma du microscope optique.

3.2. Image d'un objet par un microscope optique

3.3. Représentation géométrique

Comme montré sur la figure 4-3, le microscope optique est composé de deux lentilles (L_1) et (L_2) de centres O_1 et O_2 de foyers objet/image F_1/F'_1 et F_2/F'_2 respectivement. La distance entre le foyer image de la première lentille et le foyer objet de la deuxième lentille est noté Δ . L'image intermédiaire est notée A_1B_1 qui est réelle et inversée. L'image finale $A'B'$ est virtuelle et inversée. α' est l'angle sous lequel on voit l'objet final.

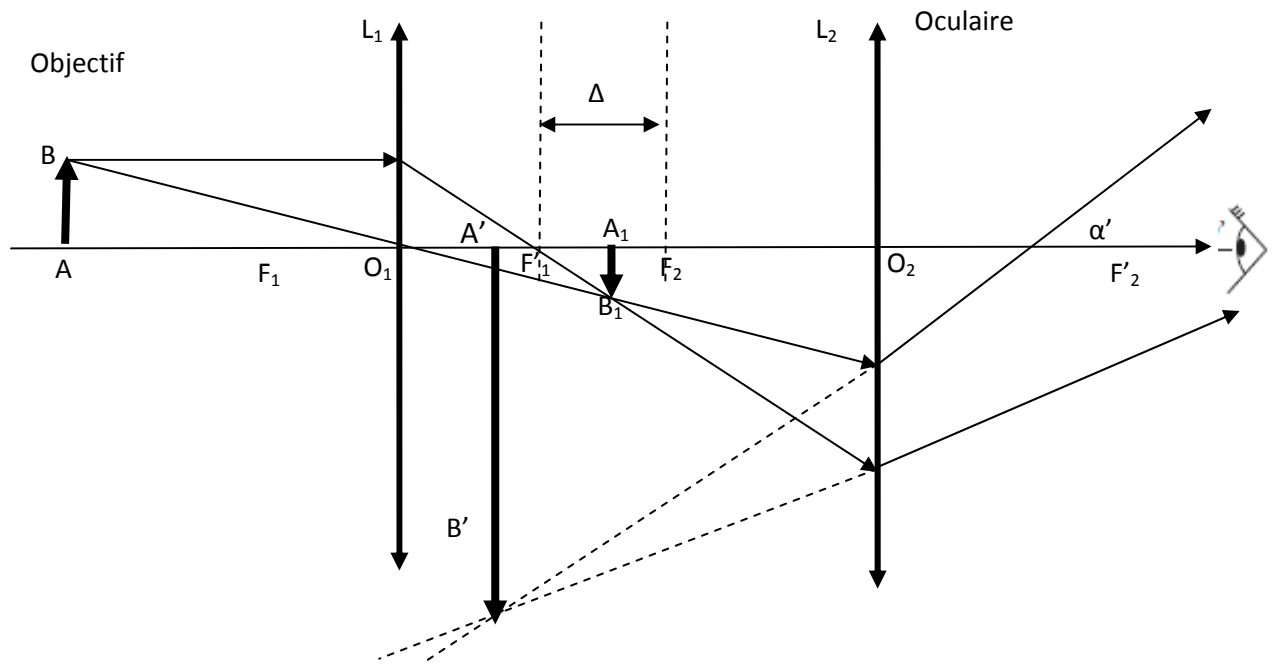


Figure 4-4 : Trajet des rayons lumineux à travers un microscope.

3.4. Puissance d'un microscope

La puissance d'un microscope est définie comme le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image finale α' sur la dimension de l'objet AB . Elle est égale au produit du grandissement de la première lentille (objectif) et de la puissance de l'oculaire P_2 .

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\alpha'}{A_1B_1} \frac{\overline{A_1B_1}}{AB} = \gamma_1 P_2, \quad \gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{AB} \quad \text{et} \quad P_2 = \frac{\alpha'}{A_1B_1}$$

Plus cette puissance est grande, plus l'objet est agrandi et plus on peut voir des objets petits.

3.5. Puissance intrinsèque d'un microscope

La puissance intrinsèque d'un microscope est obtenue lorsque la mise au point est réalisée, c'est-à-dire que l'image finale est renvoyée à l'infini, pour cela il faut que l'image intermédiaire A_1B_1 est située sur le plan focal objet de la deuxième lentille et A_1 coïncide avec F_2 . Dans ce cas, on'a :

$$\gamma_1 = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{O_1 I}} = \frac{\overline{F'_1 F_2}}{\overline{F'_1 O_1}} = \frac{\Delta}{f'_1}$$

$$P_2 = \frac{\alpha'}{\overline{A_1 B_1}} = \frac{\tan(\alpha')}{\overline{A_1 B_1}} = \frac{1}{f'_2}$$

La puissance intrinsèque du microscope est donnée par

$$P_i = \frac{\Delta}{f'_1 f'_2}$$

Cette puissance est exprimée en dioptrie.

3.6. Grossissement d'un microscope optique

C'est le rapport de l'angle α' sous lequel est vu l'image finale $A'B'$ sur l'angle sous lequel on voit l'objet AB , à la distance minimum de vision distincte (d_m).

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = P \overline{AB} \frac{d_m}{\overline{AB}} = P d_m$$

Pour la valeur de d_m , les fabricants ont choisi la valeur de 25cm qui correspond au punctum proximum (PP) d'un œil emmétrope (œil normal).

Le grossissement commercial est donnée par :

$$G_C = \frac{P_i}{4} = \frac{\Delta}{4f'_1 f'_2}$$

Le pouvoir séparateur d'un microscope est donné par :

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{P}$$

est le pouvoir séparateur de l'œil.

4. La lunette astronomique

La lunette est constituée uniquement de lentilles, elles sont utilisées pour voir des objets situés à de grandes distances, qui sont inaccessible par l'œil nu, par exemple les planètes où pour voir des objets en mer. Les lunettes les plus simples sont constituées de deux lentilles, l'objectif et l'oculaire, ces lentilles sont disposées de tel sorte à avoir un système afocal qui permet de voir l'image par l'œil sans accommodation. Le grossissement de la lunette dépend des caractéristiques des lentilles utilisées. Il existe plusieurs lunettes astronomiques, et leur puissance dépendent de la nature des lentilles utilisées. La puissance de ces instruments est limitée à cause de l'aberration chromatique.

4.1. La lunette de Galilée

Elle est constituée de deux lentilles, une lentille convergente comme objectif et une lentille divergente comme oculaire. Le foyer image de la première lentille F'_1 , coïncide avec le foyer objet de la deuxième lentille F_2 . Le principe de fonctionnement est représenté sur la figure 4-5.

L'objet est situé à l'infini et les rayons qui arrivent sur le première lentille sont parallèles. Les prolongements de ces rayons à la sortie de la deuxième lentille doivent converger sur un point sur le plan focal image de la première lentille qui est le même que le foyer objet de la deuxième lentille. De cette façon, on peut déterminer la position de l'image intermédiaire A_1B_1 , qui est une image virtuelle inversée. Les directions des deux prolongements des rayons à travers la 2^{ème} lentille sont déterminées en traçant des rayons parallèles à ces derniers qui vont se rencontrer sur le plan focal image de la lentille L_2 . Les rayons réels sont dirigés dans la direction opposée et on regardant en face de ces rayons qu'on peut voir l'image avec l'œil nu. L'image finale se forme à l'infini et elle est virtuelle. Cette lunette permet de voir l'image finale sans accommodation puisque les rayons qui émergent de la deuxième lentille sont parallèles. Le segment de droite qui passe par le centre de la lentille L_2 est utilisé uniquement pour tracer le parcours émergent de la deuxième lentille.

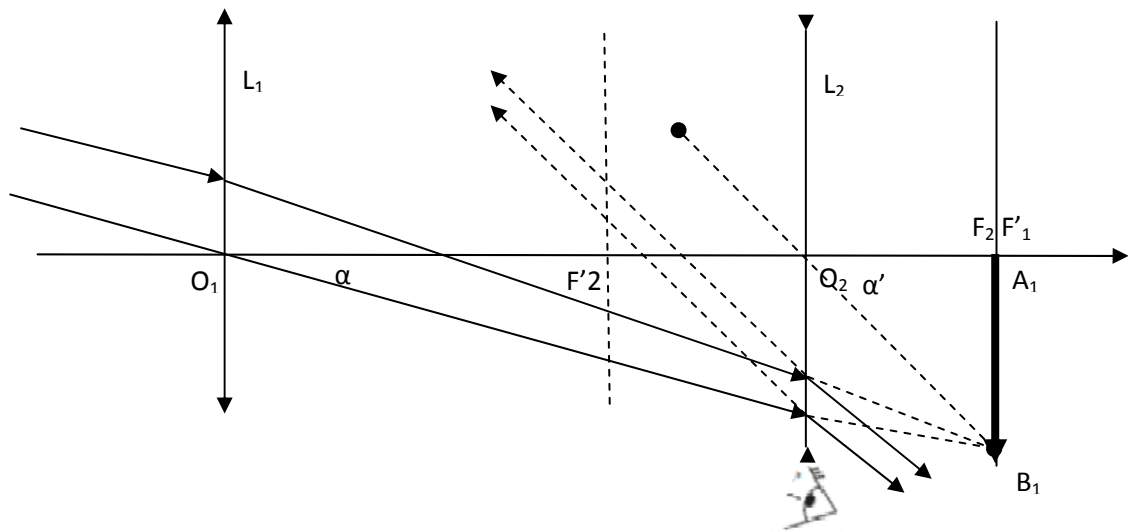


Figure 4-5 : Principe de fonctionnement de la lunette de Galilée.

4.2. Grossissement de la lunette de Galilée

On'a :

$$\tan(\alpha') = \alpha' = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1} = \alpha$$

Le grossissement est donné par :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_1}{-f'_2}$$

5. Etude de l'œil en optique géométrique

L'œil humaine est un organe d'environ 2.5cm de diamètre, utilisé pour la vision dans le domaine de la lumière visible. Il est assimilé à une lentille convergente de distance focale variable. La variation de la distance focale du cristallin est assurée par des muscles qui sont contrôlés par le cerveau. Ce phénomène s'appelle l'accommodation qui permet d'avoir une image nette sur la rétine d'un objet, lorsque la distance à l'œil change.

5.1. Anatomie de l'œil

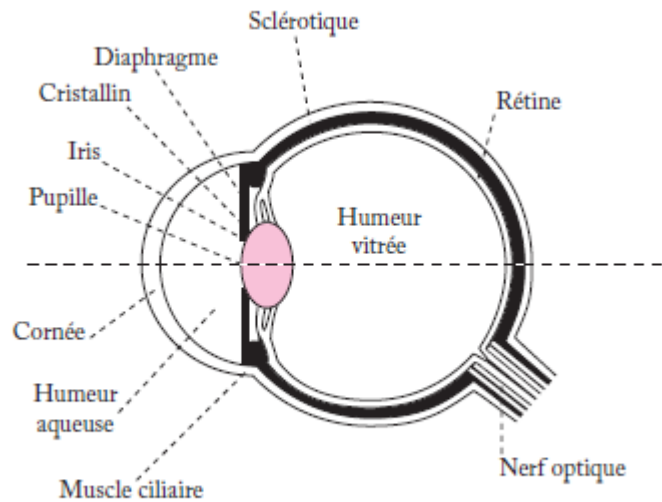


Figure 4-6 : L'anatomie de l'œil [2]

La cornée : est une membrane transparente directement en contact avec l'extérieur.

Humeur aqueuse : c'est un liquide transparent d'indice de réfraction de 1.33.

L'iris : est un diaphragme qui permet de contrôler l'intensité de la lumière qui rentre dans l'œil, sa couleur détermine la couleur des yeux.

La Pupille : c'est un orifice au centre de l'iris, son diamètre varie selon l'intensité de la lumière.

Le cristallin : Il est assimilé à d'une lentille convergente variable, il est responsable du phénomène d'accommodation qui permet d'avoir une image nette sur la rétine. Il contient un liquide transparent d'indice 1.44.

Humeur vitrée : c'est un liquide d'indice de réfraction 1.33, qui donne à l'œil sa forme et sa consistance.

La rétine : c'est une surface sensible à la lumière, elle joue le rôle de l'écran où se forme l'image d'un objet.

L'ensemble cornée cristallin joue le rôle d'une lentille convergente variable de distance focale minimale f_{\min} et de distance focale maximale f_{\max} .

5.2. Phénomène d'accommodation :

C'est un phénomène qui permet la mise au point à travers des muscles qui agissent sur le cristallin qui conduisent à la variation de la distance focale entre f'_{max} et f'_{min} . lorsque $f'=f'_{min}$, on dit l'œil est au maximum d'accommodation, dans ce cas l'objet est prêt de l'œil, et lorsque $f'=f'_{max}$, on dit que l'œil est au repos lorsque l'objet est loin.

5.3. Punctumproximum

C'est la distance minimale de vision distincte (nette) avec un maximum d'accommodation. Pour un œil normale dit "emmétrope", cette distance est de 25cm.

5.4. Punctumremotum.

Il est noté PP. Il est défini comme la distance maximale qu'un œil peut former une image nette sans accommodation. Il est noté PR.

5.5. Amplitude d'accommodation :

Il est défini par la relation suivante :

$$A = \frac{1}{f'_{min}} - \frac{1}{f'_{max}} = V_{max} - V_{min}$$

5.6. Les défauts de la vision

5.6.1. L'œil myope

Ce défaut résulte d'un cristallin trop convergent, c'est-à-dire, la distance focale au repos du cristallin est trop courte, ce qui conduit dans le cas d'un objet à l'infini à la formation d'une image avant la rétine et sur la rétine, l'image sera floue. Ce défaut peut aussi prévenir lorsque l'œil est trop grand ainsi que la distance cristallin-rétine (voir la figure 4-7).

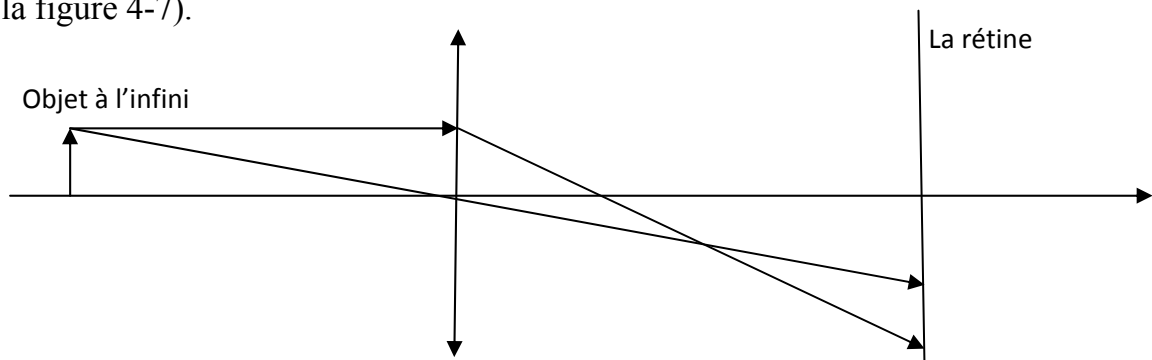


Figure 4-7 : Illustration d'un cas de myope.

Remarque : l'œil myope distingue mieux les objets placés près de l'œil, par rapport à l'œil normale à une distance, qui peut être inférieure à PP, par contre, elle voit floue les objets placés au-delà du PR.

Correction de la myope

Pour remédier au problème de la myope, il faut augmenter la distance focale, c'est-à-dire, diminuer la vergence. Cela se fait en plaçant une lentille divergente devant l'œil de telle sorte à ramener l'image de l'infini à une distance faible qui permettra à l'œil de voir l'image nette avec un peu d'accommodation. La figure ci-dessous illustre la correction de la myope par une lentille divergente.

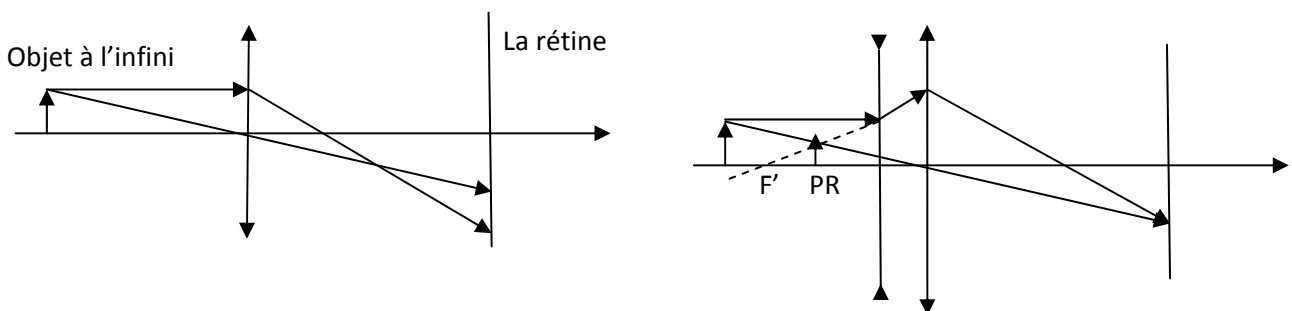


Figure 4-8 : correction de la myope par une lentille divergente.

Considérations théoriques

L'œil myope possède un PR différent de l'infini et il est égal à une valeur finie. Pour faire la correction, il faut ramener une image de l'infini vers le PR.

On utilisant la relation de conjugaison pour un objet à l'infini, on a:

$$\frac{1}{\infty} - \frac{1}{PR} = \frac{1}{f'}$$

$f' = -PR$

Ici f' est la distance focale de la lunette. Donc pour régler dans ce cas le problème de la myope, il faut choisir une lentille divergente de distance focale $f' = -PR$.

On voit sur la figure 4-8 que l'objet intermédiaire (obtenu par la lunette) est plus petit que l'objet initial, mais il est plus près de l'œil, ce qui veut dire qu'il est vu avec le même angle.

5.6.2.L'œil hypermétrope

Dans ce cas, le cristallin possède une distance focale trop grande au repos, donc il ne peut voir des objets à l'infini sans recourir à l'accommodation. La vision d'une image d'un objet à l'infini sans accommodation se forme derrière la rétine. Le problème peut venir de la petite taille de l'œil (distance cristallin-rétine trop petite). Le PR de l'œil reste à l'infini mais s'il n'accommode pas l'image formée sur la rétine sera flou. La valeur de son punctum proximum est supérieur à celle d'un œil normale, dans ce cas, il voit mal les objets proches.

Correction d'un œil hypermétrope

Un œil hypermétrope ne voit nettement les objets qu'à partir d'une certaine distance P qui est supérieur au PP. Pour remédier à ce problème, il faut envoyer l'image placée à 25cm de l'œil vers le point distant de P à l'œil. Pour cela, il faut utiliser une lunette avec des lentilles convergentes. La figure 4-9 illustre ce processus.

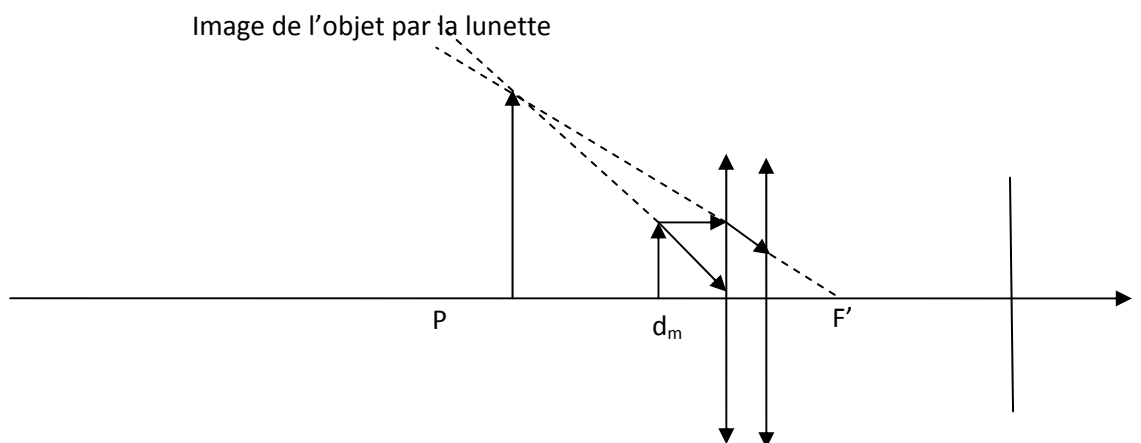


Figure 4-9 : Effet d'une lentille convergente sur un œil hypermétrope

F' représente le foyer image de la lunette.

5.6.3.L'œil astigmat

C'est un défaut induit par la déformation de l'œil est principalement la cornée qui a perdu sa sphéricité, et de ce fait, il devient astigmat. La déformation est caractérisée par deux axes selon la direction de la déformation. Pour remédier à ce problème, on place généralement une lentille ou une lunette qui aussi astigmat dont l'objectif est de compenser la déformation de l'œil.

Types d'astigmat

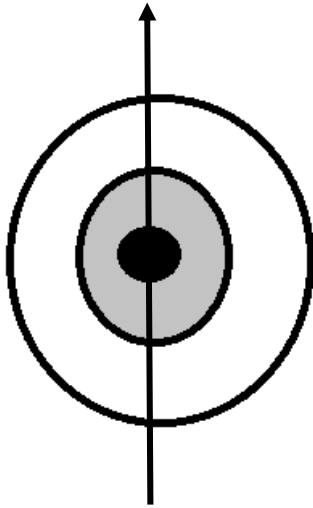


Figure 4-10 : Astigmat simple : la déformation est suivant une seule direction.

a/ Astigmat simple

La déformation de la cornée est selon un seul axe (l'axe représenté sur la figure 4-10). Suivant l'axe horizontal, l'œil est normal. L'image est flou, car ce système est assimilé à l'assemblage de deux demi lentilles (l'une est plus convergente que l'autre), suivant l'axe horizontale, l'image d'un objet à l'infini converge normalement vers la rétine, tandis que suivant l'axe où la cornée est déformée, l'image est projeté à l'extérieur de la rétine, ce qui nécessite de l'accommodation suivant cette direction.

b/ Astigmatisme composé

Dans ce cas, la cornée est trop convergente suivant les deux axes, cela est dû à la courbure de celle-ci. Ce cas rend trop convergente mais pas asymétrique, c'est ce qu'on appelle l'astigmatisme myopique composé. Lorsque la cornée n'est suffisamment convergente et sa courbure est différente sur les deux axes, on parle d'astigmatisme hypermétropique composé.

Œil presbyte :

La presbytie est par définition la perte du pouvoir d'accommodation de l'œil qui se produit d'une manière naturelle lorsque l'œil vieillit. Ce phénomène est caractérisé par le rapprochement du PP du PR. En effet, le PP va augmenter et PR va diminuer avec l'âge.

6.Exercices d'application

Exercice1 (lunette de Kepler)

Une lunette de Kepler est formée d'un objectif assimilable à une lentille mince convergente de distance focale image $f'1 = 60$ cm et d'un oculaire assimilable à une lentille mince convergente L2 de focale $f'2 = 5$ cm. La lunette est réglée à l'infini pour observer des objets ponctuels.

1. Comment positionner L1 par rapport à L2 ?
2. Représenter la marche des rayons lumineux issus d'un point objet situé à l'infini.
- 3.a. Déterminer le grossissement G de cet instrument.
b. Sous quel angle voit-on un objet AB de 10 m de hauteur située à une distance de 1 km de la lunette ?
c. L'observateur utilise la lunette en inversant les lentilles sans modifier son réglage ; il visel'objet AB à travers la lunette retournée. Sous quel angle apparaît-il ?

Exercice 2 : Grandissement d'une lunette de Galilée

Une lunette est constituée d'un objectif, assimilable à une lentille convergente L1 de distance focale 50 cm et d'un oculaire assimilable à une lentille divergente L2 de distance focale -5 cm. La lunette est réglée pour que l'observation se fasse sans accommoder.

1. Comment obtenir ce réglage ?
- 2.a. Calculer le grandissement angulaire obtenu.
b. Sous quel angle voit-on une tour de 10 m de haut placée à 2 km ?

Exercice 03

Un microscope est muni d'un objectif et d'un oculaire dont les distances focales sont respectivement $f'1 = 1$ cm et $f'2 = 5$ cm. La distance entre les centres optiques de

l'oculaire et de l'objectif est notée D et vaut 15 cm. L'oculaire est réglé pour une vision sans accommodation par un observateur à vue normale.

1. Calculer le grossissement commercial G_c du microscope, défini comme le rapport des angles α' et α , où α' est l'angle sous lequel est vue l'image de l'objet à travers le microscope et α l'angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu à la distance minimale de vision distincte $d_m = 25$ cm.

2. Calculer l'angle sous lequel on voit à travers cet instrument un objet dont le diamètre est de $20 \mu\text{m}$ ainsi que le diamètre d'un objet qui serait vu, à l'œil nu, sous ce même angle, à la distance de 25 cm.

On éloigne l'oculaire de l'objectif de manière à augmenter de $d = 10$ cm la distance D entre l'oculaire et l'objectif.

3. Quelle est la nouvelle valeur G_c' du grossissement commercial ?

4. De combien et dans quel sens faut-il déplacer le système optique par rapport à l'objet pour rétablir la mise au point ?

5. Le résultat est obtenu en tournant de deux tours et demi la vis micrométrique. Quel est le pas de cette vis ?

On recouvre l'objet d'une lamelle de verre de 0,5 mm d'épaisseur, à faces parallèles. On suppose l'objet au contact de la lamelle. On constate que, pour obtenir de nouveau une image nette, il faut tourner la vis micrométrique de 72 centièmes de tour.

6. Quel est l'indice du verre de la lamelle ?

Références bibliographique

- [1] Yann Charles et Gabriel Dutrer, Optique géométrique, Institut Galilée, 99 Jean-Baptiste-Clément 93430 Villiers-sur-Marne 2010/2011.
- [2] Agnès Maurel, Optique géométrique, Edition Belin 2002, ISSN : 1158-3762. ISBN : 978-2-7011-3035-4.
- [3] Jean-Paul Parisot, Patricia Segonds et Sylvie le Boiteux, Cours de physique, optique, Edition Donod, Paris 2003. ISBN : 2100068466.
- [4] Agnès Maurel, Jean-Marie Malbec, Optique géométrique, Rappel de cours et exercices, Edition Belin 2002. ISSN : 1158-3762, ISBN : 2-7011-3033-6.
- [5] M. Gabriel, C. Ernst et J. Grange, Comprendre et appliquer l'optique, Edition Masson, Paris 1981, 1986. ISBN : 2-225-80829-5. ISSN : 0335-4628.