



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique  
Université Larbi Ben M'hidi Oum EL Bouaghi  
Institut des Sciences et des Techniques Appliquées  
Département Mesures Physiques

## **Polycopié de Cours**

Destiné aux étudiants en 1<sup>ère</sup> Année Licence

Domaine : SCIENCES DE LA MATIERE

Filière : PHYSIQUE

### **Systeme Optique 1**

**- Cours - Résumés - et Exercices -**

Présenté par :

**Dr. Faiza BOUAÏCHA**

Maître de Conférences A à l'Université Larbi Ben M'hidi

**Année Universitaire : 2020/2021**

# *Avant Propos*

L'œil est le récepteur naturel de la lumière et des sources de lumière. Grâce aux performances de l'œil, on peut distinguer la taille et la couleur des objets ainsi que leur distance par rapport à une référence donnée.

L'optique est une branche de la physique qui s'intéresse à l'étude de la propagation de la lumière et de ses propriétés.

La lumière visible est une onde électromagnétique (EM) qui appartient à la gamme de longueurs d'onde entre 400 nm et 800 nm.

En optique géométrique, les ondes électromagnétiques (EM) sont traitées comme des rayons et leur caractère ondulatoire est ignoré.

**Ibn Al-Haytham** est considéré comme le premier fondateur de l'optique géométrique et il l'a développé sur la base d'observations simples. L'optique géométrique est basée sur deux principes et lois expérimentales :

- La propagation rectiligne dans un milieu homogène et isotrope ;
- Le principe du retour inverse qui exprime la réciprocité du trajet lumineux entre source et destination ;
- Les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et la réfraction.

Ce cours de système optique<sup>1</sup>, a été rédigé à l'intention des étudiants de la première année socle commun, qui préparent une licence professionnelle et aussi académique dans le domaine Sciences de la Matière. Il a été rédigé conformément au programme officiel agréé par le ministère, dans le cadre de la réforme L.M.D.

## *Avant Propos*

---

Le manuscrit est constitué de cours avec exercices corrigés où quatre parties sont la constitution de ce cours :

Je traite dans le premier chapitre les notions fondamentales de l'optique géométrique où je présente quelques définitions : nature de la lumière, les caractéristiques de la lumière, source de lumière, les lois de l'optique, la réflexion et la réfraction.

Dans le deuxième chapitre, je traite le stigmatisme, aplanétisme, les miroirs plans, les miroirs sphériques, le prisme et les règles de constructions d'images à partir de miroir.

Les différentes catégories de lentilles et les règles de construction d'images, on été traites dans le troisième chapitre.

La présentation de certains systèmes optiques : œil, microscope optique, lunette Galilée, et leur fonctionnement par le calcul de distances focales, du grandissement et de la vergence, sont aussi abordés dans le quatrième chapitre.

À la fin de chaque chapitre, je présente un résumé du cours et des exercices avec solutions.

# Table des matières

Avant Propos.....	i
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vii

## Chapitre I : Notions fondamentales

I.1.Introduction.....	2
I.2.Nature de la lumière.....	2
I.2.1.Aspect corpusculaire.....	2
I.2.2.Aspect ondulatoire .....	3
I.3.Quelques caractéristiques de la lumière.....	4
I.3.1. Les Milieux.....	4
I.3.2. Indice de réfraction d'un milieu.....	5
I.3.3 Longueur d'onde.....	6
I.4.Sources lumineuse.....	7
I.5.Vocabulaire de l'optique géométrique.....	8
I.5.1.Rayon de lumière.....	8
I.5.2.Faisceau de lumière.....	9
I.5.3.Dioptre.....	9
I.5.4.Axe optique, plans transverses.....	10
I.5.5.Image et objet.....	11
I.6.Trois lois fondamentales.....	12
I.6.1.Propagation rectiligne.....	12
I.6.2.Principe du retour inverse de la lumière .....	13
I.6.3.Indépendance des rayons lumineux .....	13
I.7.Loix de Snell-Descartes .....	13
I.7.1 Réflexion de la lumière.....	14
I.7.2 Réfraction de la lumière.....	14
I.8.Loi de Kepler : Approximation des petits angles.....	17
I.9.Principe de Fermat.....	17

## Table des matières

---

Résumé	du	
chapitre.....	18	
Exercices	et	solutions
.....	20	

### Chapitre II : Stigmatisme, aplanétisme, dioptrés et miroirs

II.Généralités.....	2	
7		
II.1.Système optique.....	27	
II.2.Stigmatisme et Aplanétisme .....	27	
II.3.Approximation de Gauss.....	28	
II.4.Notion de foyer objet, image, plan focal objet, plan focal image et vergence ..	29	
II.5.Systèmes optiques simples à faces planes.....	31	
II.5.1.Miroir plan	31	
II.5.1.1.Construction de l'image d'un point objet.....	32	
II.5.1.2.Construction de l'image d'un objet transverse au miroir.....	33	
II.5.1.3.Construction de l'image d'un objet axial au miroir.....	34	
II.5.2.Dioptré plan.....	34	
II.5.3.La lame à faces parallèles.....	36	
II.5.4.Le prisme.....	37	
II.5.4.1 La déviation.....	38	
II.5.5.Miroirs sphériques.....	40	
II.5.5.1.Définitions.....	40	
II.5.5.2.Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au		
sommet.....	41	
II.5.5.3.Relation de conjugaison avec origine au foyer (ou Relation de		
Newton).....	41	
II.6.Règles de construction.....	44	
Résumé	du	
chapitre.....	46	
Exercices	et	solutions
.....	48	

### **Chapitre III : Les lentilles minces**

III.1.Introduction	..58
III.2.Définition	58
III.2.1.Définition de la lentille	58
III.2.2. Définition de la lentille sphérique mince.....	58
III.2.3.Les lentilles convergentes et les lentilles divergentes.....	59
III.2.4.Images et objets pour les lentilles minces.....	60
III.2.4.1 Images et objets, caractère réel ou virtuel.....	60
III.3.Propriétés.....	61
III.3.1.Rayon passant par O.....	61
III.3.2.Foyers, Distances focales et Vergence.....	62
III.3.3.Distances focales, vergence.....	63
III.3.4.Grandissement.....	64
III.3.4.1.Grandissement transversal.....	64
III.4.Relations de conjugaison et de grandissement.....	65
III.4.1.Relations de Descartes avec origine au centre.....	65
III.4.2.Relations de Newton avec origine aux foyers.....	66
III.4.3.Grandissement angulaire.....	67
III.5.Recherche d'images, d'objets-Construction de rayons.....	68
III.5.1.Rayons particuliers.....	68
III.5.2.Recherche de l'image d'un objet.....	68
Résumé du chapitre.....	70
Exercices et solutions .....	71

### **Chapitre IV : Les instruments optiques**

IV.1 Introduction.....	79
IV.2 L'œil.....	79

---

## *Table des matières*

---

IV.2.1.Fonction de l'œil.....	80
IV.2.2.L'œil réduite.....	82
IV.2.3.L'œil normal.....	83
IV.2.4.Caractéristique de l'œil.....	84
IV.2.4.1.Champ de l'œil.....	84
IV.2.4.2.Résolution de l'œil normal.....	84
IV.2.4.3.Accommodation de l'œil normal.....	84
IV.2.4.3.1.L'accommodation limitée.....	85
IV.2.4.3.2.Amplitude dioptrique d'accommodation.....	85
IV.2.5.Défauts de l'œil.....	85
IV.2.5.1.Myopie.....	85
IV.2.5.2.Hypermétropie.....	86
IV.2.5.3.Presbytie.....	87
IV.3.Le microscope.....	87
IV.3.1.Principe de l'instrument.....	88
IV.3.2.Caractéristiques d'un microscope.....	89
IV.3.2.1.Puissance.....	89
IV.3.2.2.Grossissement.....	90
IV.4.Lunette de Galilée.....	91
IV.4.1.Principe de fonctionnement.....	91
IV.4.2.Grossissement angulaire d'une lunette.....	91
Résumé du chapitre.....	93
Exercices et solutions.....	95
Référence.....	105

---



# Liste des figures

## Chapitre I : Notions fondamentales

Figure. I.1 : Propagation du champ électromagnétique.....	3
Figure. I.2 : Les milieux de propagation de la lumière.....	5
Figure. I.3 : Le spectre électromagnétique.....	7
Figure. I.4 : Les sources primaires et les sources secondaires.....	8
Figure. I.5 : Rayon de lumière.....	9
Figure. I.6 : Faisceau de lumière.....	10
Figure. I.7 : Espaces objet et image.....	11
Figure. I.8 : Les cas possibles d'objet et image.....	11
Figure. I.9 : Le principe de propagation rectiligne.....	12
Figure. I.10 : Réflexion de la lumière.....	14
Figure. I.11 : Réfraction de la lumière.....	15
Figure. I.12 : Réfraction limite de la lumière.....	16
Figure. I.13 : Réflexion totale de la lumière.....	16

## Chapitre II : Stigmatisme, aplanétisme, dioptrés et miroirs

Figure. II.1 : Stigmatisme.....	27
Figure. II.2 : Aplanétisme.....	28
Figure. II.3 : Astigmatisme.....	28
Figure. II.4 : Stigmatisme Approché.....	28
Figure. II.5 : Les foyers et les plans focaux.....	30
Figure. II.6 : La vergence.....	31
Figure. II.7 : Les objets et les images.....	32
Figure. II.8 : Construction de l'image d'un point objet.....	33
Figure. II.9 : Construction de l'image d'un objet transverse au miroir.....	33
Figure. II.10 : Construction de l'image d'un objet axial au miroir.....	34
Figure. II.11 : Le dioptré.....	35
Figure. II.12 : Construction de l'image d'un objet au dioptré.....	35
Figure. II.13 : La lame à faces parallèles.....	37

## Liste des figures

---

<b>Figure. II.14</b> : Le prisme.....	38
<b>Figure. II.15</b> : La marche d'un rayon lumineux et les angles correspondants.....	38
<b>Figure. II.16</b> : La déviation en fonction de l'angle incident.....	40
<b>Figure. II.17</b> : Miroirs sphériques concave et convexe.....	41
<b>Figure. II.18</b> : Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au sommet.....	42
<b>Figure. II.19</b> : Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au foyer..	43

### Chapitre III : Les lentilles minces

<b>Figure. III.1</b> : Lentille mince.....	58
<b>Figure. III.2</b> : Définition de la lentille sphérique.....	58
<b>Figure. III.3</b> : Lentilles divergentes.....	59
<b>Figure. III.4</b> : Lentilles divergentes.....	59
<b>Figure. III.5</b> : Modélisations des lentilles minces.....	59
<b>Figure. III.6</b> : Caractère réel ou virtuel des images.....	60
<b>Figure. III.7</b> : Caractère réel ou virtuel des objets.....	61
<b>Figure. III.8</b> : Rayon passant par le centre O.....	62
<b>Figure. III.9</b> : Les foyers objet et image d'une lentille convergente et divergente....	63
<b>Figure. III.10</b> : Les foyers : Objet, image et image secondaire.....	64
<b>Figure. III.11</b> : Image d'un objet à l'infini.....	65
<b>Figure. III.12</b> : Relation de conjugaison et de grandissement.....	65
<b>Figure. III.13</b> Grandissement angulaire.....	68
<b>Figure. III.14</b> : Image réelle d'un objet réel AB par une lentille convergente.....	68
<b>Figure. III.15</b> : Image réelle d'un objet réel AB par une lentille divergente.....	69

### Chapitre IV : Les instruments optiques

<b>Figure. IV.1</b> : L'œil humaine.....	79
<b>Figure. IV.2</b> : Modélisation de l'œil humaine.....	80
<b>Figure. IV.3</b> : L'œil réduite.....	83
<b>Figure. IV.4</b> : Accommodation de l'œil normal.....	84
<b>Figure. IV.5</b> : L'œil myope.....	86
<b>Figure. IV.6</b> : L'œil hypermétropie.....	87

*Liste des figures*

---

**Figure. IV.7** : Microscope optique.....88

**Figure. IV.8** : Construction de l'image d'un objet à travers un microscope.....89

**Figure. IV.9** : Le principe de fonctionnement de la lunette Galilée.....92

# Chapitre I

## Notions fondamentales

## **I.1 Introduction**

L'optique est l'étude des phénomènes lumineux aperçus ou non par l'œil. Ces phénomènes peuvent être expliqués selon plusieurs aspects de l'optique. La lumière représente la cause essentielle des sensations lumineuses.

Nous pouvons citer plusieurs sensations lumineuses :

- L'optique physiologique : analyse les sensations visuelles telles que la clarté, l'obscurité, la notion de couleur, etc... ;
- L'optique physique : étudie la relation entre la lumière et la matière ;
- L'optique géométrique : moyen de tracer les directions de propagation des rayons lumineux.

## **I.2. Nature de la lumière**

Selon plusieurs expériences et théories, la lumière présente un double aspect :

- **Un aspect ondulatoire** : mis en évidence par les expériences de diffraction et d'interférence ;
- **Un aspect corpusculaire** : mis en évidence par les expériences d'effet photoélectrique, émission, absorption ainsi que de l'effet Compton.

### **I.2.1 Aspect corpusculaire**

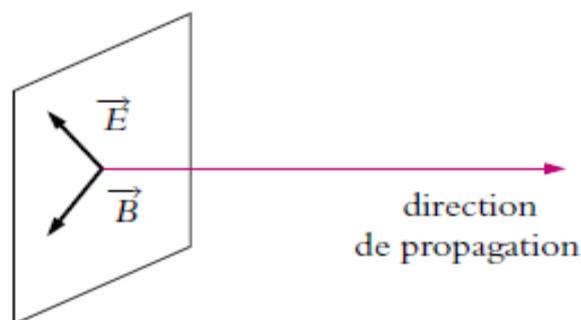
La théorie corpusculaire présentée par Newton considère que la lumière est un ensemble de corpuscules (dont la nature n'a pas été déterminée) lancés à grande vitesse par l'objet lumineux dans un milieu appelé " éther ", qui y produisent des perturbations et qui frappent le fond de l'œil (théorie de l'émission). Par conséquent, la diversité des couleurs est ainsi expliquée par des différences de grosseur des corpuscules. Descartes avait également expliqué les lois de l'optique par des images empruntées à une cinématique corpusculaire et décrit la lumière comme étant "une tendance au mouvement" qui, par l'intermédiaire d'un milieu, "se redouble par petites secousses".

Cette théorie laisse les phénomènes d'interférences inexpliqués (que Newton a remarqués), c'est-à-dire le fait que, la superposition de " lumières ", dans certains cas, peut produire l'obscurité. Elle n'explique pas, également, les phénomènes de diffraction, c'est-à-dire la présence de lumière dans les zones d'ombre géométrique. Il aurait valu attendre le début du vingtième siècle et les travaux d'Einstein (1905) et de Compton

(1921), pour que cette théorie corpusculaire prenne sa forme définitive : la lumière est constituée de quanta d'énergie appelés photons qui obéissent aux lois de conservation de la mécanique. Les propriétés du photon est une masse nulle et vitesse de la lumière  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s dans le vide et énergie :  $E = h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.S) et  $\nu$  est la fréquence du photon.

### I.2.2 Aspect ondulatoire

En 1665, Hooke proposa la théorie ondulatoire pour expliquer le phénomène d'interférence. Cette théorie a été développée par Huygens qui considérait que tout point d'une surface lumineuse émet une onde sphérique se propageant à une vitesse finie dans l'éther. Cette hypothèse est développée ensuite par Young au début du XIXe siècle pour interpréter les phénomènes d'interférences et par Fresnel pour expliquer la diffraction. Maxwell, après avoir construit la théorie de l'électromagnétisme, définit la lumière comme étant une onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  et se propage dans le vide à avec une vitesse de  $3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup> et Il précise que l'onde est transverse, c'est-à-dire que le champ électrique  $\vec{E}$  et le champ magnétique  $\vec{B}$  sont perpendiculaires à la direction de propagation (figure I.1). Le déplacement de l'onde se fait selon une direction rectiligne et dans un milieu isotrope et homogène.



**Figure I.1** Propagation du champ électromagnétique

Chacune de ces théories n'explique qu'une partie des phénomènes physiques relatifs à la lumière. En fait, la lumière a un double comportement : un comportement ondulatoire et un comportement corpusculaire, on parle alors de dualité onde-corpuscules.

En 1924, de Broglie montre, grâce à la mécanique ondulatoire, que le double aspect présenté par le phénomène lumineux n'est qu'un cas particulier d'une propriété générale de

la matière : à toute particule de quantité de mouvement  $\mathbf{p}$  est associée une onde de longueur d'onde :  $\lambda = \frac{h}{p}$  où  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  est la constante de Planck.

Cette théorie a été vérifiée pour les électrons par Davisson et Germer dans une expérience de diffraction. Pour les particules macroscopiques, cette longueur d'onde est trop petite pour être mise en évidence (pour une particule de masse  $m = 1 \text{ g}$ , se déplaçant à la vitesse  $v = 10^3 \text{ m/s}$  on a  $\lambda \approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ m}$ ).

On considère actuellement, la lumière est constituée d'ondes électromagnétiques de fréquences  $\nu$  voisines de  $10^{15} \text{ Hz}$  auxquelles sont associées des particules de masse nulle, appelées " photons ", transportant l'énergie  $E = h\nu$  et de quantité de mouvement  $\mathbf{p} = \frac{E}{c}$ .

On doit considérer l'optique comme une partie de la physique qui, au sens large, étudie les manifestations et les propriétés de la lumière et, par extension, les ondes électromagnétiques.

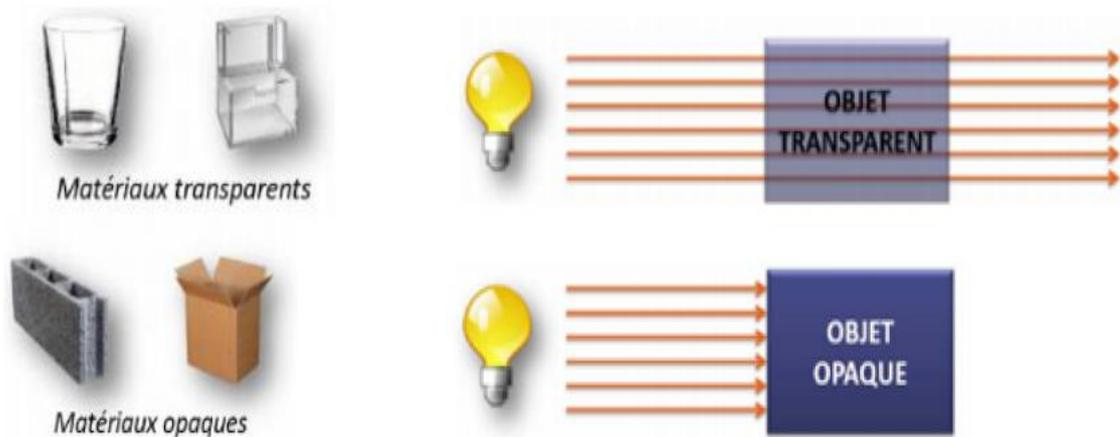
L'optique géométrique est une partie de l'optique qui se fonde sur la notion de rayons lumineux.

### I.3 Quelques caractéristiques de la lumière

#### I.3.1 Les Milieux

La lumière peut se propager dans le vide et d'autres milieux autres que le vide (figure I.2). On a plusieurs milieux :

- **Milieu isotrope** : milieu dont les propriétés optiques sont identiques sur toutes les directions, dans le cas contraire, il est **anisotrope** ;
- **Milieu homogène** : milieu dont les propriétés optiques ne changent pas, il est dit **inhomogène** dans le cas contraire ;
- **Milieu transparent** : s'il laisse passer la lumière sans atténuation (l'eau, le verre);
- **Milieu absorbant** : s'il ne laisse passer qu'une partie de la lumière (verres fumés) ;
- **Milieu opaque** : s'il ne laisse pas passer la lumière (pratiquement, tous les métaux le sont).



**Figure I.2** Les milieux de propagation de la lumière.

En réalité, tous les milieux matériels sont plus ou moins absorbants. La permittivité  $\epsilon$  d'un milieu est différente de celle  $\epsilon_0$  du vide alors que, dans le cas d'un milieu non magnétique, sa perméabilité  $\mu$  est très peu différente de celle  $\mu_0$  du vide.

Dans un milieu transparent, homogène et isotrope,  $\epsilon$  est une fonction de la fréquence  $\nu$ . La vitesse  $v$  de propagation de la lumière dans le milieu s'écrit alors :

$$v(\nu) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\nu)\mu_0}}$$

### I.3.2 Indice de réfraction d'un milieu

La vitesse de propagation (ou célérité) de l'onde dépend du milieu traversé. Dans un milieu autre que le vide, elle est inférieure à  $c$  :  $v = \frac{c}{n}$  ; avec  $n > 1$ . La grandeur  $n$  est appelé indice de réfraction du milieu.

Quelques valeurs d'indice de réfraction et récapitulées dans le tableau ci-contre. Pour les milieux transparents (c'est-à-dire non absorbants) et dans le visible, les indices sont supérieurs à 1.

Milieu	Milieu Indice
Vide	$n = 1$
Air	$n = 1,00027 \approx 1$
Eau	$n = 1,33$
Verre à fort indice	$1,6 \leq n \leq 1,8$
Verre courant	$n \approx 1,5$

Dans la pratique, on trouve peu d'indice supérieur à 2 (l'indice du diamant, particulièrement élevé, est de l'ordre de 2,4).

### I.3.3 Longueur d'onde

Une onde qui comportant une seule pulsation est dite monochromatique. On utilise pour caractériser l'onde la période  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  ou la fréquence  $\nu = \frac{1}{T}$ . Une des grandeurs les plus utilisées est la longueur d'onde :  $\lambda = \nu T = \frac{cT}{n}$ , grandeur qui dépend du milieu traversé.

On peut exprimer la longueur d'onde  $\lambda$  dans un milieu en fonction de la longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le vide :

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

On remarquera que  $\lambda_0 = cT$ .

Le spectre électromagnétique est quasi-totalement invisible pour un œil humain (figure. I.3), sauf une petite portion dite spectre visible qui s'étend du rouge au violet en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

La couleur de la lumière est avant tout une question de perception par l'œil et l'interprétation par le cerveau. On retiendra que le spectre visible correspond à l'intervalle variant de 400 nm à 800 nm pour un œil moyen. Les couleurs principales sont récapitulées dans le tableau suivant :

$\lambda_0$ (nm)	<400	500	590	630	>800
$\nu$ (Hz)	$>7,5 \cdot 10^{14}$	$6,0 \cdot 10^{14}$	$5,1 \cdot 10^{14}$	$>4,8 \cdot 10^{14}$	$<4 \cdot 10^{14}$
Couleur	ultraviolet	bleu	jaune	rouge	infrarouge

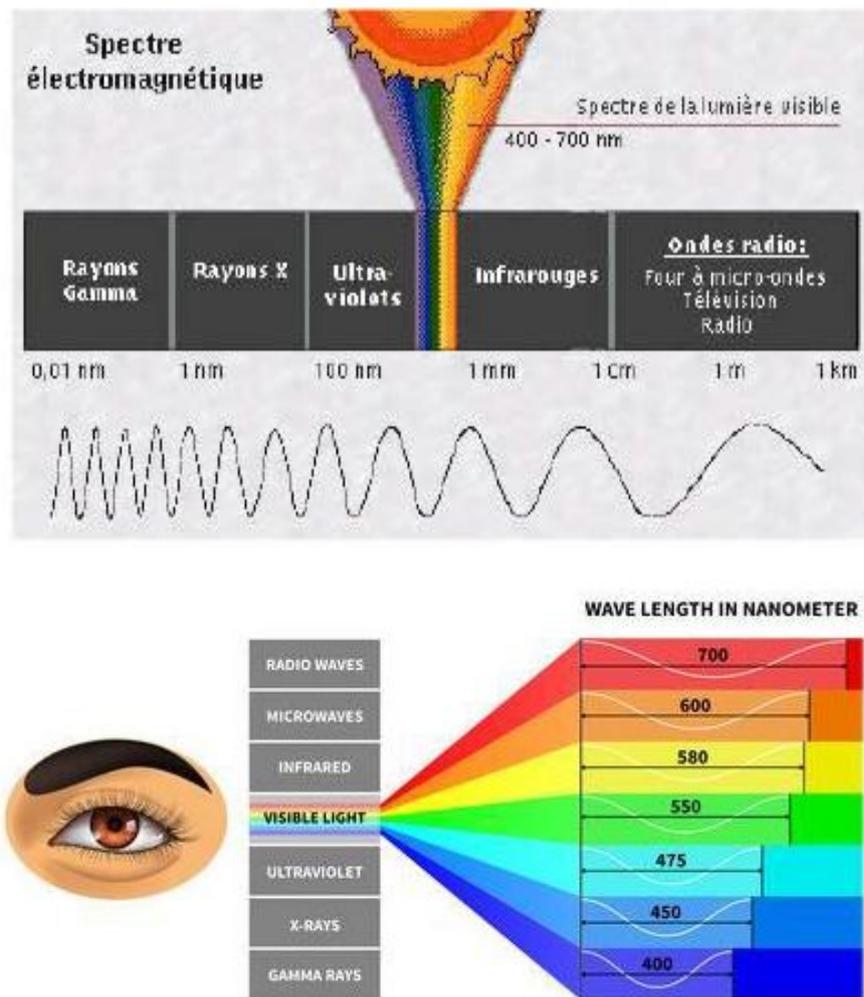


Figure I.3 Le spectre électromagnétique

#### I.4 Sources lumineuse

Une source de lumière est un corps qui émet la lumière autour de lui. On distingue deux sortes de source de lumière (figure .I.4) :

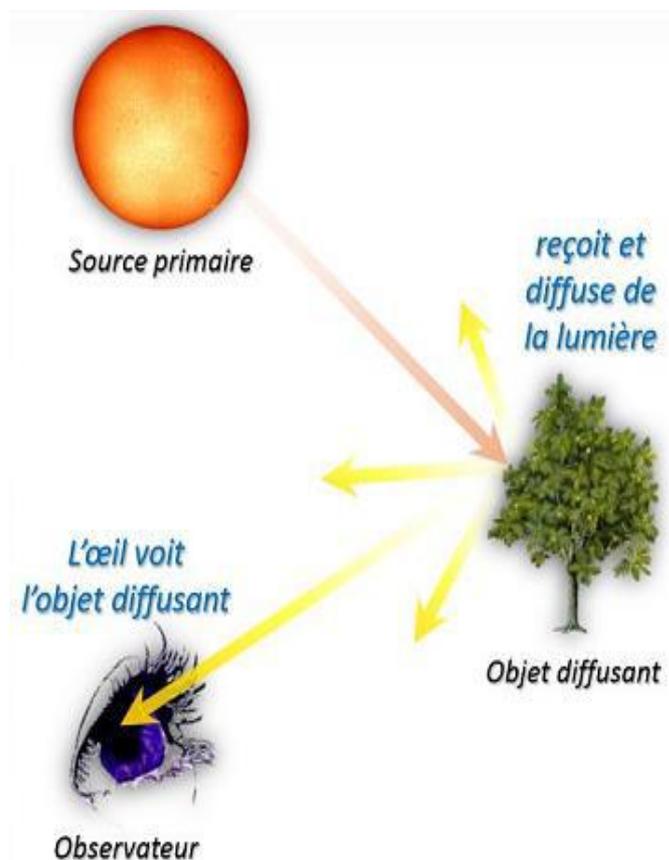
- **Les sources primaires** : Ce sont des objets qui produisent la lumière qu'ils émettent. On trouve le soleil, les flammes, des braises incandescentes, etc.. ;
- **Les sources secondaires (les objets diffusants)** : Ce sont des objets qui ne produisent pas de lumière mais qui renvoient la lumière reçue. On dit que ces objets diffusent la lumière.

La diffusion est un phénomène au cours duquel un objet reçoit d'abord la lumière puis renvoie toute ou une partie de cette lumière dans toutes les directions.

Un objet diffusant n'est donc qu'une source de lumière, lorsqu'il est éclairé par une autre source primaire ou par un autre objet diffusant.

**Exemple :**

- La lune, éclairée par le soleil, ainsi que les autres planètes du système solaire sont des objets diffusants.
- En fait tous les objets qui nous entourent sont des objets diffusants car ils diffusent la lumière des lampes ou celle du soleil.



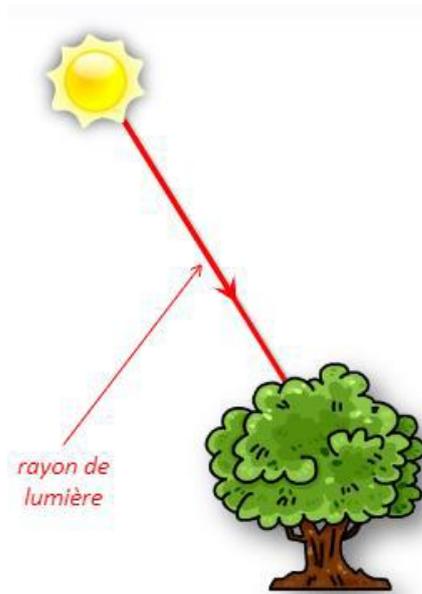
**Figure I.4** Les sources primaires et les sources secondaires.

## I.5 Vocabulaire de l'optique géométrique

### I.5.1 Rayon de lumière

La lumière est décrite par un ensemble de rayons lumineux indépendants. Ces rayons lumineux sont caractérisés par une direction de propagation et une vitesse de propagation  $v$ . Ces rayons lumineux (figure I.5) issus d'une source se

propagent en ligne droite dans tout milieu homogène à une vitesse qui dépend du milieu.



**Figure I.5** Rayon de lumière.

### I.5.2 Faisceau de lumière

Le faisceau de lumière est un ensemble de rayons lumineux émis par la source et compris entre deux rayons limites. Il peut être :

- **Faisceau "divergent "** un faisceau lumineux dont tous les rayons sont issus d'un même point S ou semblent provenir d'un même point ;
- **Faisceau "convergent "** un faisceau lumineux dont tous les rayons aboutissent à un même point ou convergent vers un même point ;
- **Faisceau "parallèle "** ou "**cyllindrique "** un faisceau lumineux dont tous les rayons sont parallèles.

### I.5.3 Dioptré

On désigne par ce terme à toute surface qui sépare deux milieux homogènes et transparents d'indices différents. Cette surface peut être plane (le dioptré est alors dit plan), sphérique (dioptré sphérique) ou de forme quelconque. Elle peut également être rendue totalement ou partiellement réfléchissante par un dépôt d'une fine couche métallique ou par un traitement approprié.

### I.5.4 Axe optique, plans transverses

La normale de la surface de séparation entre deux milieux est appelée **l'axe optique**. On oriente l'axe optique dans le sens de propagation de la lumière. Quand il y a réflexion, l'orientation change de sens.

Les plans perpendiculaires à cet axe optique sont appelés **plans transverses**.

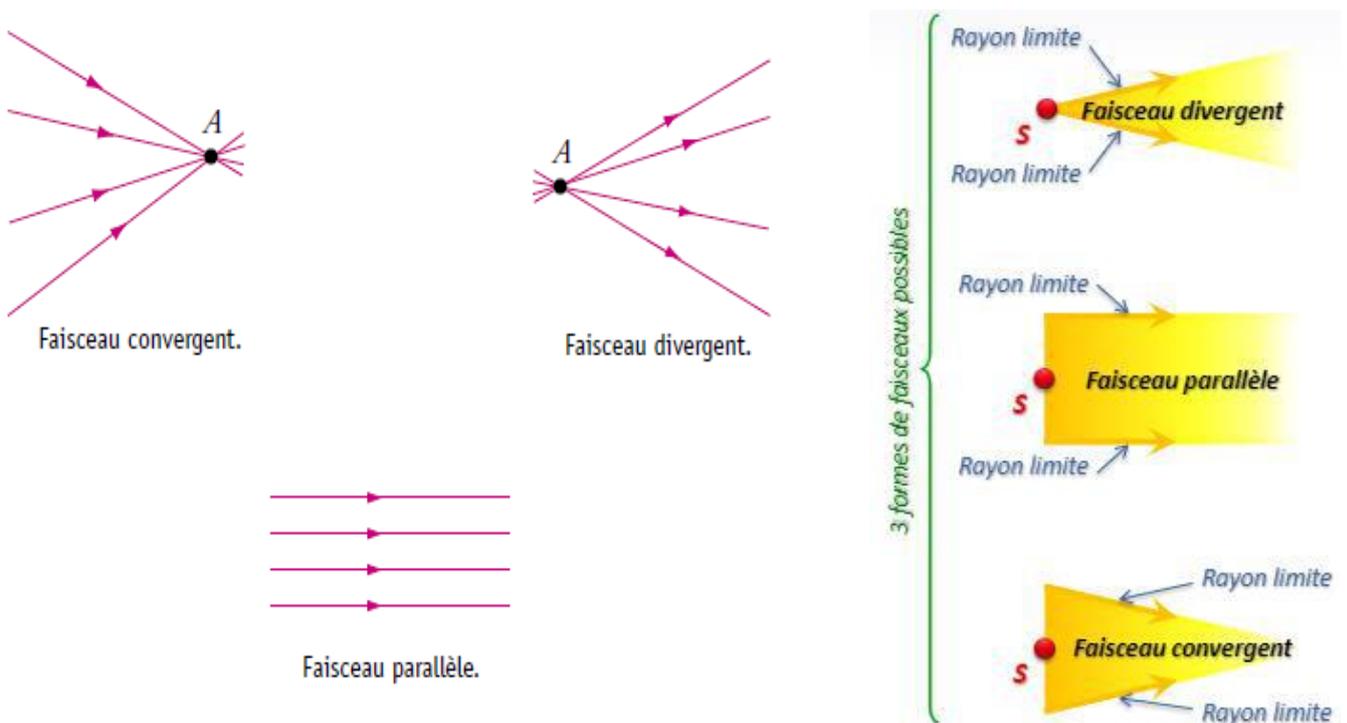


Figure I.6 Faisceau de lumière

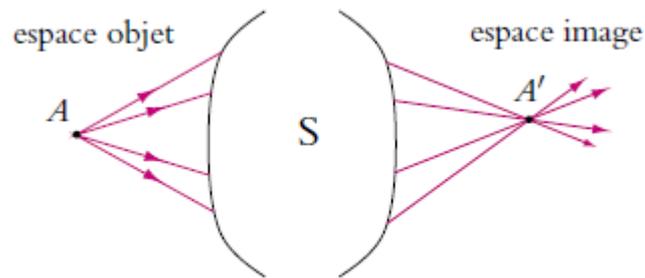
### I.5.5 Image et objet

Soit un système optique (**S**) et soit une source ponctuelle de lumière placée en **A**. On appelle objet, le point qui est à l'origine des rayons lumineux que l'on étudie. On appelle image, le point d'où semble provenir les rayons considérés en sortie du système.

Si toute la lumière issue de **A** converge en **A'** après avoir traversé (**S**), on dit que **A'** est l'image de **A** à travers (**S**) et que **A** est l'antécédent de **A'**. Les points **A** et **A'** sont dits conjugués par le système.

On distingue plusieurs cas : Objet réel ou virtuel, image réelle ou virtuelle :

- Si le faisceau incident diverge à partir d'un point **A** situé dans l'espace objet, on dit que **A** est un **objet réel** ;



Espaces objet et image.

Figure I.7 Espaces objet et image

- Si le faisceau diverge à partir d'un point **A** qui n'est pas situé dans l'espace objet, **A** est un **objet virtuel** ;
- Si le faisceau émergent, converge vers un point **A'** de l'espace image, **A'** est une **image réelle**, si non **A'** est une **image virtuelle**.

Les quatre cas possibles d'objet et d'image sont récapitulés sur les figures I.8.

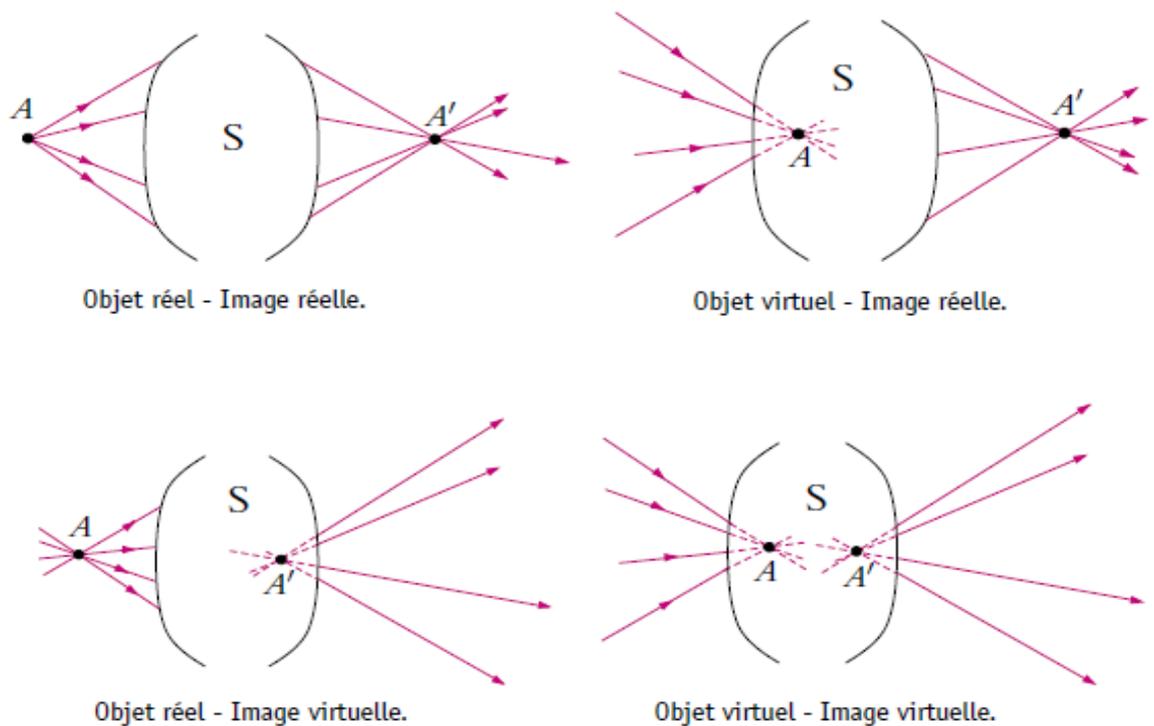


Figure I.8 Les cas possibles d'objet et image.

## I.6 Trois lois fondamentales

### I.6.1 Propagation rectiligne

Le principe de propagation rectiligne est vérifié par de nombreuses expériences. On peut par exemple observer une source lumineuse à travers des petits trous percés dans une série de parois opaques et alignés.

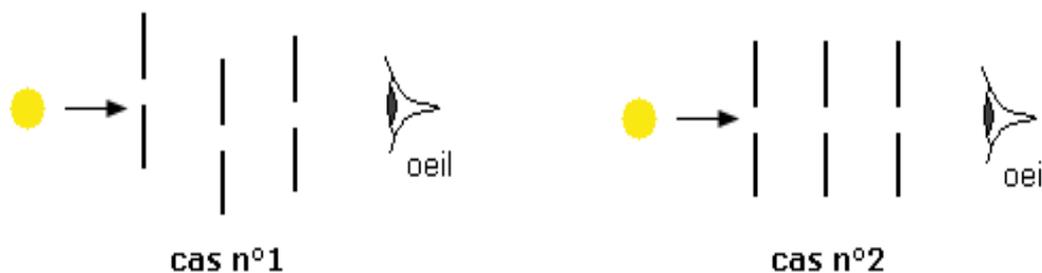
#### Expériences

##### Cas n°1 :

Un étudiant dispose de manière aléatoire trois cartons percés d'un trou devant une lampe.

##### Cas n°2 :

Il déplace ensuite les cartons pour pouvoir observer la lumière de la lampe à travers les trois trous.



**Figure I.9** Le principe de propagation rectiligne

#### Observations

**Cas n°1 :** Il ne voit pas la lumière.

**Cas n°2 :** Il voit la lumière.

#### Conclusion

La lumière se propage en ligne droite : **la propagation de la lumière est dite rectiligne**. Le trajet suivi par la lumière est un rayon de lumière, schématisé par une demi-droite qui part de la source. Le sens de propagation de la lumière est indiqué par une flèche.

### I.6.2 Principe du retour inverse de la lumière

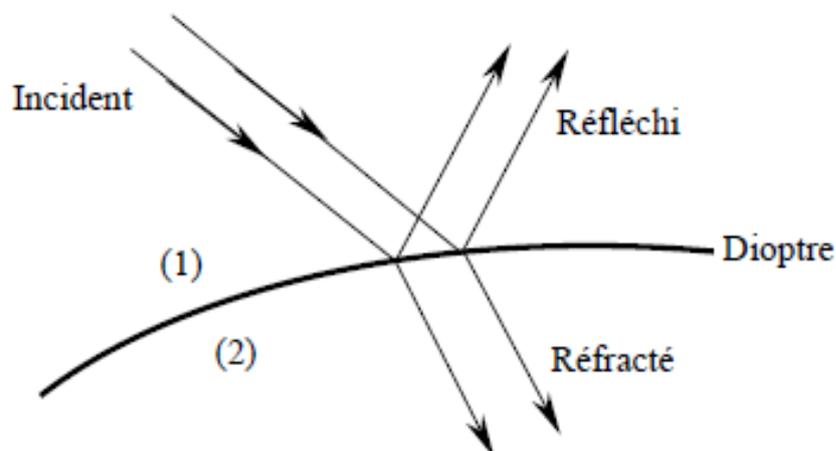
Considérons un rayon lumineux venant du point **A**, traversant plusieurs milieux et aboutissant à un point **B**, sans subir de réflexion. Si on inverse le sens de la lumière, en considérant le rayon lumineux venant du point **B** et aboutissant au point **A**, on remarque que la lumière suivra le même trajet entre ces deux points. On dit que le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation.

### I.6.3 Indépendance des rayons lumineux

Le principe d'indépendance des rayons lumineux peut s'énoncer comme suit : Un milieu transparent peut transporter simultanément des rayons lumineux issus d'une même source ou de plusieurs sources, dont les propagations sont indépendantes. Cela signifie par exemple que deux ou plusieurs faisceaux lumineux peuvent être traversés les uns par les autres sans aucun d'eux soit modifié en quoi que ce soit. En particulier, leurs directions, leurs intensités et leurs couleurs sont conservées.

### I.7 Lois de Snell-Descartes

Comme indiqué plus haut, la lumière se propage donc en ligne droite dans un milieu homogène, lorsqu'elle rencontre un deuxième milieu homogène, elle change de direction et donne généralement lieu à une onde *réfléchi*e et une autre onde *réfracté*e. La surface de séparation entre deux milieux transparents est appelée **dioptre**.



### I.7.1 Réflexion de la lumière

Il y a une réflexion de la lumière lorsque la lumière change brutalement de direction, mais tout en restant dans le même milieu de propagation. On distingue deux types de réflexion :

- **La réflexion métallique** : Lorsque la lumière arrive sur un miroir plan, ce dernier est constitué d'une couche métallique déposée sur un support et recouvert d'une plaque de verre (figure .I.10) ;
- **La réflexion vitreuse** : Elle se produit lorsque la lumière arrive sur un dioptre, une partie de la lumière se réfléchit, et l'autre partie sera réfractée dans le second milieu. L'angle d'incidence  $i_1$  et l'angle de réflexion  $i'_1$  sont respectivement les angles que forme le rayon incident et le rayon réfléchi avec la normale (figure .I.10).

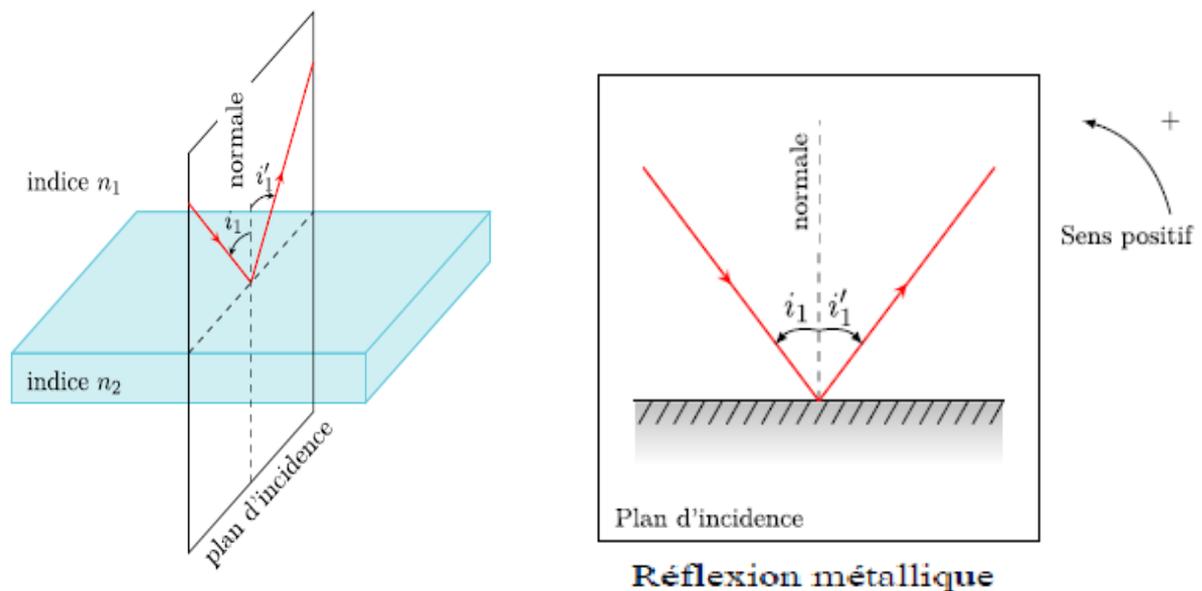


Figure .I.10 Réflexion de la lumière.

### I.7.2 Réfraction de la lumière

La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices de réfraction différents. L'angle de réfraction  $i_2$  est l'angle que forme le rayon réfracté avec la normale. L'angle de réfraction  $i_2$  dépend des indices de réfraction des deux milieux  $n_1$  et  $n_2$ . On distingue deux types de réfraction :

**a. Réfraction limite :**

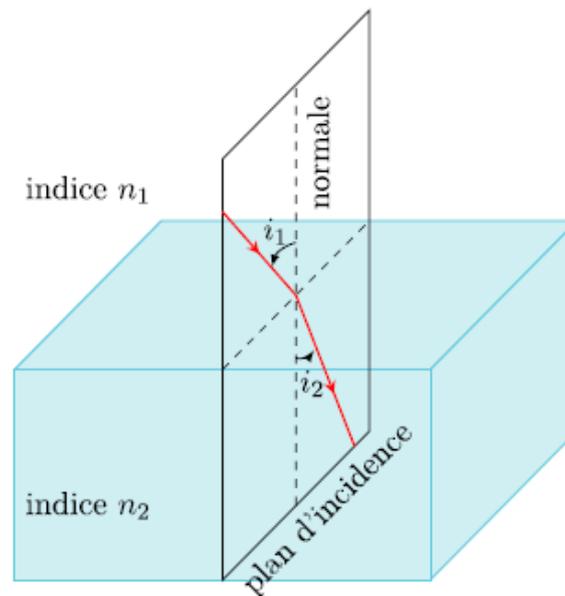
- **Si  $n_2 > n_1$**  : on dit que le milieu (2) est plus réfringent que le milieu (1) (figure I.12.a2). Dans ce cas, comme  $\sin i_2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin i_1$ ,  $\sin i_2 < \sin i_1$  et  $i_2 < i_1$ , donc l'angle de réfraction est inférieur à l'angle d'incidence, dans ce cas le rayon réfracté existe toujours, il se rapproche de la normale. C'est le cas lorsque le milieu initial est l'air et le milieu final est le verre ou l'eau. Cela explique le fait qu'un bâton plongé dans l'eau apparaisse cassé.

- **Dans ce cas** :  $0^\circ \leq i_1, i_2 \leq 90^\circ, i_1 > i_2$

$$i_1 = i_{\min} = 0^\circ \Rightarrow i_2 = i_{\min} = 0^\circ$$

$$i_1 = i_{\max} = 90^\circ \Rightarrow i_2 = i_{\max} = \lambda, \lambda < 90^\circ$$

$\lambda$  : **L'angle limite de réfraction** (figure I.12.a1) calculé par :  $\sin \lambda = \frac{n_1}{n_2}$



**Figure .I.11** Réfraction de la lumière.

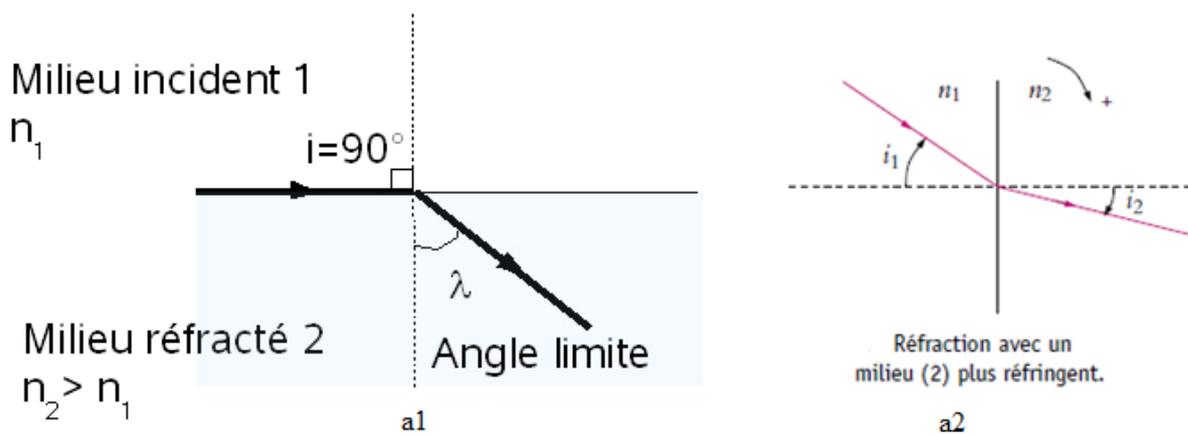


Figure .I.12 Réfraction limite de la lumière

**b. Réflexion totale**

- **Si  $n_2 < n_1$** , on dit que le milieu (2) est moins réfringent que le milieu (1) (figure I.13.b3). Dans ce cas,  $\sin i_2 > \sin i_1$  et  $i_2 > i_1$  : **le rayon réfracté s'écarte de la normale**

**Dans ce cas :**

$$0^\circ \leq i_1, i_2 \leq 90^\circ, i_1 < i_2$$

$$i_1 = i_{\min} = 0^\circ \Rightarrow i_2 = i_{\min} = 0^\circ$$

$$i_1 = i_c \Rightarrow i_2 = i_{\max} = 90^\circ, \Rightarrow i_c < 90^\circ$$

Pour une certaine valeur d'incidence  $i_c$ , l'angle de réfraction  $i_2$  est égal à  $90^\circ$ ,  $i_c$  est l'angle critique d'incidence calculé par :  $\sin i_c = \frac{n_2}{n_1}$

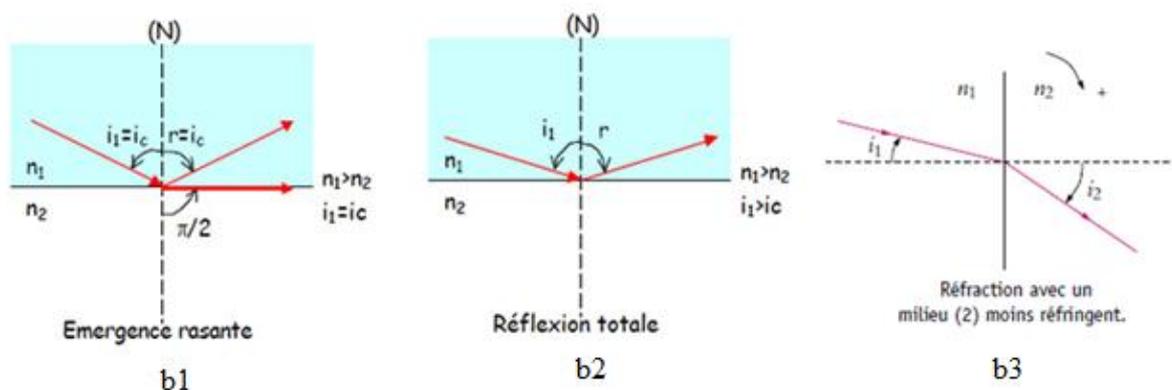


Figure .I.13 Réflexion totale de la lumière

### I.8 Loi de Kepler : Approximation des petits angles

Si l'angle d'incidence  $i_1$  est petit, on peut confondre la fonction sinus avec la valeur de l'angle exprimée en radian. Il en est alors de même pour l'angle de réfraction  $i_2$ . On rappelle qu'au premier  $\sin i_1 \approx i_1$  ; de même  $\sin i_2 \approx i_2$ .

On peut obtenir dans ce cas une approximation approchée des lois de Snell-Descartes sous une nouvelle forme appelée loi de Kepler :

$$n_1 i_1 = n_2 i_2 \quad \text{ou} \quad i_1 = n_2 i_2$$

### I.9 Principe de Fermat

Soit  $dl$  le déplacement élémentaire du chemin géométrique effectué pour aller de A vers B, deux points situés dans un milieu d'indice  $n$ , pouvant varier en fonction de  $l$ . La longueur  $dl$  du parcours pendant le temps élémentaire  $dt$  est :

$$dt = \frac{dl}{v} = n(l) \frac{dl}{c}$$

La durée du parcours AB est donc :

$$t = \frac{1}{c} \int_A^B n(l) dl$$

Elle s'écrit donc aussi :  $t = LAB/C$

LAB : le chemin optique de A à B

### Énoncé de principe de Fermat

Pour aller d'un point à un autre, la lumière suit, parmi toutes les trajectoires possibles, celle dont le temps de parcours est extremum (maximum ou minimum).

# Résumé du chapitre

- La lumière est une onde électromagnétique caractérisée par les amplitudes couplées du champ électrique et du champ magnétique.
- Tout rayonnement (OEM), l'énergie est concentrée en quanta de lumière, nommés photons, dont l'énergie  $E = h\nu = hc/\lambda$  est proportionnelle à la fréquence  $\nu$  de l'onde,  $h$  étant la constante de Planck  $h \approx 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ .
- L'onde lumineuse peut être caractérisée par :
  - La vitesse  $v$  dans le milieu,
  - La longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$ ,
  - La fréquence  $\nu$ .
- Soit  $v$  la vitesse de la lumière dans un milieu matériel transparent, l'indice  $n$  du milieu est défini par :  $n = c/v$  ; donc :  $n > 1$
- Plus la fréquence de la vibration est grande plus :
  - La longueur d'onde est petite,
  - La vitesse de propagation est faible,
  - L'indice du milieu est grand.
- Une source primaire de lumière : est un corps qui crée et émet de la lumière dans toutes les directions.
- Une source de lumière secondaire : est un corps qui renvoie la lumière reçue dans toutes les directions.
- Dans un milieu homogène et isotrope, les rayons lumineux sont des droites.
- La lumière se propage de A vers B ou de B vers A, elle emprunte la même trajectoire (A et B sont sur le même rayon lumineux).
- Il n'y a pas d'interaction entre deux rayons lumineux, un rayon ne peut pas en dévier un autre.

**Réflexion**

**1<sup>ère</sup> loi de réflexion** : Le rayon incident, le rayon réfracté, le rayon réfléchi et la normale à la surface de séparation sont dans le plan d'incidence.

**2<sup>ème</sup> loi de réflexion** : L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux et opposés. L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont liés par la première loi de

Snell-Descartes :  $i_1 = i'_1, \quad \widehat{i_1} = -\widehat{i'_1}$

**Réfraction**

**1<sup>ère</sup> loi de réfraction** : Le rayon incident, le rayon réfracté est la normale à la surface de séparation sont dans le plan d'incidence.

**2<sup>ème</sup> loi de réfraction** : L'angle d'incidence et l'angle de réfraction sont liés par la deuxième loi de Snell-Descartes :  $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$

- **Conséquence de la réfraction de la lumière** :

Quand  $n_1 < n_2$  donc  $i_2 < i_1$ , on peut avoir la réfraction limite ;

Quand  $n_1 > n_2$  donc  $i_2 > i_1$ , on peut avoir la réflexion totale.

- L'angle critique  $\lambda$  de la réflexion totale et de la réfraction limite est énoncé par la relation :

$$\lambda = \frac{n(\text{indice du milieu le moins réfringent})}{n'(\text{indice du milieu le plus réfringent})}$$

- Les applications de la réflexion totale sont nombreuses :

Elle permet de guider la lumière à l'intérieur des fibres optiques.

**Loi de KEPLER**

Lorsque les angles d'incidence sont faibles, la loi de snell-Descartes peut s'écrire :

$$i_1 = n i_2$$

**Le principe de Fermat**

Il peut s'exprimer par :

- La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours est minimale.

# Exercices et Solutions

## Exercice 1

Calculer la longueur d'onde de De Broglie associée à :

1. Une balle de fusil de masse 1 g et de vitesse 500 m/s
2. Un grain de poussière de masse  $10^{-15}$  kg et de vitesse 1 mm/s
3. Un électron accéléré sous une différence de potentiel  $U = 100$  V
4. Un électron dans l'atome d'hélium ayant une énergie cinétique de 24,6 eV correspondant à l'énergie d'ionisation de l'hélium.
5. Une particule  $\alpha$  (noyau d'hélium) ayant une énergie cinétique de 7,7 MeV.

Commenter dans chaque cas le résultat obtenu.

## Correction exercice 1

La longueur d'onde de De Broglie est définie par :  $\lambda = \frac{h}{p}$

1. Longueur d'onde associée à la balle de fusil :

$$p = mv = 10^{-3} \times 500 = 0,5 \text{ kg.m.s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{6,64 \cdot 10^{-34}}{0,5} = 1,33 \cdot 10^{-33} \text{ m}$$

$\lambda$  est trop petite pour être mise en évidence expérimentalement

2. Longueur d'onde associée à un grain de poussière :

$$p = mv = 10^{-15} \times 10^{-3} = 10^{-18} \text{ kg.m.s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{6,64 \cdot 10^{-34}}{10^{-18}} = 6,64 \cdot 10^{-16} \text{ m}$$

$\lambda$  est encore trop petite pour être mesurée.

3. Longueur d'onde associée à un électron accéléré

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Comme  $E_c = \frac{p^2}{2m}$ , on a  $p = \sqrt{2mE_c}$  et  $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$

Soit :  $\lambda(\text{\AA}) = \frac{12.3}{\sqrt{U(\text{V})}}$

Pour  $U=100\text{V}$ , on a :  $\lambda = 1.23\text{\AA}$  cette longueur d'onde se situe dans le domaine des rayons x

4. Longueur d'onde associée à un électron de l'atome d'hélium : la formule précédente reste valable avec  $E_c = 24.6 \text{ eV}$   $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} = \frac{12.3}{\sqrt{24.6}} = 2.5 \text{\AA}$

Cette longueur d'onde se situe également dans le domaine des rayons x.

5. Longueur d'onde associée à une particule  $\alpha$  :

$E_c = 7.7 \text{ MeV} = 12,32 \cdot 10^{-13} \text{ J}$  et  $m_\alpha = 6,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$

Soit :  $p = \sqrt{2mE_c} = 1,28 \cdot 10^{-19} \text{ Kg.m.s}^{-1}$

D'où  $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} = 5,16 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

### Exercice 2

Une radiation lumineuse émise par une lampe à vapeur de chlorure de sodium a une période  $T=1,533 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ . On donne  $c = 300.000 \text{ km.s}^{-1}$ . Il est à rappeler que la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière visible à l'œil humain varie entre  $\lambda_{\text{Indigo}} = 400 \text{ nm}$  et  $\lambda_{\text{Rouge}} = 800 \text{ nm}$ .

1. Quelle est la fréquence  $\nu$  de cette radiation, présentée sous forme d'une écriture scientifique ?

2. Quelle est sa **longueur d'onde**  $\lambda_0$  dans le vide exprimée en  $\mu\text{m}$ , en nm puis en  $\text{\AA}$  ?

3. Cette radiation **est-elle visible** à l'œil humain nu ? Si oui, indiquer **sa couleur**.

4. Cette radiation se propage dans un milieu verre crown BK7 d'indice de réfraction  $n = 1.5524$

- Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de cette radiation relative à cette substance.

a- Sa fréquence  $\nu$  change-elle ?

b- Sa couleur change-t-elle ? Expliquer.

**Correction exercice 2**

$$1. T = 1,533 \cdot 10^{-15} \text{ s, d'où la fréquence } \nu : \text{A.N.} : \nu = \frac{1}{T} \Rightarrow \nu = 6.523 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$2. \lambda_0 = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{c}{\nu} = 459.9 \text{ nm} = 0.4599 \mu\text{m}$$

3. Oui, cette radiation est visible à l'œil nu car  $\lambda_0 = 459.6 \text{ nm} \in [450 \text{ nm}, 750 \text{ nm}]$  qui représente la partie visible à l'œil nu du spectre électromagnétique. La couleur de cette radiation est bleue.

4. Dans un milieu verre crown BK7 d'indice  $n = 1.5524$ , la longueur d'onde  $\lambda$  de cette radiation s'exprime :  $\lambda = \nu \cdot T = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{459.9}{1.5524} = 296.251 \text{ nm}$

La longueur d'onde  $\lambda$  et la vitesse  $v$  de propagation changent avec l'indice  $n$ . En revanche la fréquence  $\nu$  et la période  $T$  restent inchangés. La couleur est donc la même.

**Exercice 3**

1. Quelle est la vitesse de propagation de la lumière dans une fibre optique d'indice de réfraction 1,48 ?

2. Quelle durée prend le trajet de la lumière dans une fibre optique de 3 km de longueur ?

On donne :  $c_0 = 300\,000 \text{ km/s}$  (vitesse de la lumière dans le vide).

**Correction exercice 3**

1. La vitesse de propagation de la lumière :

$$c = \frac{c_0}{n} = \frac{3 \cdot 10^5}{1.48} = 2.027 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

2. La durée

$$t = \frac{L \cdot n}{c_0} = \frac{1.48 \cdot 3}{3 \cdot 10^5} = 1.48 \mu\text{s}$$

**Exercice 4**

L'indice de réfraction d'un milieu transparent dépend de la température du milieu mais aussi de la fréquence de l'onde considérée. Un rayon lumineux se propage dans l'air. Il arrive sur un morceau de flint (le flint est un verre à base de plomb utilisé en optique) avec un angle d'incidence de  $20^\circ$  avec la normale à la surface de verre. L'indice de réfraction du flint est  $n = 1,585$  pour une radiation de longueur d'onde  $\lambda = 486 \text{ nm}$ . Que deviennent les quantités suivantes : fréquence, vitesse de l'onde et longueur d'onde lorsque la lumière passe de l'air au flint (on assimile l'air au vide). Faire les applications numériques dans les milieux 1 (l'air) et 2 (le flint).

**Correction exercice 4**

- Une onde lumineuse est caractérisée par sa fréquence  $f$  : la fréquence est une grandeur invariante de l'onde. Une onde de longueur d'onde  $\lambda_2 = 486 \text{ nm}$  dans le flint, dont l'indice est  $n_2 = 1,585$  ; a une fréquence :  $f = v/\lambda = c/n_2\lambda_2 = 3,895 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .
- Par définition de l'indice d'un milieu, les vitesses de l'onde dans les milieux 1 et 2 sont données par :
  - Dans l'air,  $n_1 = 1$  ;  $v_1 = c/n_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  ;
  - Dans le flint,  $n_2 = 1,585$  ;  $v_2 = c/n_2 = 1,89 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Dans le flint, on a  $\lambda_2 = 486 \text{ nm}$ . La longueur d'onde  $\lambda_1$  dans l'air se déduit de la vitesse  $v_1$  et de la fréquence  $f$  :  $\lambda_1 = v_1/f = n_2/n_1\lambda_2 = 770 \text{ nm}$

**Conclusion**

**Lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre, seule la fréquence est conservée ; sa vitesse de propagation et sa longueur d'onde sont modifiées.**

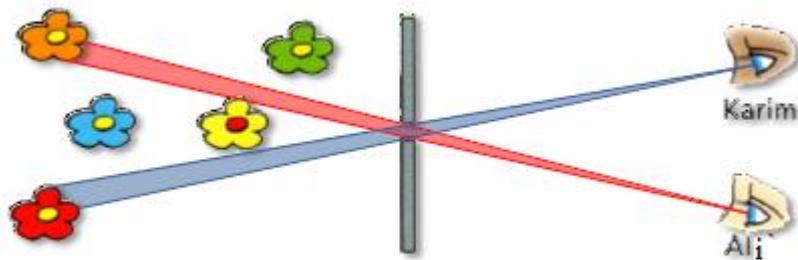
**Exercice 5**

Sur la figure ci-dessous, quelle fleur est vue par Karim ? et par Ali ?

Justifie vos réponses en recopiant le schéma et en traçant des rayons lumineux.

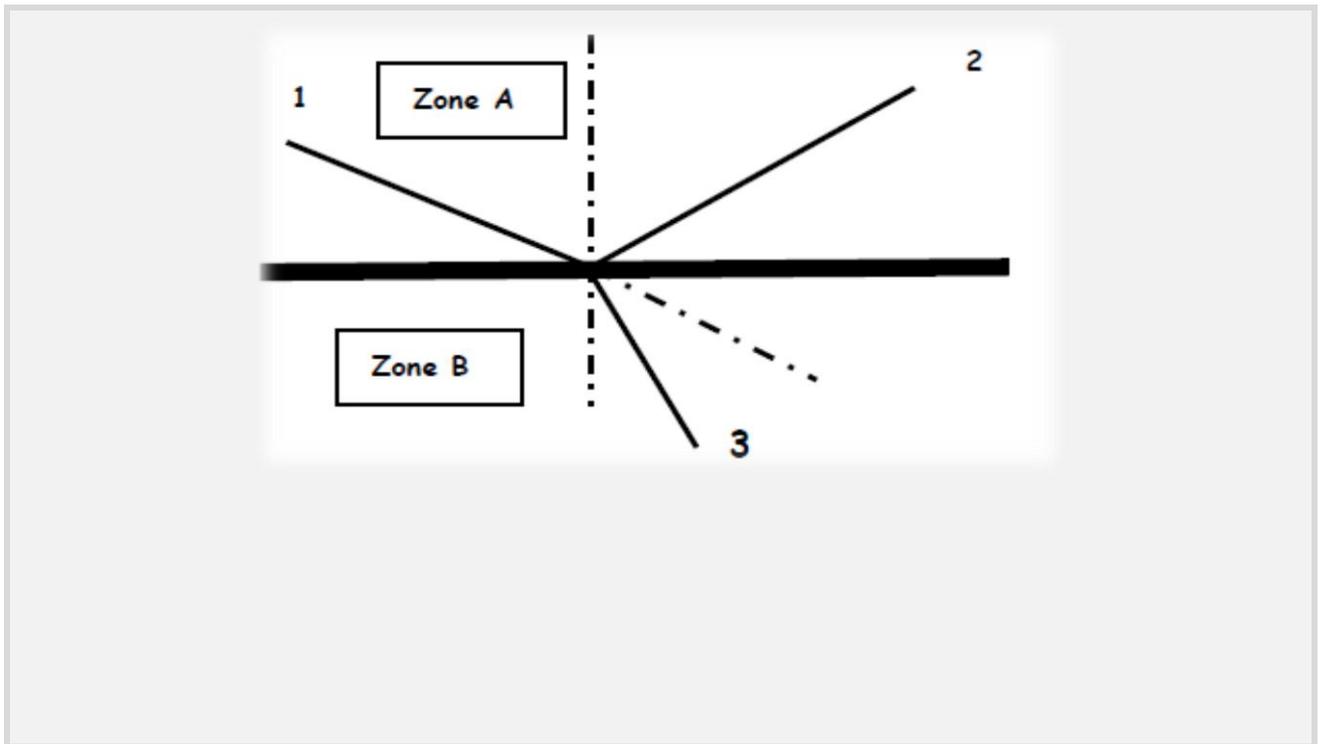
**Correction exercice 5**

Karim voit la fleur rouge (en bas à droite) et Ali voit la fleur orange (en haut à gauche).

**Exercice 6**

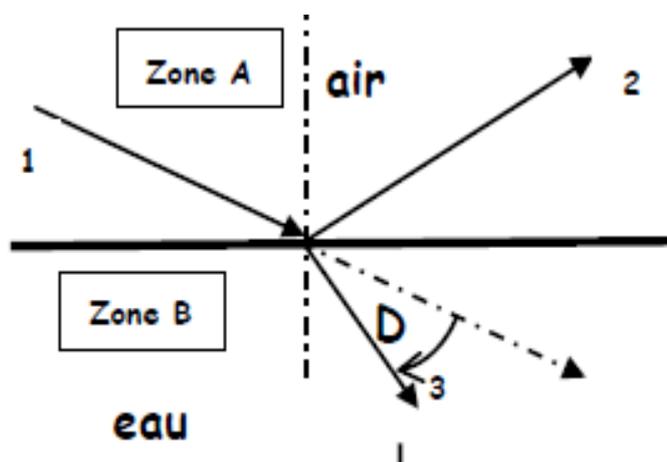
Un fin pinceau lumineux arrive sur un dioptre plan séparant l'eau de l'air d'indice de réfraction  $n=1$ . On donne  $n_{\text{eau}}=1,33$ . On représente les rayons observés sur la figure ci-dessous.

1. Identifier les différents rayons avec les angles correspondants.
2. Indiquer la déviation  $D$  de la lumière
3. Dans quelle zone l'eau se trouve-t-elle ?
4. Calculer l'angle limite de réfraction  $A$ .



### Correction exercice 6

- a. Le rayon **1** est le **rayon incident**, le rayon **2** est le **rayon réfléchi** et le rayon **3** est le **rayon réfracté**.
- b. La déviation **D** est représentée sur le schéma ci-dessous



- c. L'eau se trouve dans la zone B, car en traversant la surface de séparation des 2 milieux homogènes (l'air et l'eau), le rayon lumineux change de direction.
- d. L'angle de réfraction limite **D** de ces 2 milieux est:

$$\sin D = \frac{n_{air}}{n_{eau}} = \frac{3}{4} = 0.75 \Rightarrow D = \arcsin(0.75) = 49^\circ$$

## Chapitre II

# Stigmatisme, Aplanétisme, Dioptrés et Miroirs

## II. Généralités

### II.1 Système optique

Un système optique (**S**) peut être constitué d'une succession de dioptries (surfaces de séparation entre deux milieux d'indices différents), de miroirs (surfaces réfléchissantes non nécessairement planes) ou de lentilles. Il y a plusieurs systèmes :

- **Système dioptrique** : système ne comportant que des dioptries ;
- **Système catadioptrique** : système comportant au moins un miroir ;
- **Système optique centré** : système présentant un axe de révolution appelé axe optique du système.

### II.2 Stigmatisme et Aplanétisme

- **Stigmatisme** : Un système optique est rigoureusement stigmatique (figure .II.1), si tous les rayons émis par le point objet (**A**) convergent en un seul point image (**A'**). Autrement dit, quand il donne une image nette de bonne qualité, on dit que **A** et **A'** sont conjugués par le système optique.

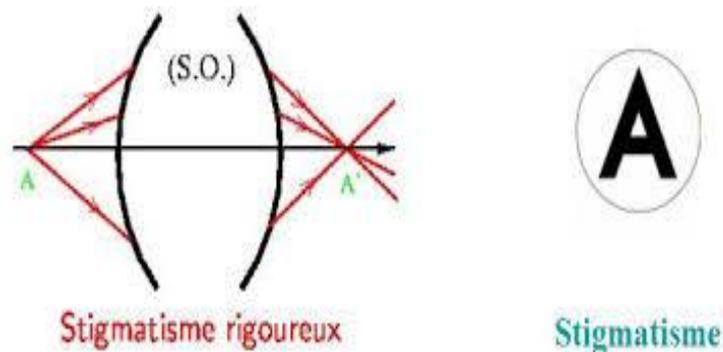


Figure II.1 Stigmatisme

- **Aplanétisme** : Un système optique est aplanétique (figure .II.2), s'il tout objet lumineux situé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique donne une image plane également perpendiculaire à l'axe optique.

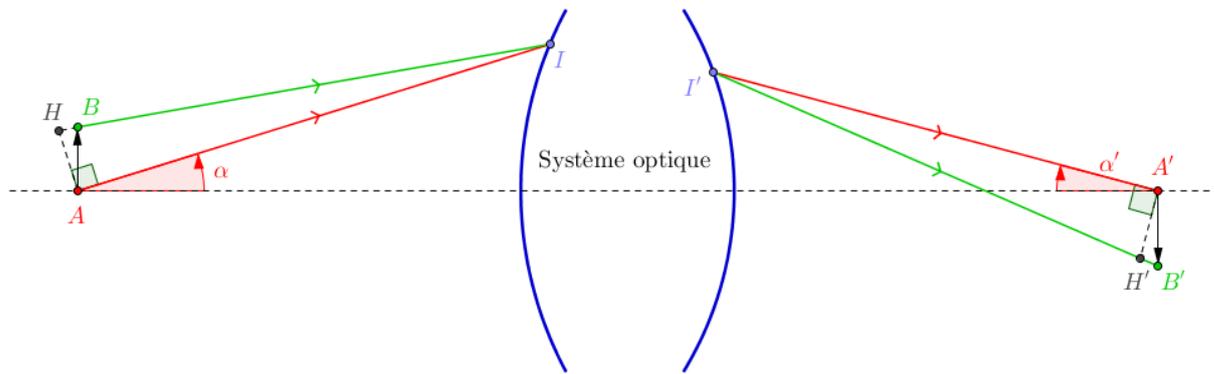


Figure II.2 Aplanétisme

- **Astigmatisme** : Un système optique est astigmatique (figure II.3), si le système ne présente pas la condition de stigmatisme, donc l'image d'un point est une tache. Autrement dit, le système donne une image floue.

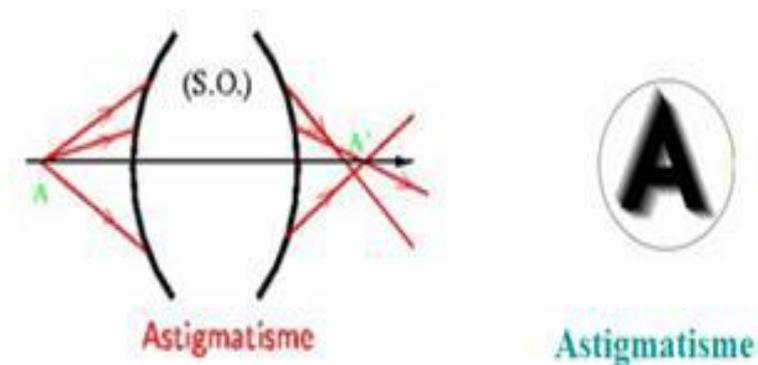


Figure II.3 Astigmatisme

- **Stigmatisme approché** : Un système est dit stigmatisme approché (figure II.4), si tout rayon passant par A passe au voisinage d'A', après avoir traversé le système optique.

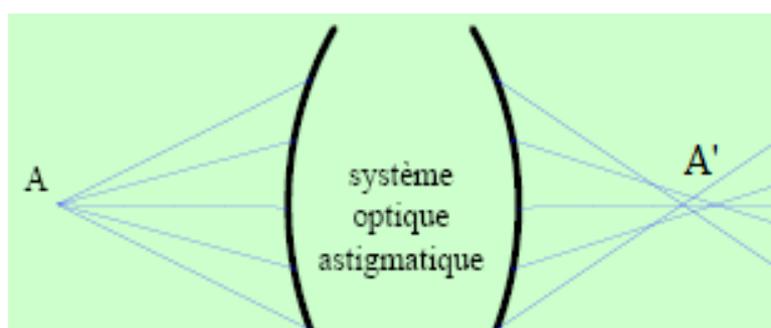


Figure II.4 Stigmatisme Approché

### II.3 Approximation de Gauss

Si les rayons sont peu inclinés de l'axe optique et écartés ( $< 10^\circ$ ), on se trouve alors dans le cadre des conditions de Gauss. Dans ces conditions, on admettra que le miroir sphérique est aplanétique et stigmatique c-à-dire :

- Tout point A situé sur l'axe optique possède un conjugué A', situé aussi sur l'axe optique ;
- Tout plan orthogonal à l'axe optique possède un plan conjugué orthogonal à l'axe optique. Autrement dit, on a les propriétés suivantes (voir Figure 10):
- **Relation de conjugaison:** Le système vérifiant les conditions de Gauss assure un stigmatisme et un aplanétisme approchés.
- **Grandissement transversal :** Tout couple de points conjugués (B, B') vérifient la relation :

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

Où la constante  $\gamma$  est appelée grandissement transversal.

- **Grandissement angulaire :** Angles incidents et émergents vérifient également :

$$\beta = \frac{u'}{u}$$

Où la constante  $\beta$  est appelée grandissement angulaire.

### II.4 Notion de foyer objet, image, plan focal objet, plan focal image et vergence

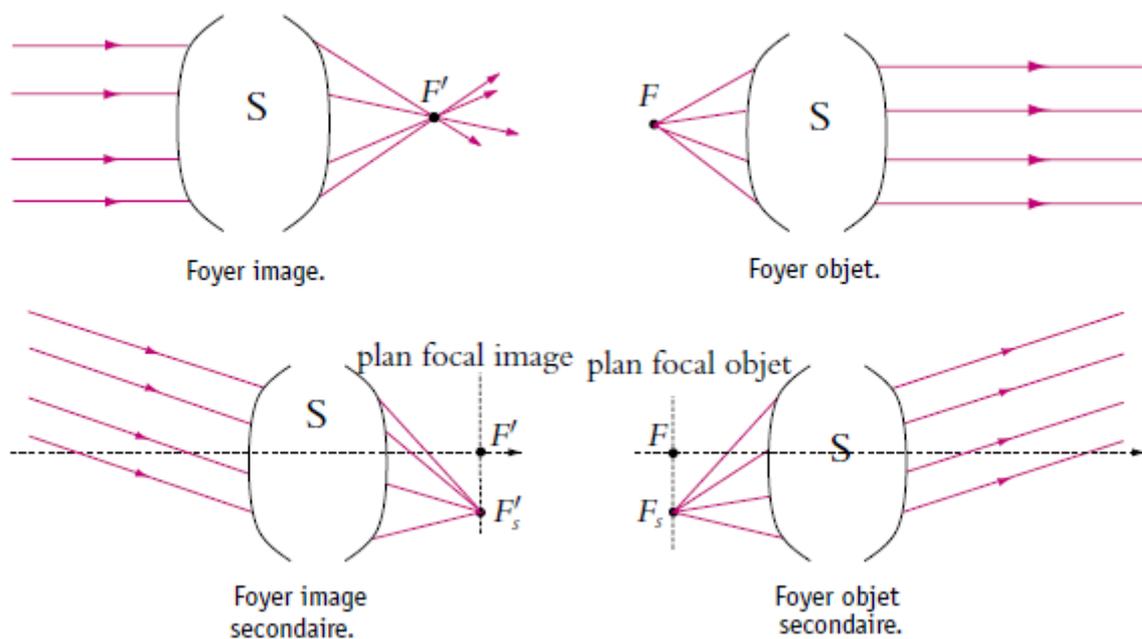
- **Foyer image :** Lorsqu'un objet situé à l'infini sur l'axe optique très éloigné de (S), son image à travers (S) est appelée foyer image **F'** et se trouve sur l'axe optique.
- **Foyer objet :** C'est le point de l'axe optique dont l'image est rejetée à l'infini sur l'axe optique (figure II.5) et appelée foyer objet **F**.
- **Plan focal image :** Le plan transverse contenant **F'** est appelé plan focal image (figure II.5).
- **Plan focal objet :** Le plan transverse contenant **F** est appelé plan focal objet ;
- **Vergence :** La vergence est donnée par l'expression suivante :

$$V = \frac{n' - n}{SC} = \frac{n'}{SF'} = -\frac{n}{SF}$$

- Si :  $V > 0 \Rightarrow \overline{SF'} > 0$ ; le dioptré est convergent (figure II.6 a et c) ;
- Si :  $V < 0 \Rightarrow \overline{SF'} < 0$ ; le dioptré est divergent (figure II.6.b et d) ;
- L'unité de la vergence est la dioptrie  $\equiv m^{-1}$ .

### Remarque

- Dans le cas un objet est très éloigné et ces rayons incidents non parallèles avec l'axe optique, l'image sera dans le même plan que l'image d'un objet à l'infini et ces rayons sont parallèles à l'axe optique, donc l'image sera dans le plan focal image dans ce cas :
  - Le point image  $F_S$  est appelé **foyer image secondaire** (figure II.5) ;
  - De même, un point  $F_S$  du **plan focal objet** est dit **foyer objet secondaire**, donnera une image à l'infini non parallèle à l'axe optique (figure II.5).



**Figure II.5** Les foyers et les plans focaux

- Lorsque la distance focale objet est négative, la distance focale image et la vergence sont positives, le dioptré est dit convergent ;
- Si la distance focale objet est positive, la distance focale image et la vergence sont dans ce cas négatives, le dioptré est dit divergent ;

- Lorsque le dioptre est convergent, le centre de courbure **C** se trouve dans le milieu dont l'indice est le plus grand.

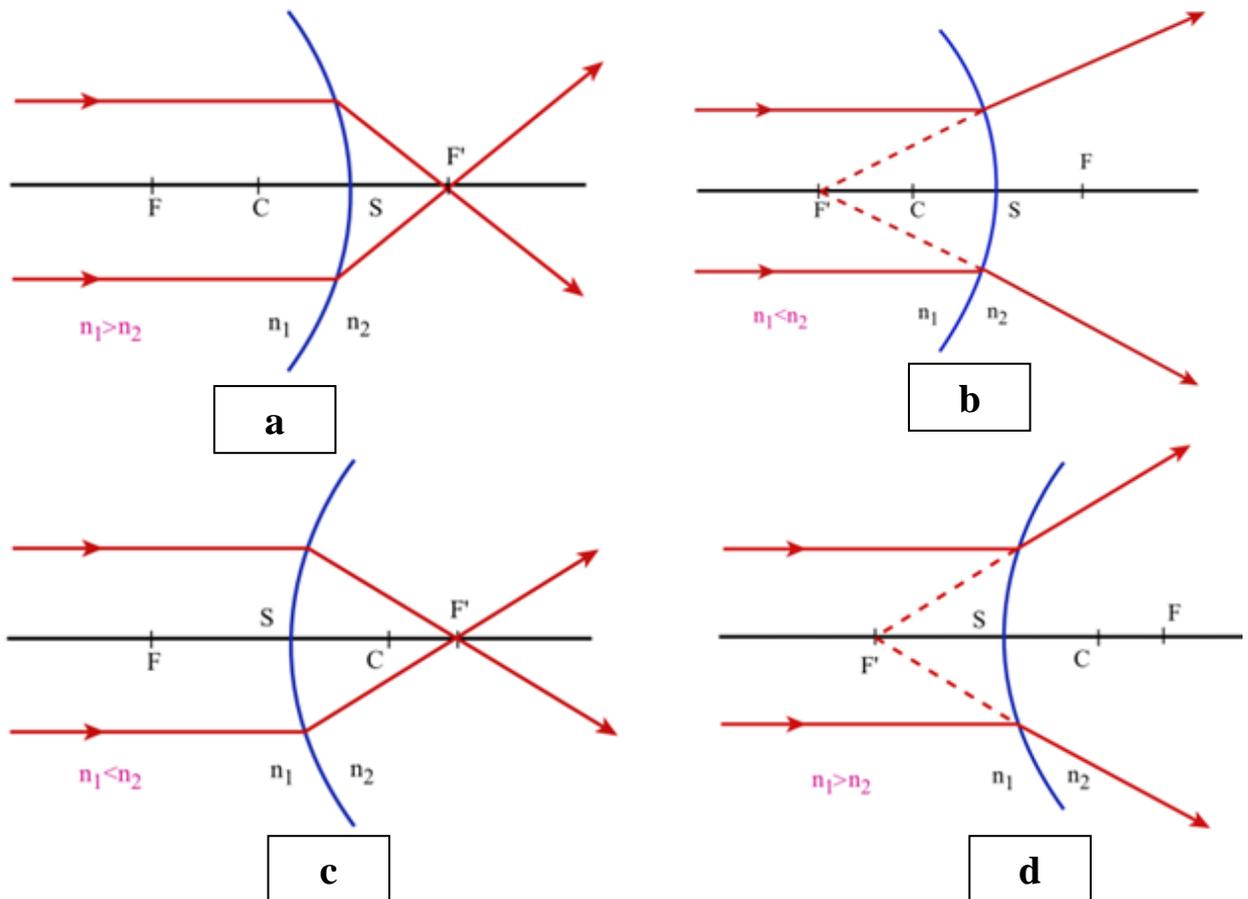


Figure .II.6 La vergence.

## II.5 Systèmes optiques simples à faces planes

Les systèmes optiques que nous aborderons dans ce chapitre, seront tous des systèmes utilisés en approximation gaussienne.

### II.5.1 Miroir plan

Le miroir plan est un système optique, lorsque tous les rayons émis par **A** (point objet), convergent en un seul point **A'**, appelé point image. On dit alors que les points **A** et **A'** sont conjugués par le système optique (miroir).

Nous pouvons donc construire l'image d'un objet **AB**, à travers le miroir; tout point du segment **AB** sera sur le segment **A'B'**, donc l'image à la même taille que l'objet.

On a deux cas possible de l'objet et de l'image (figure II.7):

- Objet Réel-Image Virtuelle.
- Objet Virtuel-Image Réelle.

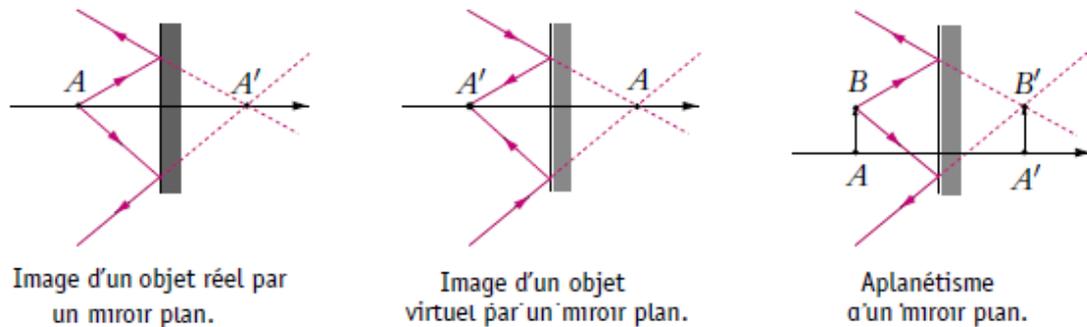


Figure II.7. Les objets et les images.

On définit le grandissement, par la relation suivante :

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

Si :

- $\gamma = 1$  : L'image à la même taille que l'objet et dans le même sens, donc on peut dire que  $A'B'$  est symétrique de  $AB$  par le miroir ;
- $\gamma > 1$  : L'image est droite et agrandie ;
- $0 < \gamma < 1$  : L'image est droite et étroite ;
- $-1 < \gamma < 0$  : L'image est renversée et étroite ;
- $\gamma < -1$ , l'image est renversée et agrandie.

### II.5.1.1 Construction de l'image d'un point objet

Pour construire l'image  $A'$  de  $A$  (figure .II.8), on utilise deux rayons incidents et on applique les lois de la réflexion aux points  $I$  et  $I'$  :

- Les rayons issus du point objet  $A$  pénètrent dans le miroir  $M$  et subissent des réflexions aux points  $I$  et  $I'$ .
- Le prolongement des réflexions aux points  $I$  et  $I'$ , se coupent pour donner un point image virtuel  $A'$ .

- La relation de conjugaison du miroir plan s'écrit :  $HA = -HA'$ .

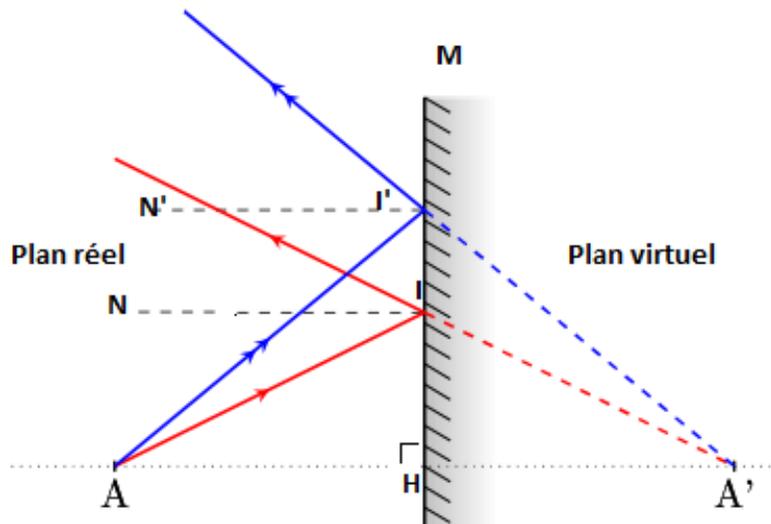


Figure. II.8 Construction de l'image d'un point objet

**II.5.1.2. Construction de l'image d'un objet transverse au miroir**

Soit un objet réel **AB** transverse (parallèle au miroir), son image virtuelle est **A'B'**.

- Pour construire l'image **A'B'** de l'objet **AB** (figure. II.9), on utilise quatre rayons incidents et on applique les lois de la réflexion aux points **I** et **I'**,
- On définit le grandissement transverse par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = 1$$

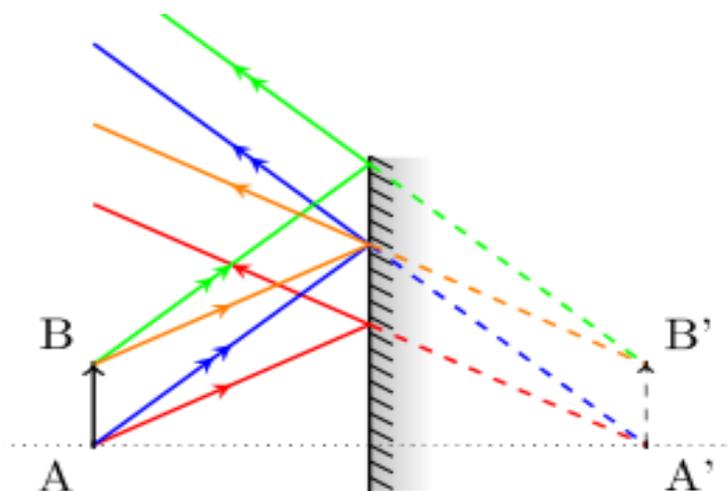


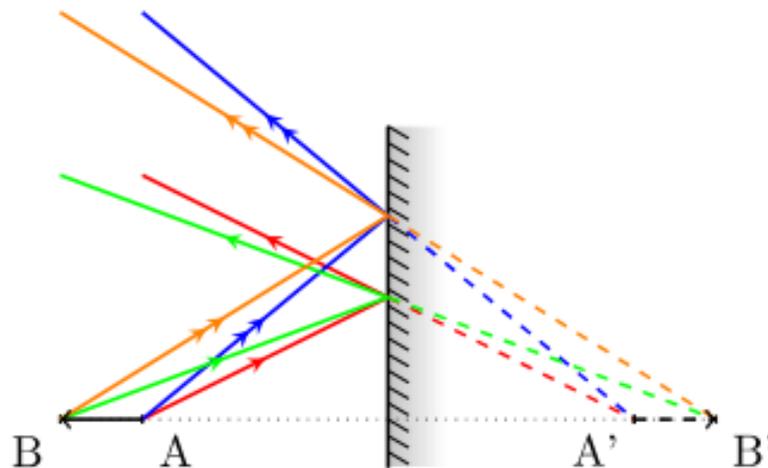
Figure. II.9 Construction de l'image d'un objet transverse au miroir

### II.5.1.3. Construction de l'image d'un objet axial au miroir

Soit un objet réel **AB** transverse (perpendiculaire au miroir), son image virtuelle est **A'B'** :

- Pour construire l'image **A'B'** de l'objet **AB**, on utilise quatre rayons incidents et on applique les lois de la réflexion aux points **I** et **I'**.
- On définit le grandissement transverse par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -1$$



**Figure. II.10** Construction de l'image d'un objet axial au miroir.

### II.5.2 Dioptré plan

Le dioptré (figure .II.11) est la surface qui sépare entre deux milieux homogènes et dont les indices différents. Il est dit dioptré plan si cette surface est plane.

La position de l'objet **A** noté **HA** ou **p** et la position de l'image **A'** noté **HA'** ou **q** sont relié par la relation de conjugaison :

$$\frac{n_1}{HA} = \frac{n_2}{HA'} \quad \text{ou} \quad \frac{n_1}{p} = \frac{n_2}{q}$$

La figure II.112 montre les différents positions :

- L'objet et l'image sont toujours du même coté du dioptré ;
- L'objet et l'image sont toujours de nature différente :
  - Si l'objet est réel son image est virtuelle et vice versa.

- L'image est toujours droite par rapport à l'objet et de même grandeur que l'objet :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = +1$$

Où  $\gamma$  est le grandissement.

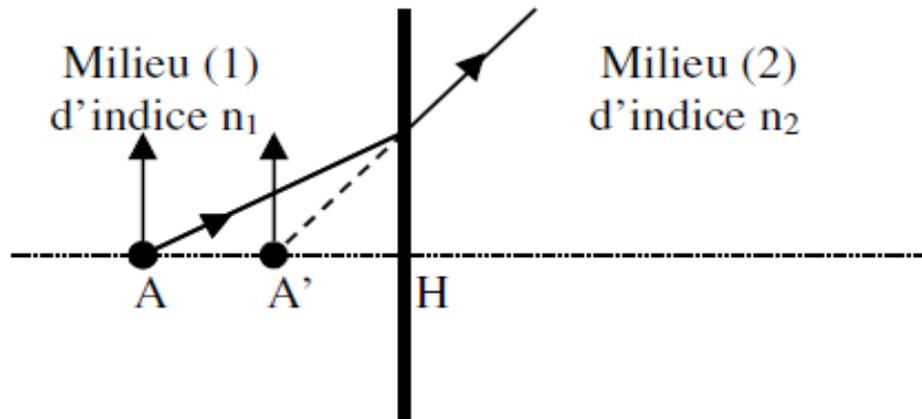


Figure. II.11 Le dioptre

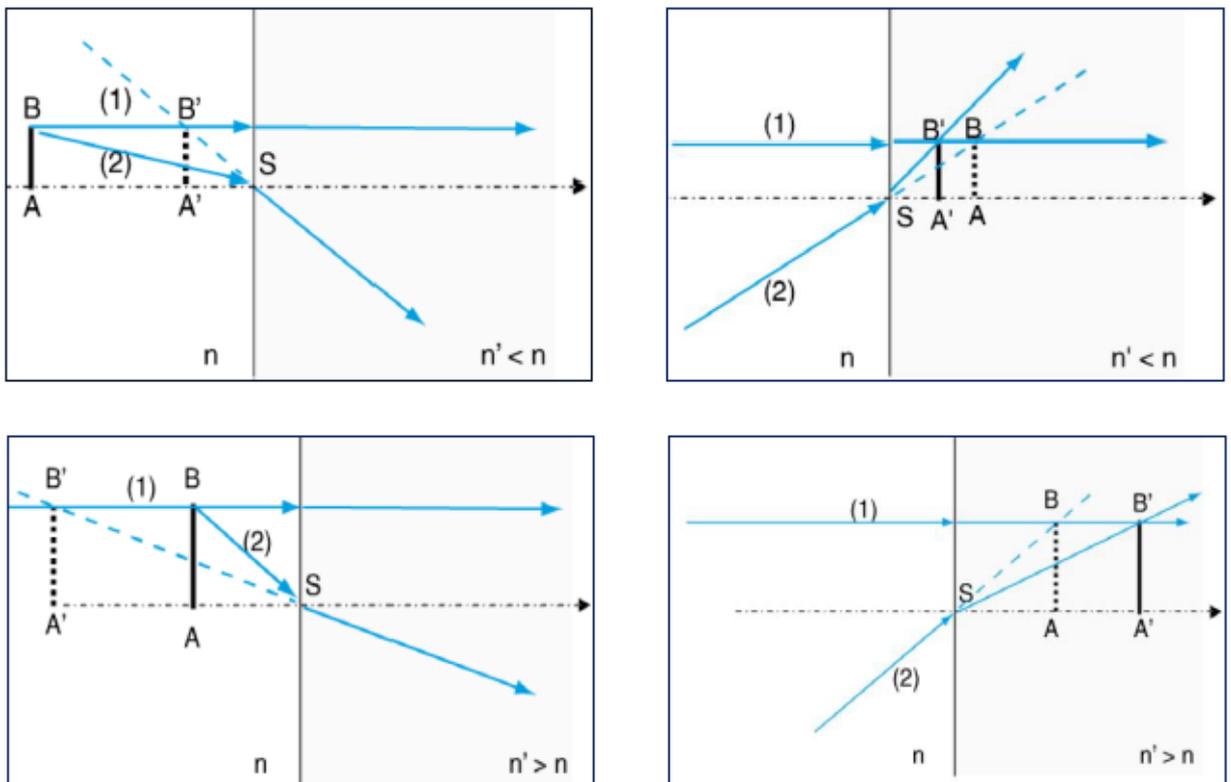


Figure. II.12 Construction de l'image d'un objet au dioptre

**II.5.3 La lame à faces parallèles**

La lame à faces parallèles (figure .II.13) est constituée de deux dioptrés plans parallèles entre eux. La lame est supposée dans l'air son épaisseur  $e$  et son indice est  $n$ .

Les faisceaux incidents et les faisceaux émergents sont parallèles :

- L'angle d'incidence égal à l'angle d'émergence.

Le déplacement latéral  $d$ , est donné par la relation suivante :

$$d = e \cdot \frac{\sin(i - r)}{\cos r}$$

La position de l'objet  $AB$  et la position de l'image  $A'B'$  sont reliées par la relation suivante :

$$\overline{AA'} = e \left[ 1 - \frac{1}{n} \right] \dots\dots\dots (*)$$

- La distance : Objet-Image est indépendante de la distance : Objet-la lame ;
- Si la lame est plongée dans un milieu  $n'$  il suffit de remplacer  $n$  par  $\frac{n}{n'}$  dans la formule (\*) ;
- L'objet et l'image sont toujours de nature différente ;
- L'image est toujours droite par rapport à l'objet et de même grandeur que l'objet :

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

Où  $\gamma$  est le grandissement.

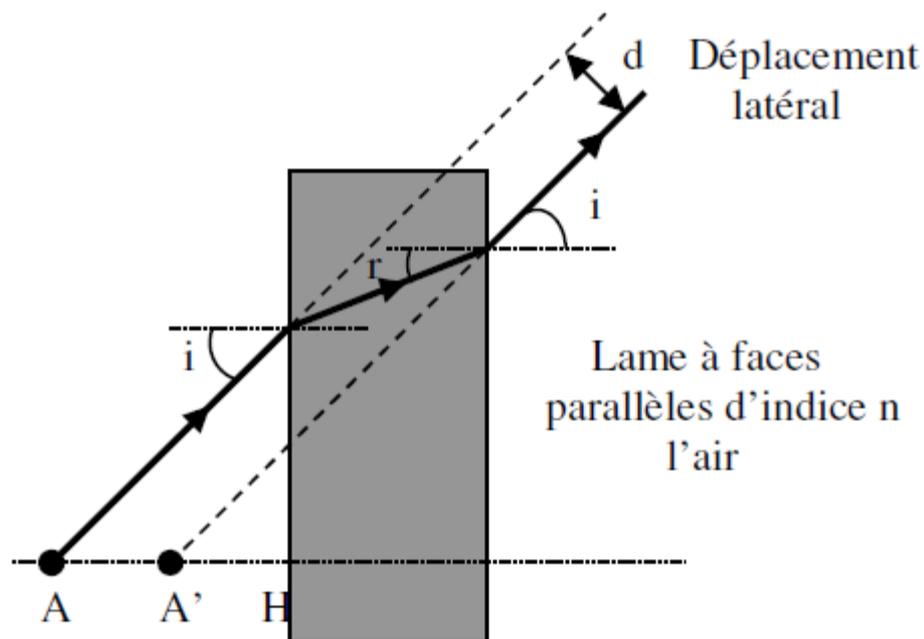


Figure. II.13 La lame à faces parallèles

#### II.5.4 Le prisme

Un prisme (figure II.14) est un ensemble de trois milieux transparents, homogènes et séparés par deux dioptries plans non parallèles appelés les faces du prisme. La troisième surface est appelée la base du prisme, qui n'intervient pas dans la propagation de la lumière.

Les dioptries plans sont des segments AB et AC et forment un triangle, L'angle formé par les deux faces du prisme est appelé l'angle du prisme [ $A = (AB, AC)$ ].

Le prisme a deux propriétés : la dispersion et la déviation (figure II.14).

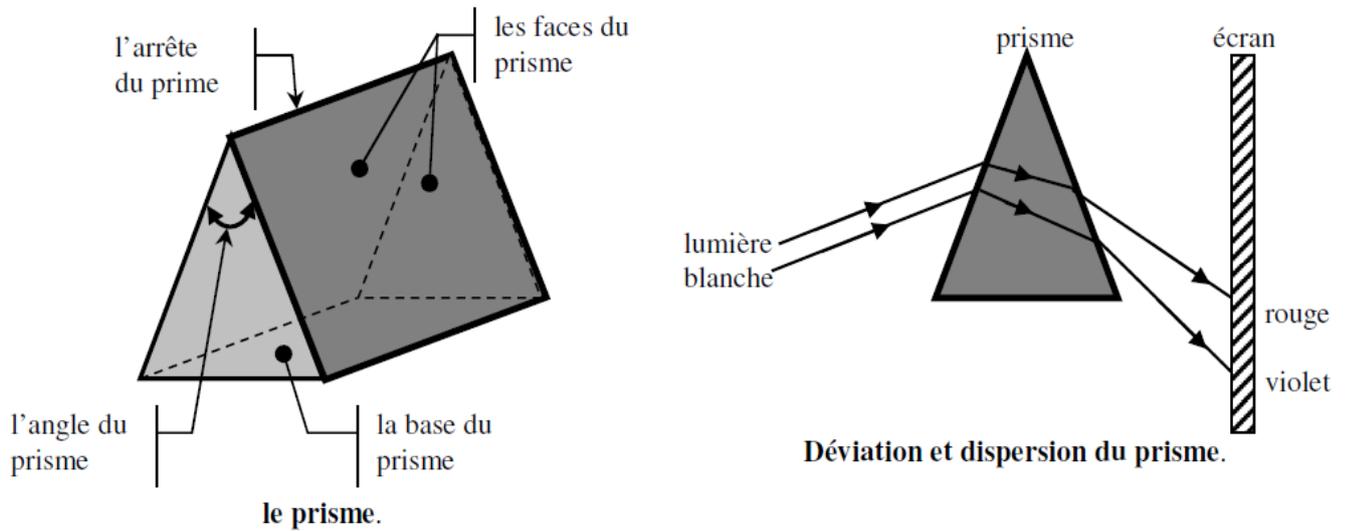


Figure. II.14 Le prisme

II.5.4.1 La déviation

Considérons un prisme d'angle  $A$ , d'indice  $n$  et l'indice de l'air est  $n'$ . La marche d'un rayon lumineux dans le prisme est donnée par la figure .II.15 :

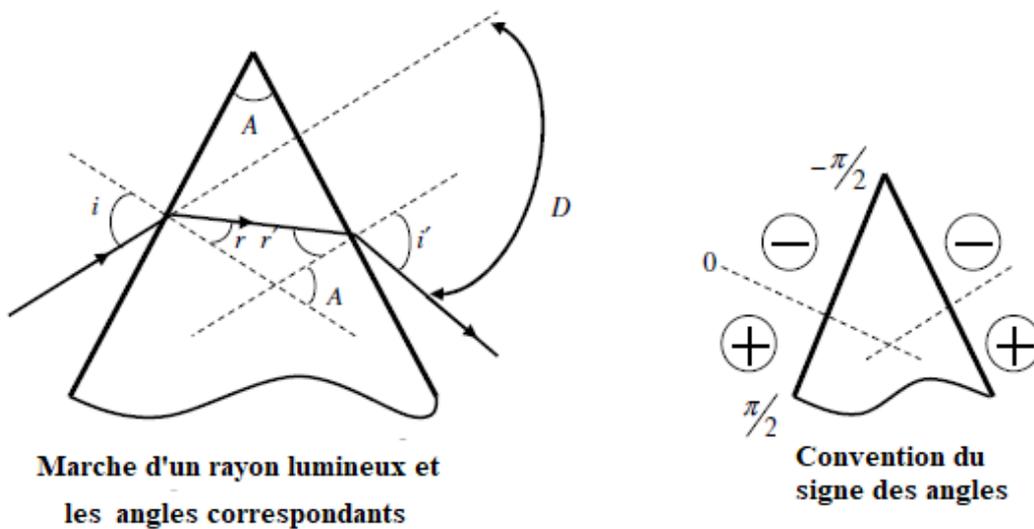


Figure. II.15 La marche d'un rayon lumineux et les angles correspondants

Les différents angles sont reliés entre eux par les relations suivantes :

$$\sin i = n \cdot \sin r$$

$$\sin i' = n \cdot \sin r'$$

$$A = r + r'$$

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

Conventions de signes :

- Les angles  $i$ ,  $i'$ ,  $r$  et  $r'$  sont des angles dont la valeur est algébrique ;
- $i$  et  $i'$  sont positifs s'ils sont du côté de la base par rapport à la normale ;
- $i$  et  $i'$  sont négatifs s'ils sont du côté de l'arrête par rapport à la normale ;
- $r$  et  $r'$  ont toujours le même signe que  $i$  et  $i'$  ;
- $A$  et  $D$  sont toujours positifs.

Conditions d'émergence :

Pour que tout rayons incident puisse émerger par la deuxième face il faut que les deux conditions suivantes soient vérifiées en même temps :

- **1<sup>ère</sup> condition** : L'angle du prisme  $A$  doit être inférieur ou égale au double de l'angle limite  $\lambda$ . Cette condition est nécessaire mais non suffisante.

$$A \leq 2\lambda$$

- **2<sup>ème</sup> condition** : L'angle d'incidence  $i$  doit être supérieur ou égal à un angle minimum  $i_0$ . Cette condition est nécessaire et suffisante. Elle est donnée par la relation :  $i \geq i_0$ , tel que :  $\sin i_0 = n \cdot \sin(A - \lambda)$ .

La déviation minimum :

La déviation  $D$  dépend de :

- L'angle d'incidence ;
- L'angle  $A$  ;
- L'indice  $n$  du prisme.

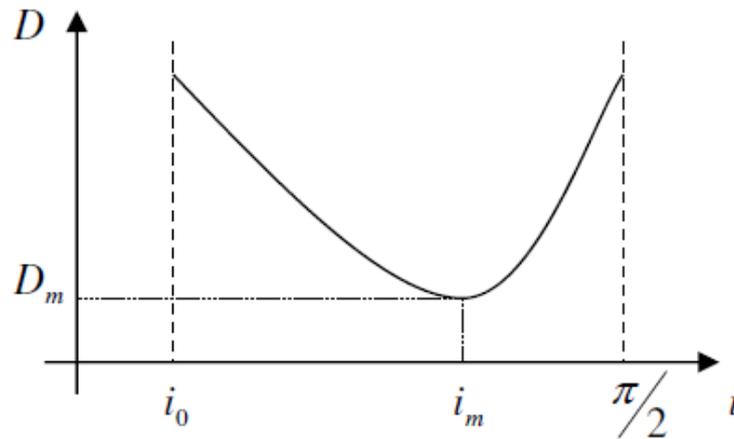
La déviation  $D$  est une fonction :

- Croissante de  $A$  ;
- Croissante de  $n$  ;
- Pour une certaine valeur  $i_m$ ,  $D$  est une fonction de  $i$  qui passe par un minimum  $D_m$ .
- Au minimum de la déviation, nous avons les relations suivantes :

$$i = i' = i_m \text{ et } \sin i_m = n \cdot \sin r_m$$

$$r = r' = r_m = \frac{A}{2}$$

$$D_m = 2 \times i_m - A$$



**Figure. II.16** La déviation en fonction de l'angle incident

## II.5.5 Miroirs sphériques

### II.5.5.1 Définitions

Le miroir sphérique est une couche composée d'étain, d'argent ou d'aluminium et une autre couche protectrice transparente et réfléchissante. Le miroir sphérique est caractérisé par :

- Le centre **C** de la sphère appelé centre du miroir ;
- Le sommet appelé sommet du miroir **S** ;
- L'axe de symétrie ou l'axe optique du miroir, par convention, cet axe est orienté de la gauche vers la droite car la lumière arrive de la gauche ;
- Le rayon de la sphère  $R = SC$ , appelé rayon de courbure du miroir.

On distingue deux types de miroirs sphériques :

- Si la réflexion se produit vers l'intérieur de la sphère, le miroir est dit concave ( $SC < 0$ ) (figure .II.17);
- Si la lumière se réfléchit vers l'extérieur de la sphère, le miroir est dit convexe ( $SC > 0$ ) (figure .II.17).

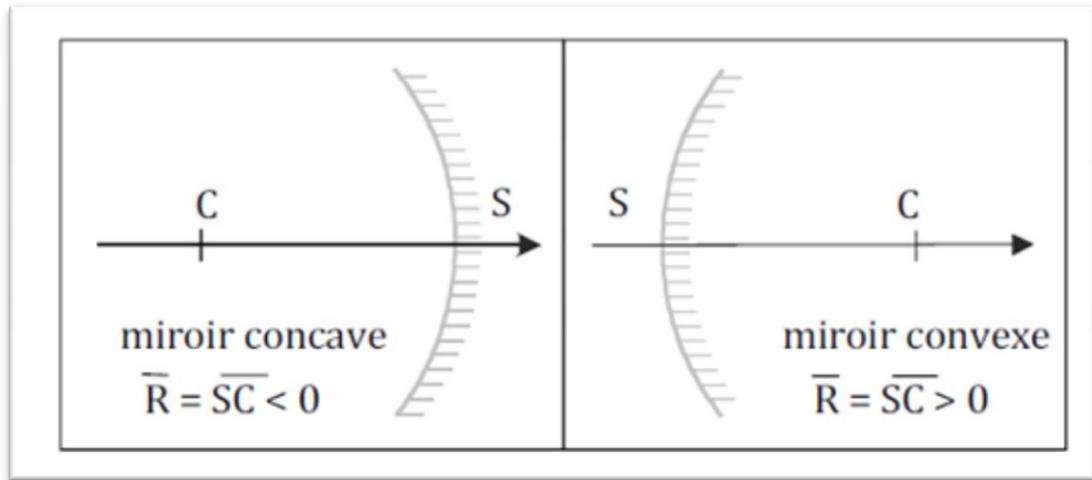


Figure. II.17 Miroirs sphériques concave et convexe.

**II.5.5.2 Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au sommet**

On considère un miroir sphérique (figure.II.18) de centre **C** et de rayon **R**, les points **A**, **A'** et **C** sont tous les trois situés à gauche de **S**.

Dans le triangle **ACI**, on a :  $\alpha + (\pi - \theta) + i = \pi$ , donc :  $\alpha - \theta + i = 0$ .....(eq. 1).

Dans le triangle **A'CI**, on a :  $(\pi - \alpha') + \theta + i = \pi$ , donc :  $\theta - \alpha' + i = 0$ .....(eq. 2).

Si : **eq(1) – eq(2)** : on obtient :  $\alpha + \alpha' = 2\theta$ .....(eq. 3).

D'après les conditions de Gauss :

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{\overline{IS}}{\overline{SA'}} ;$$

$$\tan \alpha' \approx \alpha' \approx \frac{\overline{IS}}{\overline{SA'}} ;$$

et

$$\tan \theta \approx \theta \approx \frac{\overline{IS}}{\overline{SC}}$$

Et comme :  $\alpha + \alpha' = 2\theta$  ; donc :

$$\frac{\overline{IS}}{\overline{SA'}} + \frac{\overline{IS}}{\overline{SA'}} = 2 \frac{\overline{IS}}{\overline{SC}}$$

On obtient la relation de conjugaison avec origine au sommet :

$$\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{2}{\overline{SC}} = \frac{1}{f'}$$

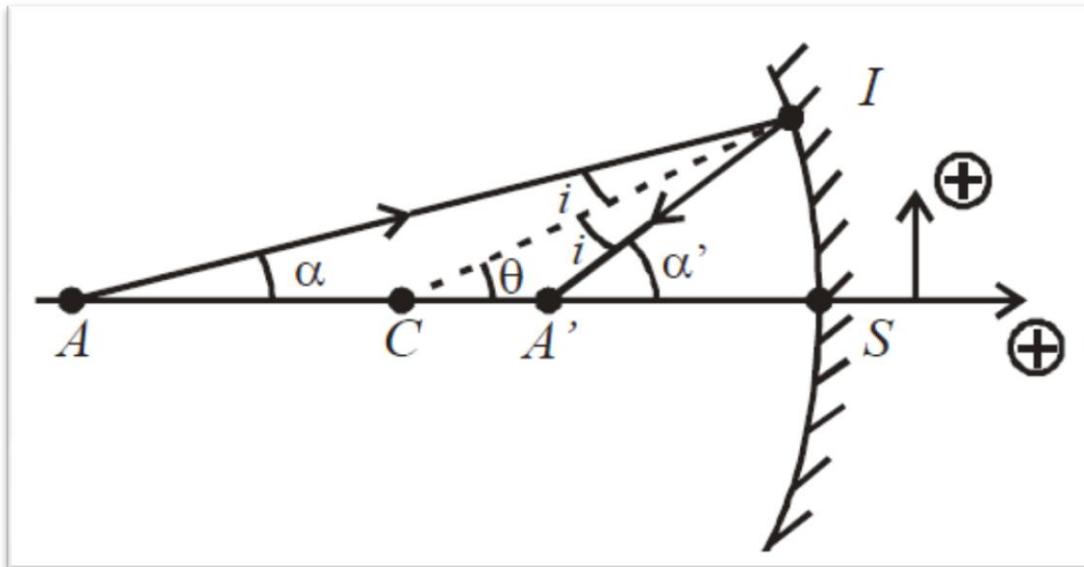


Figure. II.18 Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au sommet.

### II.5.5.3 Relation de conjugaison avec origine au foyer (ou Relation de Newton)

Après avoir construit les points **H** et **H'** projections de **B** et **B'** sur le miroir (figure II.19), on applique les relations de Thalès : Dans les triangles **BAF** et **FSH'** :

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

Dans les triangles **B'A'F** et **FSH** :

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

D'après les deux expressions précédentes, on obtient la relation de conjugaison avec origine aux foyers, appelée relation de Newton :

$$\frac{\overline{FA'}}{\overline{FS}} = \frac{\overline{FS}}{\overline{FA}} \Rightarrow \overline{FAFA'} = \overline{FS}^2 = f^2 = ff'$$



$$\frac{1}{CA} + \frac{1}{CA'} = \frac{2}{CS}$$

### Remarque

- Toutes les formules ont été faites pour le miroir concave, mais toutes les expressions sont valables pour le miroir convexe.

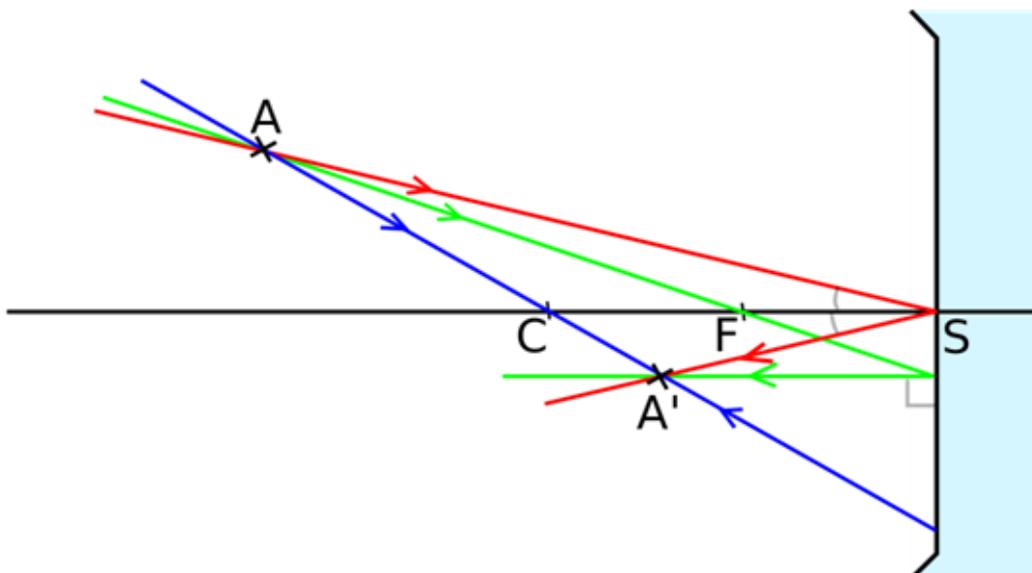
## II.6 Règles de construction

Comment trouvez vous l'image  $A'$  d'un point  $A$  réalisée avec un miroir sphérique ? Pour faire cela, il faut se rappeler que tous les rayons venant de  $A$  sont réfléchis en direction de  $A'$ . Mais on n'est pas obligés de tracer tous les rayons. Nous suffirons avec trois couleurs bleu, rouge et vert.

### Cas d'un miroir concave

1. On trace le rayon **bleu** qui va de  $A$  vers  $C$  et qui revient sur lui-même.
2. On trace le rayon **rouge** qui va de  $A$  vers  $S$  et qui revient symétriquement.
3. On trace le rayon **vert** qui va de  $A$  vers  $F$  et qui revient horizontalement.

Ces trois rayons se croisent et donne l'image  $A'$  (figure .II.20).



**Figure. II.20** Construction d'une image par un miroir concave.

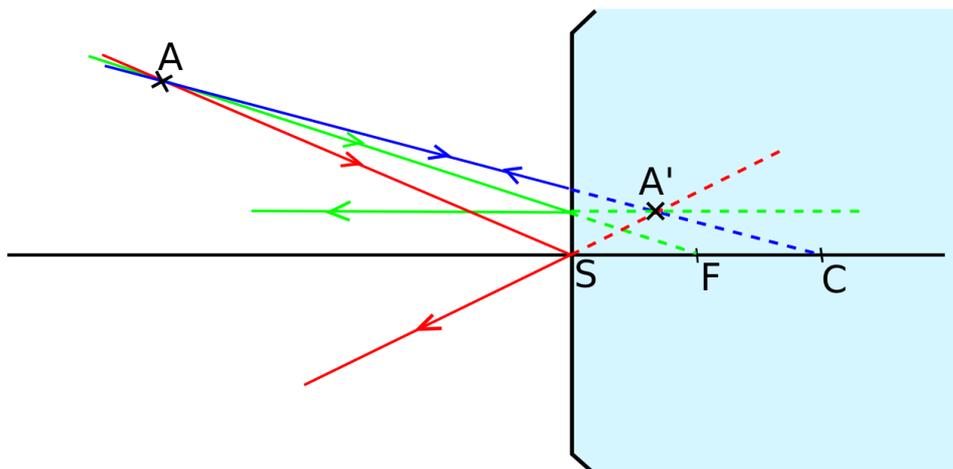
**Cas d'un miroir convexe**

1. On trace le rayon **bleu** qui va de **A** vers **C** et qui revient sur lui-même.
2. On trace le rayon **rouge** qui va de **A** vers **S** et qui revient symétriquement.
3. On trace le rayon **vert** qui va de **A** vers **F** et qui revient horizontalement.

Ces trois rayons se croisent et donnent l'image **A'**. Mais, cette image **A'** est une image virtuelle (figure .II.21).

**Remarque**

- Les schémas précédents utilisent des images réelles, mais on peut effectuer exactement la même chose avec des images virtuelles.
- On a tracé à chaque fois trois rayons différents, mais il faut garder à l'esprit que deux rayons suffisent.



**Figure. II.21** Construction d'une image par un miroir convexe

# Résumé du chapitre

Il y a plusieurs systèmes :

- **Système dioptrique** : système ne comportant que des dioptrés ;
- **Système catadioptrique** : système comportant au moins un miroir ;
- **Système optique centré** : système présentant un axe de révolution appelé axe optique du système.

**Stigmatisme** : Un système optique est rigoureusement stigmatique, si tous les rayons émis par (point objet)  $A$  convergent en un seul point  $A'$  (point image).

**Aplanétique** : Un système optique est aplanétique, s'il donne de tout objet lumineux situé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique une image plane également perpendiculaire à l'axe optique.

**Astigmatisme** : Un système optique est astigmatique, quand il donne une image floue.

**Stigmatisme approché** : Un système est dit stigmatisme approché, si tout rayon passant par  $A$  passe au voisinage de  $A'$ .

**Foyer image** : Lorsqu'un objet situé sur l'axe très éloigné de (S) (à l'infini), son image à travers (S) est appelée foyer image  $F'$  et se trouve sur l'axe optique.

**Foyer objet** : est le point de l'axe optique dont l'image est rejetée à l'infini sur l'axe optique et appelée foyer objet  $F$ .

**Plan focal image** : Le plan transverse contenant  $F'$  est appelé plan focal image

**Plan focal objet** : Le plan transverse contenant  $F$  est appelé plan focal objet.

**Vergence :** La vergence est donnée par l'expression suivante :

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

Si :  $V > 0 \Rightarrow \overline{SF'} > 0$ ; le dioptré est convergent.

Si :  $V < 0 \Rightarrow \overline{SF'} < 0$ ; le dioptré est divergent.

**Le grandissement :** On définit le grandissement, par la relation :

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

**Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine :**

$$\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{2}{\overline{SC}} = \frac{1}{f'}$$

**Relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au centre :**

$$\frac{1}{\overline{CA}} + \frac{1}{\overline{CA'}} = \frac{2}{\overline{CS}}$$

**Relation de conjugaison avec origine aux foyers, appelée relation de Newton :**

$$\frac{\overline{FA'}}{\overline{FS}} = \frac{\overline{FS}}{\overline{FA}} \Rightarrow \overline{FAFA'} = \overline{FS}^2 = f^2 = ff'$$

# Exercices et Solutions

## Exercice 1

Un homme à la surface de l'eau et observe un poisson de longueur  $L$  nageant à la profondeur  $h = 1$  m. On appelle  $T$  sa tête et  $Q$  sa queue. L'indice de l'eau est 1,33.

- Déterminer géométriquement la position de l'image  $T'$  de  $T$  formée par le dioptré plan air-eau en utilisant le rayon vertical passant par  $T$  et un rayon faisant un angle  $i$  avec la verticale.
- Calculer la profondeur  $h'$  de l'image  $T'$  avec deux angles d'incidence  $10^\circ$  et  $30^\circ$ . Que constatez-vous ? Quelles sont les conséquences et pourquoi voit-on les poissons nettement ?
- Déterminer la profondeur  $h'$  dans le cadre de l'approximation de Gauss. Faire le même calcul si le poisson est à 4 m de profondeur.
- Un autre observateur est à la surface de l'eau et regarde un poisson de 1 m de longueur situé à 1 m de profondeur. En absence d'eau, lorsqu'il est juste à la verticale, il verrait ce poisson sous un angle  $\alpha$ . Sous quel angle  $\alpha_0$  le voit-il depuis la surface de l'eau ?

## Correction exercice 1

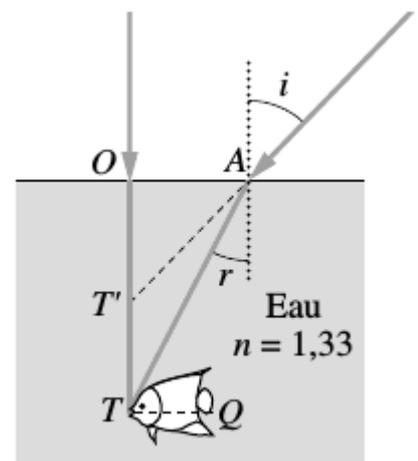
- Si l'on pose  $OT' = h'$  et  $OT = h$ , on  $\tan r = \frac{OA}{h}$  et  $\tan i = \frac{OA}{h'}$ , alors  $h' = \frac{h \tan r}{\tan i}$ . Par ailleurs, la relation entre  $i$  et  $r$  est donnée par la loi de Snell-Descartes  $\sin i = n \sin r$ .

On a finalement  $h' = \frac{h \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$ .

Si  $i = 10^\circ$ ,  $h' = 0,747$  m.

Si  $i = 30^\circ$ ,  $h' = 0,703$  m.

La position de l'image du poisson s'est légèrement déplacée d'un cas à l'autre. Ainsi, elle dépend de l'angle d'incidence. On voit net parce que l'œil intercepte des rayons provenant d'angles  $i$  proches les uns des autres. Si la pupille de l'œil était très grande, on verrait flou. L'image du poisson sera plus nette dans le premier cas que dans le deuxième.



Ceci est dû au fait que l'on est alors plus proche de la condition de validité de l'approximation de Gauss.

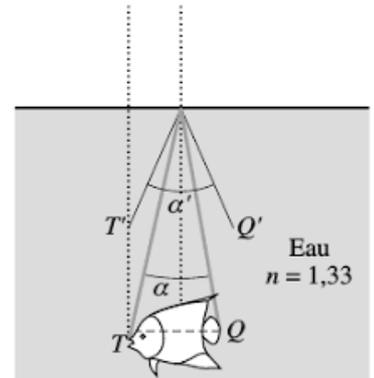
2. Dans le cadre de l'approximation de Gauss,  $i$  est très petit, ce qui entraîne  $i \approx nr$ . On a alors  $h' \approx \frac{h}{n}$ . Si le poisson est à 1 m de profondeur,  $h' = 0,752$  m. S'il est à 4 m de profondeur,  $h' = 3$  m.

3. L'angle  $\alpha$  est donné par la relation  $\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{TQ}{2h}$ .

Avec  $TQ = 1$  m et  $h = 1$  m,  $\alpha = 53,13^\circ$ .

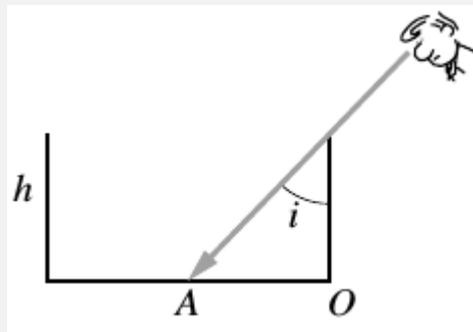
Cet angle correspond à l'angle du rayon non réfracté par l'eau.

L'angle  $\alpha'$  est l'angle apparent avec lequel on voit le poisson. Il est donné par la relation de Snell Descartes :  $\sin \frac{\alpha'}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2}$ , soit  $\alpha' = 73^\circ$ .



### Exercice 2

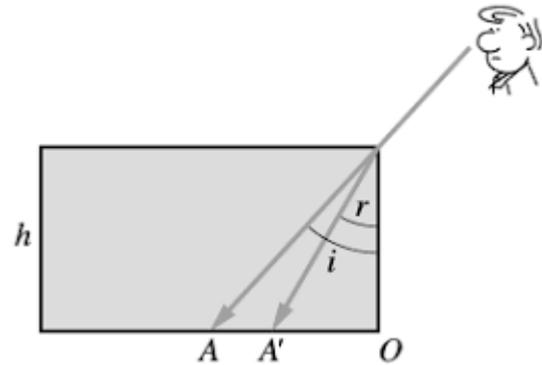
En regardant depuis le bord d'un récipient de hauteur  $h$  sous une incidence  $i$ , une longueur  $OA$  est cachée.



1. Quelle est la longueur cachée quand on regarde de la même manière le récipient plein d'un liquide d'indice  $n$
2. Calculer cette longueur avec  $n = 2$ ,  $i = 45^\circ$  et  $h = 1$  m.
3. Faites l'expérience en plaçant une pièce de monnaie au fond du récipient. Quand on remplit le verre, la pièce devient visible.

**Correction exercice 2**

Si la cuve est remplie d'un liquide d'indice  $n$ , le rayon incident se réfracte en rencontrant la surface du milieu et frappe le fond de la cuve en  $A'$ . Si  $h$  est la hauteur du milieu d'indice  $n$ ,



$$h = \frac{OA}{\tan i} = \frac{OA'}{\tan r}$$

En combinant cette équation avec la relation de Snell-Descartes, on obtient

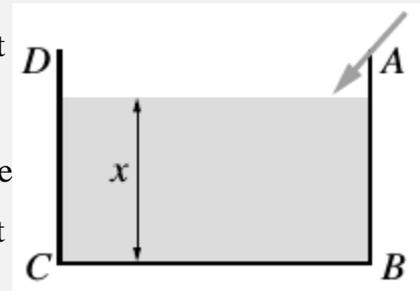
$$OA' = OA \frac{\tan r}{\tan i} = OA \frac{\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} = OA \frac{\sin i / \tan i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} = h \frac{\sin i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$$

Si  $i$  est petit, on a  $OA' \approx \frac{OA}{n}$ . De manière générale,  $OA' < OA$ .

AN :  $OA = h = 1\text{m}$ , et  $OA' = 0.38\text{m}$ .

**Exercice 3**

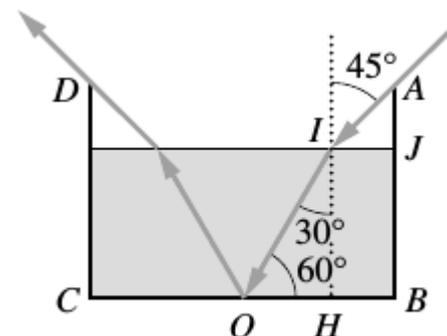
Un cuve rectangulaire ABCD, dont le fond est réfléchissant ( $CB = 1,2\text{ m}$ ), contient un liquide d'indice  $n = \sqrt{2}$  sur une hauteur  $x$ . Du point A part un rayon qui arrive sur le liquide avec un angle d'incidence de  $45^\circ$ . Il se réfracte, se réfléchit sur le fond et ressort en passant par D.



Calculer la hauteur  $x$  du liquide sachant que  $AB = 1\text{ m}$ .

**Correction exercice 3**

Pour que le rayon ressorte en passant par D, il faut qu'il frappe le fond de la cuve en son milieu c-à-d  $OB = \frac{CB}{2}$ . Les lois de Snell-Descartes permettent de calculer l'angle de réfraction comme suit :



$\sin i = n \sin r$  et  $\sin i' = n \sin r$ , ceci implique que  $i = i'$ .

$$\sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \sin r, \text{ ce qui donne, } \sin r = \frac{1}{2} \text{ c-a- dire } r = 30^\circ.$$

Dans le triangle IOH, on a :

$$\tan 60^\circ = \sqrt{3} = \frac{x}{OH} = \frac{x}{OB-HB} \quad c - a - \text{dire } x = \sqrt{3} (OB - HB)$$

Dans le triangle AIJ, on a :

$$\tan 45^\circ = 1 = \frac{HB}{AJ} = \frac{HB}{AB-x} \quad c - a - \text{dire } HB = AB - x$$

En fin, en remplaçant HB dans sa valeur, on trouve :  $x = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}-1} (AB - OB)$  ce qui donne  $x = 0.95\text{cm}$ .

#### Exercice 4

On considère un miroir sphérique, de centre C, de sommet S de rayon de courbure  $R = SC = -30\text{cm}$  et un objet AB de hauteur  $1\text{cm}$ .

1. Le miroir est-il concave ou bien convexe.
2. Donner la position du foyer objet F .
3. Déterminer l'image A'B' de AB en précisant sa position, sa taille, sa nature et son sens dans les différents cas suivants:  $SA = -60\text{cm}$ ,  $SA = -20\text{cm}$  et  $SA = 10\text{cm}$ .
4. Préciser dans chaque cas la nature de l'objet.
5. Faire la construction de l'image dans les trois cas.

#### Correction exercice 4

1. Le miroir est concave car son rayon est négatif  $R = SC = -30\text{cm}$ .
2. Le foyer principal objet F du miroir se trouve au milieu du segment [SC] ainsi :

$$f = SF = \frac{\overline{SC}}{2} = -15\text{cm} \quad (1)$$

En utilisant la formule de conjugaison origine au sommet :

$$\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{2}{\overline{SC}}$$

Pour une image A' rejetée à l'infini  $\overline{SA'} \rightarrow \infty$  (rayon qui sort parallèle à l'axe optique, dans

le cas du miroir il sera réfléchi), l'objet se situe exactement au foyer objet F ( $F \equiv A$ ).

D'où :

$$\frac{1}{\overline{SA'}} \rightarrow 0 \text{ et } \frac{1}{\overline{SF}} = \frac{2}{\overline{SC}} \text{ soit : } \overline{SF} = \frac{\overline{SC}}{2} = \frac{R}{2}$$

3. La position de A' est obtenue à partir de la formule de conjugaison origine au sommet :

$$\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{2}{\overline{SC}} = \frac{2}{\overline{SC}} = \frac{1}{\overline{SF}}$$

D'où

$$\overline{SA} = \frac{\overline{SFSA}}{\overline{SA} - \overline{SF}} \quad (4)$$

Le grandissement du miroir sphérique est donné par la relation suivante:

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = - \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} \quad (5)$$

Soit :

$$\gamma = - \frac{SA}{SA'} \quad (6)$$

La position et la taille de l'image sont déterminées en utilisant les deux relations (4) et (6) respectivement. La taille de l'image est déterminée en utilisant la relation (5).

- Pour  $SA = -60\text{cm}$  ;

➤  $SA' = -20\text{cm}$  ;

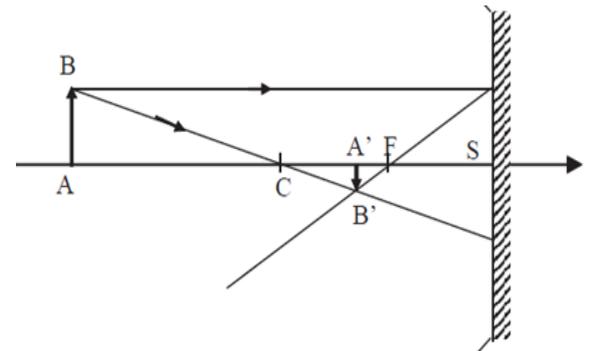
➤  $\gamma = -1/3$  ;

➤  $A'B' = -0,33\text{ cm}$  ;

➤ **Nature** : L'image et l'objet sont réels (  $SA$  et  $SA'$  sont négatives) ;

➤ **Sens** : L'image est renversée ( $\gamma < 0$  et négatif) ;

➤ **Taille** : L'image trois fois plus petite que l'objet ( $|\gamma| = 1/3$  )



- Pour  $SA = -20\text{cm}$  ;

➤  $SA' = -60\text{cm}$  ;

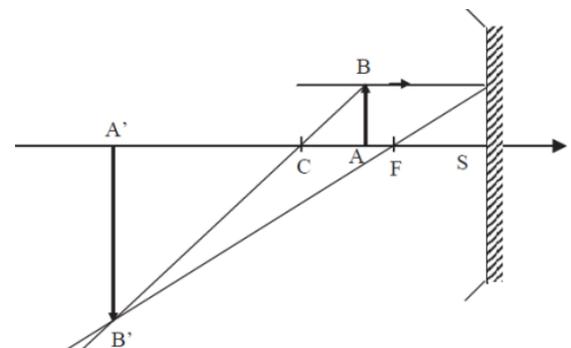
➤  $\gamma = -3$  ;

➤  $A'B' = -3\text{ cm}$  ;

➤ **Nature** : L'image et l'objet sont réels ;

➤ **Sens** : L'image est renversée ;

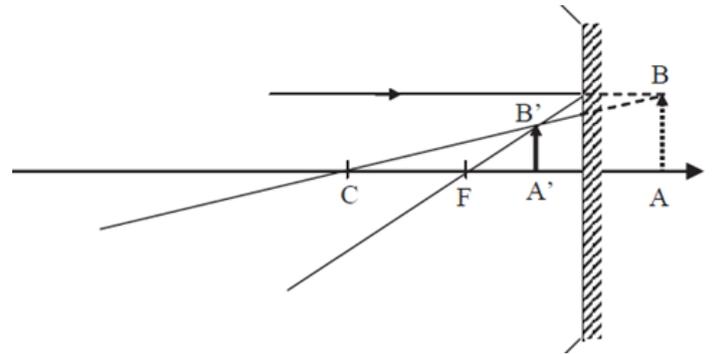
➤ **Taille** : L'image trois fois plus grande que l'objet



- Pour  $SA = 10\text{cm}$  :

➤  $SA' = -6\text{cm}$  ;

- $\gamma = 0,6$  ;
- $A'B' = -6 \text{ cm}$  ;
- **Nature** : L'image est donc réelle ;
- **Sens** : De même sens que l'objet (ils sont droits) ;
- **Taille** : L'image plus petite que l'objet.



### Exercice 5

On considère un dioptré sphérique, utilisé dans les conditions de Gauss, de centre C et de rayon de courbure R séparant deux milieux d'indices  $n_1$  et  $n_2$ . On donne  $R = SC = -2 \text{ cm}$ ,  $n_1 = 1.5$  et  $n_2 = 1$ .

1. Le dioptré est-il convexe ou bien concave ? Justifier.
2. Donner la formule de conjugaison du dioptré avec origine au sommet et au centre.
3. Déterminer les positions des foyers F et F' par rapport au sommet ?
4. Calculer les distances focales f et f' ?
5. Placer les foyers F et F' sur une figure à l'échelle.
6. Calculer la vergence V du dioptré ?
7. Le dioptré est-il convergent ou bien divergent ?
8. Déterminer la position de l'image A' d'un objet ponctuel A situé sur l'axe à une distance  $SA = 4,5R$ .
9. Calculer le grandissement linéaire du dioptré.
10. On considère un objet AB de hauteur  $AB = 1 \text{ cm}$  situé en A et perpendiculaire à l'axe optique.
  - a- Quelle est la taille de l'image A'B' ?
  - b- Déterminer le sens et la nature de l'image A'B' ?

### Correction exercice 5

- 1- Le dioptré est concave car le rayon  $R = SC < 0$  négatif.
- 2- Formule de conjugaison du dioptré :
  - Origine au sommet :

$$\frac{n_1}{CA_2} = \frac{n_2}{CA_1} = \frac{n_1 - n_2}{CS}$$

3- Les positions des foyers F et F' par rapport au sommet :

Si l'image est à l'infini l'objet est au foyer objet :

$$\frac{n_1}{SF} = \frac{n_1 - n_2}{SC} \text{ soit } SF = \frac{n_1}{n_1 - n_2} SC$$

Si l'objet est à l'infini l'image est au foyer image :

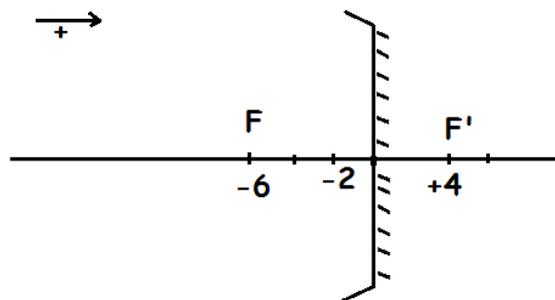
$$\frac{n_1}{SF'} = \frac{n_1 - n_2}{SC} \text{ soit } SF' = \frac{n_1}{n_2 - n_1} SC$$

4-

$$f = SF = \frac{n_1}{n_1 - n_2} SC = \frac{1.5}{1.5 - 1} (-2) = -6 \text{ cm}$$

$$f' = SF' = \frac{n_2}{n_2 - n_1} SC = \frac{1}{1 - 1.5} (-2) = +4 \text{ cm}$$

5- voir la figure ci-dessous :



6-la vergence du dioptre :

$$V = \left( \frac{n_2}{f'} \right) = \left( \frac{n_1}{f} \right) = \left( \frac{1}{-4} \right) = \left( -\frac{1.5}{-6} \right) = 0.25 > 0$$

7-Le dioptre est convergent car :  $V > 0$

8-La position de l'image A' est déterminée en utilisant la formule de conjugaison origine au sommet : soit

$$\frac{n_2}{SA_2} = \frac{n_1}{SA_1} + \frac{n_2 - n_1}{SC}$$

c'est-à-dire

$$\overline{SA_2} = n_2 \left( \frac{n_1}{\overline{SA_1}} + \frac{n_2 - n_1}{SC} \right)^{-1} = 12 \text{ cm}$$

9- le grandissement linéaire :

$$\gamma = \left( \frac{n_1 \overline{SA'}}{n_2 \overline{SA}} \right) = -2$$

10-

$$\gamma = -2 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \text{ pour } \overline{AB} = 1 \text{ cm on a } \overline{A'B'} =$$

$-2 \text{ cm}$  donc la taille de l'image est de :  $2 \text{ cm}$

L'image et l'objet ont deux sens opposés ( $\gamma < 0$ )

L'image est réelle car elle se trouve après la face de sortie du dioptre.

### Exercice 6

Considérons un miroir concave de forme sphérique et de distance focale  $f' = + 500 \text{ mm}$ .

Construire l'image d'un objet de taille  $AB = 100 \text{ mm}$ , situé à un mètre du miroir.

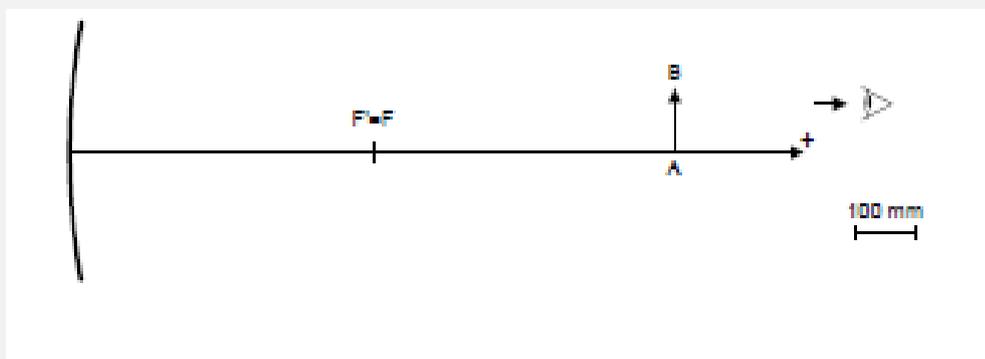
1. Retrouver les caractéristiques de l'image en appliquant les relations de conjugaison.

Commentaire ?

2. Application pratique

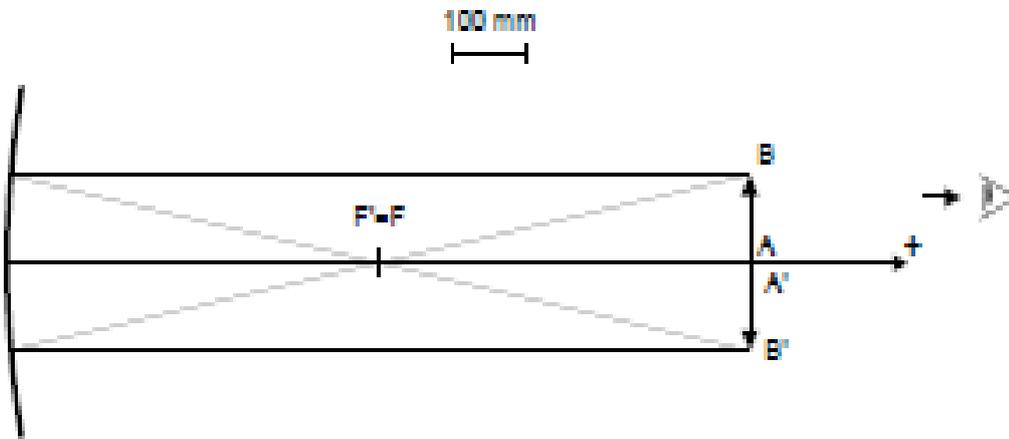
On dispose d'un miroir de distance focale inconnue. On cherche la position d'un objet qui donne à travers le miroir une image dans le même plan : on mesure  $400 \text{ mm}$  entre le miroir et l'objet.

En déduire la distance focale ainsi que le rayon de courbure de ce miroir.



## Correction exercice 6

## 1. Les caractéristiques de l'image



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

$$p = \frac{pf'}{p - f'} = \frac{1000 * 500}{1000 - 500} = +1000\text{mm}$$

$$\gamma = \frac{p'}{p} = -1$$

L'image A'B' est réelle, renversée, de même taille et située dans le même plan que l'objet.

2.  $p = 2f'$  distance focale :  $f' = 400 / 2 = +200$  mm rayon de courbure :  $R = 2f' = 400$  mm

# **Chapitre III**

## **Les lentilles Minces**

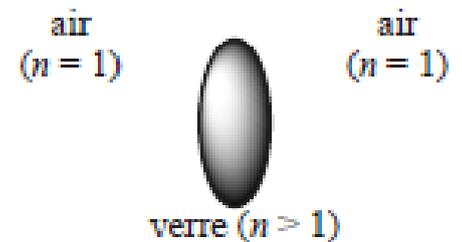
**III.1 Introduction**

De nombreux dispositifs optiques font appel à des lentilles, qui sont les systèmes les plus simples permettant d’obtenir une image de tailles différentes de l’objet, sans déformation notable tant qu’on se trouve dans les conditions de Gauss. Les lentilles se présentent généralement sous forme de lames de verre dont les bords ont une forme appropriés. Cependant, les lentilles ne sont pas des dispositifs parfaits car, si on s’éloigne des conditions de Gauss, il apparaît des déformations, principalement sur les bords des images. Ceci oblige à inclure des dispositifs correcteurs, comme il en existe dans les appareils photo, et sans lesquels il serait impossible de faire des photos en grand angle.

**III.2 Définition**

**III.2.1 Définition de la lentille sphérique**

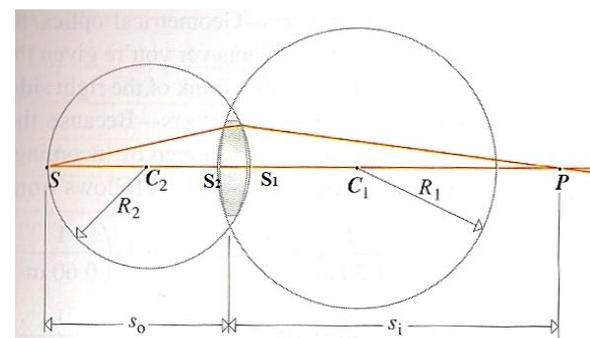
Une lentille est un milieu transparent d’indice optique donné, séparé du milieu extérieur par deux surfaces dioptriques, dont un est sphérique (figure.III.1) et l’autre sphérique ou plane. On suppose que le milieu extérieur (généralement l’air) est le même des deux côtés de la lentille.



**Figure .III.1** Lentille sphérique

**III.2.2 Définition de la lentille sphérique mince**

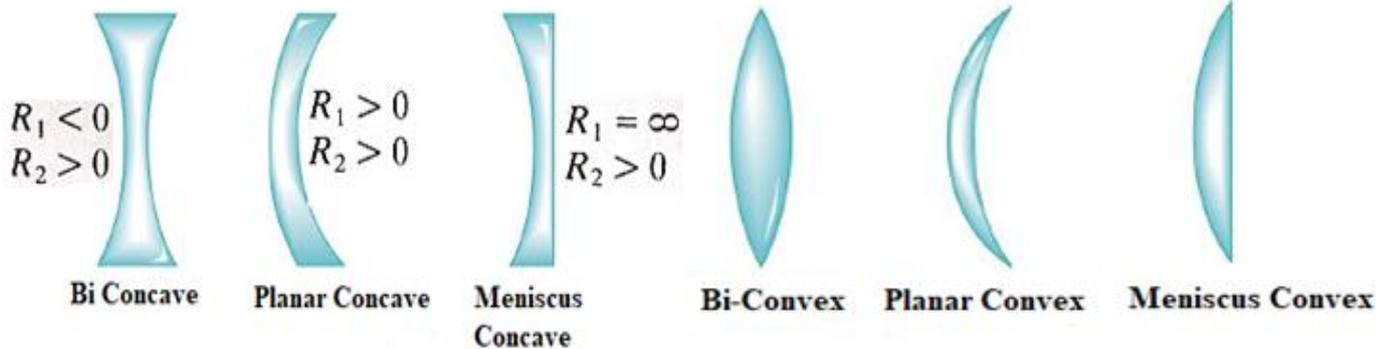
Les lentilles minces sont des lentilles dont l’épaisseur est très petite devant leurs diamètres c’est-à-dire :  $e \ll C_1S_1$  ;  $e \ll C_2S_2$  ;  $e \ll d$  (figure.III.2). Dans ces conditions, on peut dire que :  $S_1 \approx S_2 \approx O =$  le centre optique. On distingue deux familles de lentilles les lentilles convergentes et lentilles divergentes.



**Figure. III.2** Définition de la lentille sphérique

**III.2.3 Les lentilles convergentes et les lentilles divergentes**

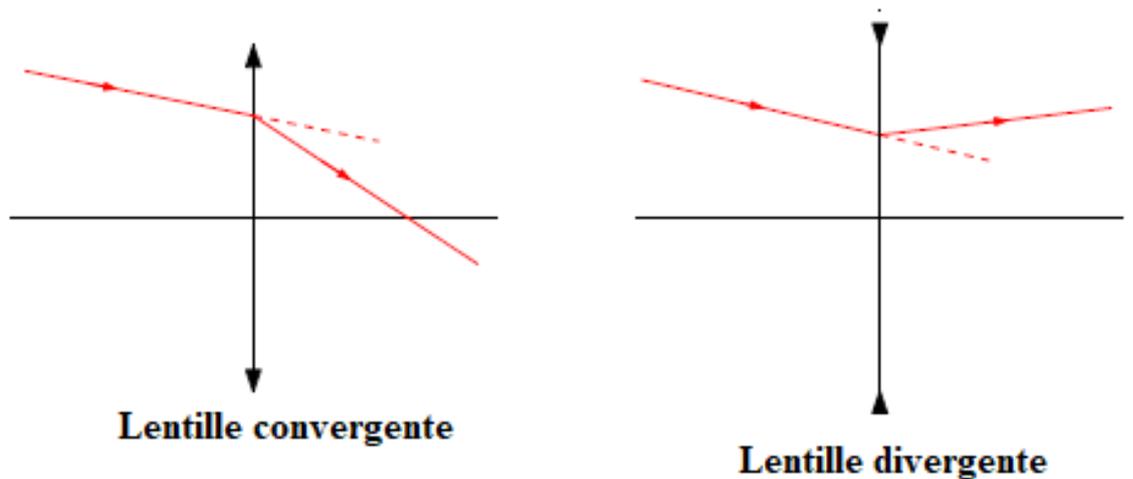
Suivant l'orientation des dioptries sphériques, les lentilles sont convergentes (elles rapprochent les rayons de courbure de l'axe optique) ou divergentes (elles éloignent les rayons de courbure de l'axe optiques). Il existe plusieurs types de lentilles convergentes et divergentes : biconvexe, plan convexe, ménisque convergent (figure.III.3) et biconcave, plan concave, ménisque divergent (figure.III.4).



**Figure .III.4** Lentilles divergentes

**Figure .III.3** Lentilles convergentes

Le schéma équivalent des lentilles minces convergentes, divergentes est représenté par la figure.III.5.



**Figure .III.5** Modélisations des lentilles minces.

### III.2.4 Images et objets pour les lentilles minces

#### III.2.4.1 Images et objets, caractère réel ou virtuel

##### ➤ Image

##### Définition

Dans le cadre du stigmatisme approché et sous les conditions de Gauss, tous les rayons passant par l'objet **A** et traversant la lentille **L** vont émerger de cette dernière en se croisant en un unique point **A'**. Ce point est l'image de l'objet **A** à travers la lentille **L**. Pour un objet étendu, les lentilles conservent les angles. Donc un objet perpendiculaire à l'axe optique a une image perpendiculaire à l'axe optique.

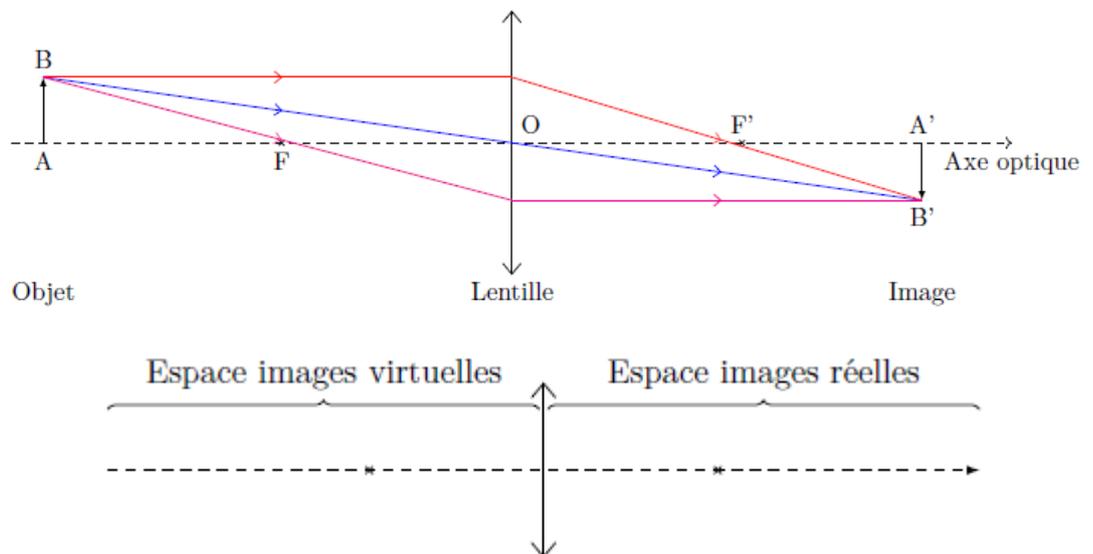
##### Remarque

On dit que le point **A'** est le conjugué du point **A** à travers la lentille **L** et on peut le noter simplement  $A \xrightarrow{L} A'$ .

##### ➤ Caractère réel ou virtuel des images

##### Définition

Une image est dite réelle (figure.III.6), si les rayons lumineux qui la construisent se croisent réellement. Elle pourra être projetée sur un écran. Une image est dite



**Figure .III.6** Caractère réel ou virtuel des images.

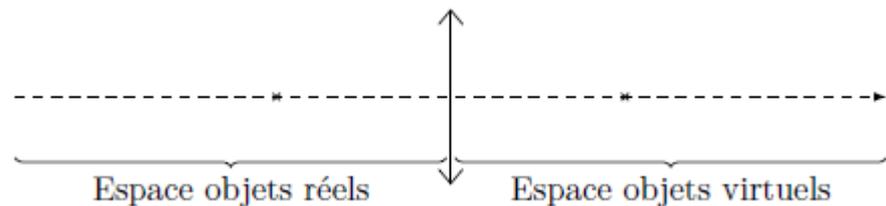
virtuelle, si les rayons lumineux qui la construisent ne se croisent pas, seuls les traits de constructions se croisent. Cette image n'est pas projetable sur un écran.

Une image virtuelle est visible en regardant dans la lentille dans son axe. Elle se dessine en pointillé.

### ➤ Caractère réel ou virtuel des objets

#### Définition.

Un objet est dit de réel si les rayons lumineux passent réellement par ce point. Un objet sera qualifié de virtuel si les rayons lumineux incidents semblent seulement y passer. Un objet virtuel n'existe pratiquement que dans les systèmes optiques multiples. Il se dessine en pointillé (figure.III.7).



**Figure .III.7** Caractère réel ou virtuel des objets.

## III.3 Propriétés

### III.3.1 Rayon passant par O

Le centre optique "O" d'une lentille, est généralement situé à l'intersection de la lentille et de l'axe optique. Un rayon lumineux incident arrive au voisinage de l'axe optique ressort parallèle à la direction initiale, et légèrement décalé, cette propriété est illustrée par la figure III.8.

Donc on peut considérée la lentille comme une portion de lame à faces parallèles au voisinage de l'axe optique. Si on fait l'approximation en faisant tendre  $S_1$  et  $S_2$  vers  $O$ , alors on arrive à une propriété très importante des lentilles minces :

**Tout rayon incident passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.**

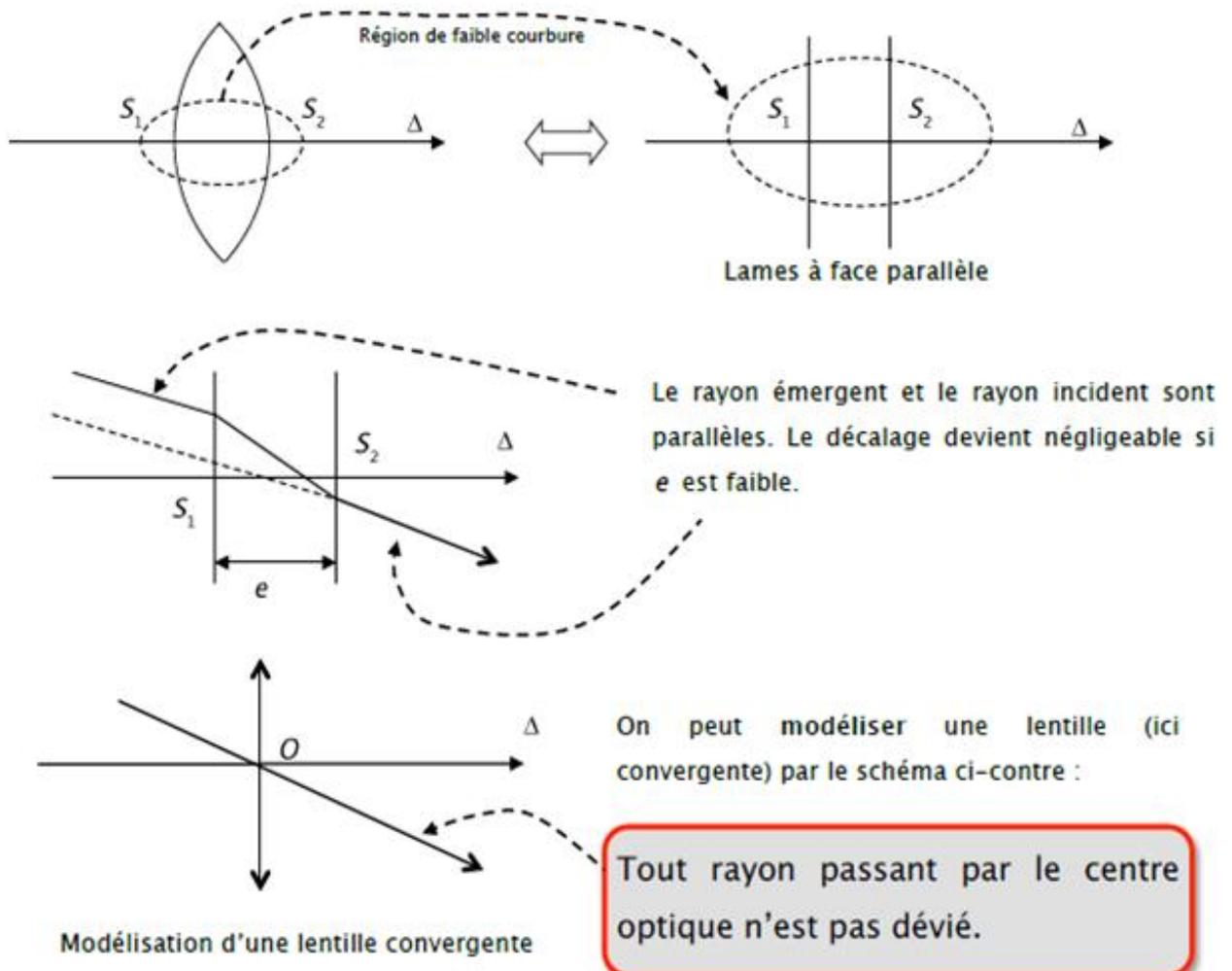


Figure .III.8 Rayon passant par le centre O.

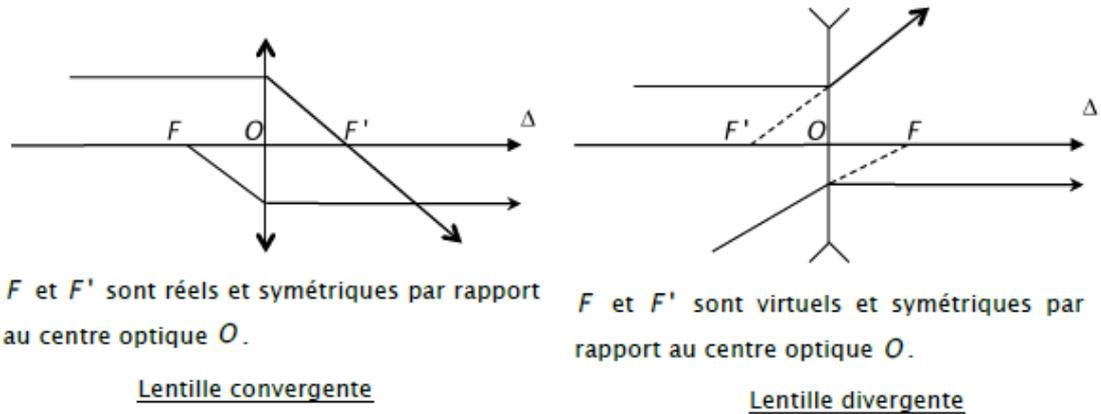
### III.3.2 Foyers, Distances focales et Vergence

**Le foyer principal image  $F'$**  : est l'image d'un point situé à l'infini et émettant des rayons parallèles à l'axe optique (figure.III.9).

**Le foyer principal objet  $F$**  : est le point objet de l'axe optique dont l'image se trouve à l'infini dans la direction de l'axe optique (figure.III.9).

#### Remarquons que

- Pour les lentilles convergentes, le point focal image est derrière la lentille ;
- Pour les lentilles divergentes, le point focal image est devant la lentille ;
- Le foyer objet et le foyer image d'une lentille convergente sont réels ;
- Le foyer objet et le foyer image d'une lentille divergente sont virtuels ;
- D'après le principe du retour inverse de la lumière, les foyers objet et image sont symétriques par rapport au centre optique :  $OF = -OF'$ .



**Figure .III.9** Les foyers objet et image d'une lentille convergente et divergente.

### III.3.3 Distances focales, vergence

Une lentille est complètement caractérisée par l'une des grandeurs suivantes : distance focale objet ou image (parfois appelée simplement focale) et vergence.

- Distance focale objet la grandeur notée  $f$  et définie par  $f = OF$  ;
- Distance focale image la grandeur notée  $f'$  et définie par  $f' = OF'$  ;
- Vergence la grandeur notée  $V$  et définie par :  $V = 1/f'$ .

On a les propriétés suivantes (figure.III.10):

- $f = -f'$  ;
- Pour une lentille convergente :  $f < 0, f' > 0$  et  $V > 0$  ;
- Pour une lentille divergente :  $f > 0, f' < 0$  et  $V < 0$ .

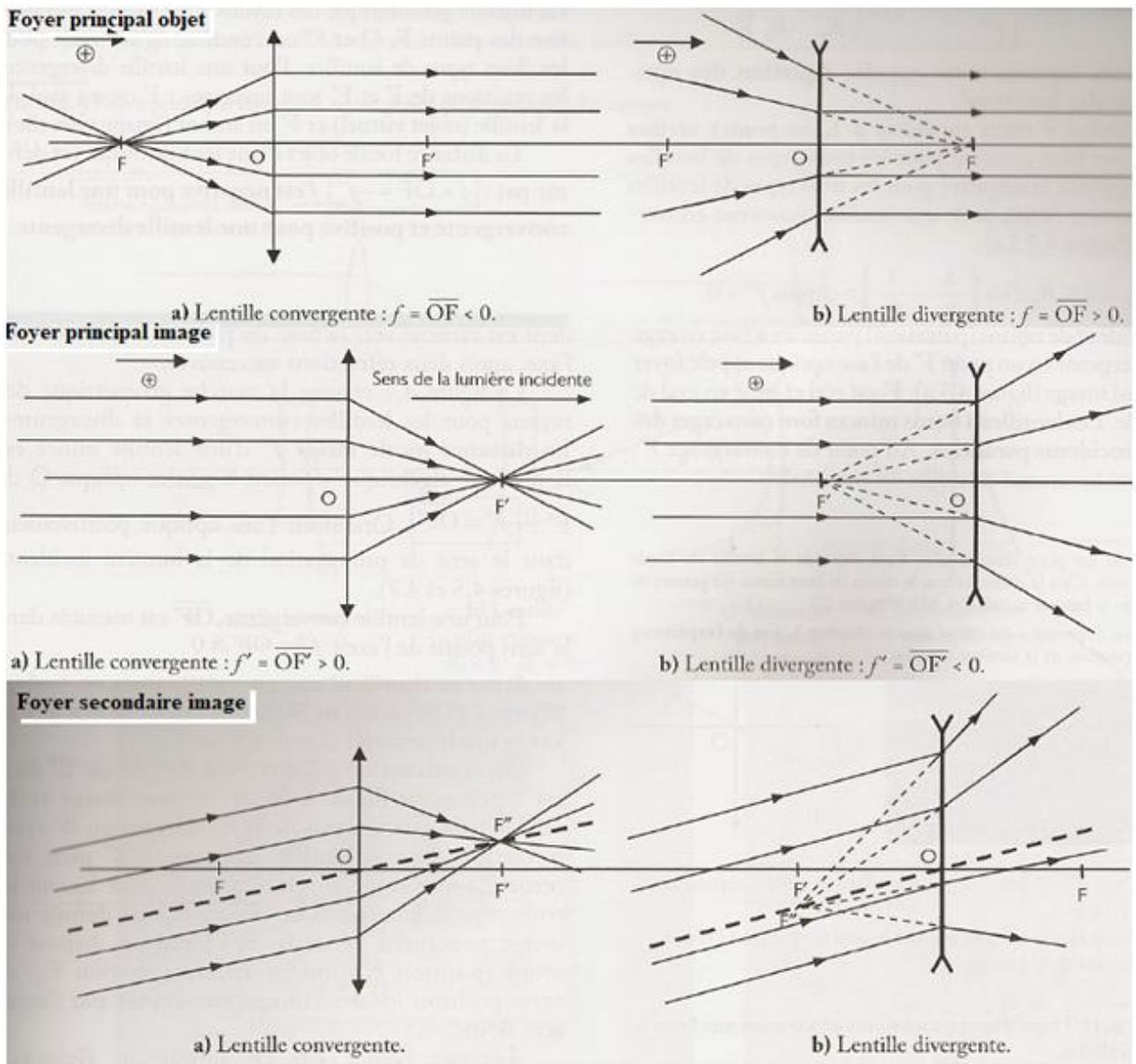


Figure .III.10 Les foyers : Objet, image et image secondaire.

### III.3.4 Grandissement

#### III.3.4.1 Grandissement transversal

Si  $A'B'$  est l'image d'un objet  $AB$  perpendiculaire à l'axe optique, on appelle le grandissement transversal la grandeur  $\gamma$  où :

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

#### - Cas d'un objet à l'infini

La figure .III.11 montre le cas où l'objet  $AB$  est à l'infini, donc son image est dans le plan focal image ( $A' = F'$ ). On voit que :  $\tan \alpha \approx \alpha$  ; donc :

$$\alpha = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{A'B'}}{f'}$$

- Cas d'une image à l'infini

Comme l'image est à l'infini donc son objet est dans le plan focal objet (A=F), alors on a :

$$\alpha' = \frac{\overline{AB}}{\overline{OF}} = \frac{\overline{AB}}{f}$$

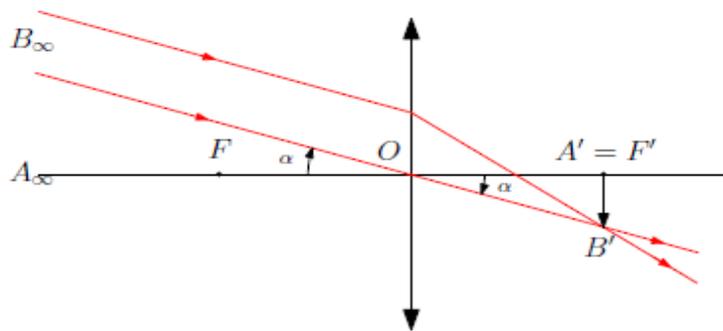


Figure . III.11 Image d'un objet à l'infini.

III.4 Relations de conjugaison et de grandissement

III.4.1 Relations de Descartes avec origine au centre

On applique le théorème de Thalès aux triangles (OAB) et (OA'B'), nous obtenons la relation suivante (figure .III.12) :

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

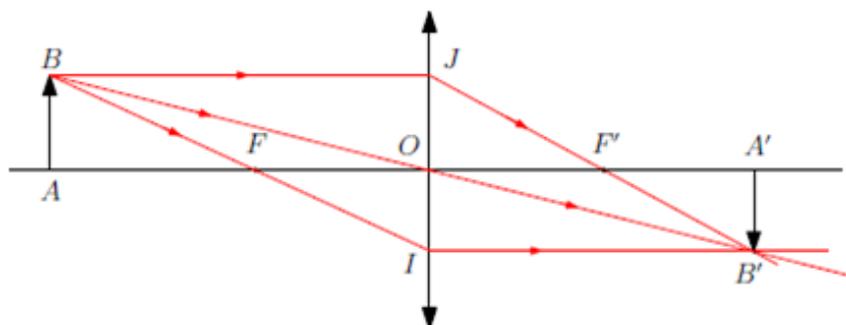


Figure .III.12 Relation de conjugaison et de grandissement.

On a donc une formule de grandissement avec origine au centre :

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

Maintenant on applique le théorème de Thalès dans les triangles (F'OJ) et (F'A'B') :

$$\frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OJ}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Et comme :

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

Donc :

$$\frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \text{ donc } \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{F'O} + \overline{OA'}}{\overline{F'O}} = 1 + \frac{\overline{OA'}}{\overline{F'O}}$$

On divisant la dernière égalité par  $\overline{OA'}$ , on déduira la relation de Descartes avec origine au centre :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\overline{OA'}} \cdot \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} &= \frac{1}{\overline{OA'}} \cdot 1 + \frac{1}{\overline{OA'}} \cdot \frac{\overline{OA'}}{\overline{F'O}} \\ \frac{1}{\overline{OA}} &= \frac{1}{\overline{OA'}} + \frac{1}{\overline{F'O}} \\ \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} &= \frac{1}{\overline{f'}} \end{aligned}$$

### III.4.2 Relations de Newton avec origine aux foyers

On applique le théorème de Thalès dans les triangles (FAB) et (FOI), on obtient la relation suivante :

$$\frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

D'après la relation :

$$\frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OJ}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Et cette relation :

$$\frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

La relation de grandissement avec origine aux foyers est :

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

À partir de ces deux relations on peut conclure la relation de conjugaison de newton :

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

### III.4.3 Grandissement angulaire

Soit un rayon quelconque venant de **A** et frappant la lentille en un point **I** (figure .III.13) et soit **A'** son image par la lentille. Par définition on appelle le grandissement angulaire le rapport :

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

Comme :

$$\tan \alpha' \approx \alpha' = \frac{\overline{OI}}{\overline{A'O}} \quad \text{et} \quad \tan \alpha \approx \alpha = \frac{\overline{OI}}{\overline{AO}}$$

On déduit  $G = \frac{\overline{AO}}{\overline{A'O}} = 1$ , c'est la formule de Lagrange-Helmholtz.

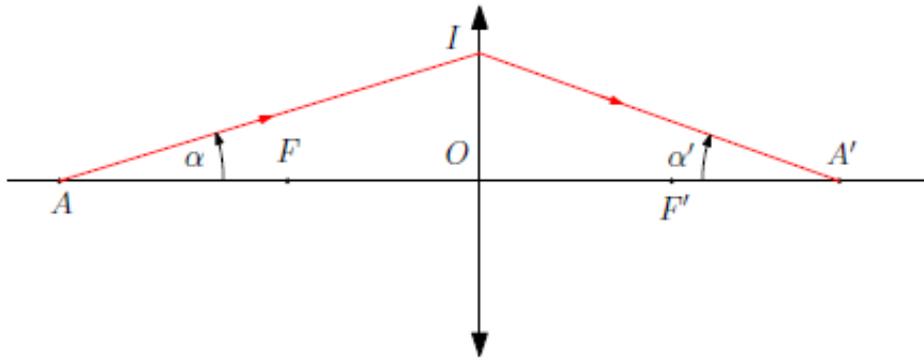


Figure .III.13 Grandissement angulaire.

### III.5 Recherche d'images, d'objets - Construction de rayons

#### III.5.1 Rayons particuliers

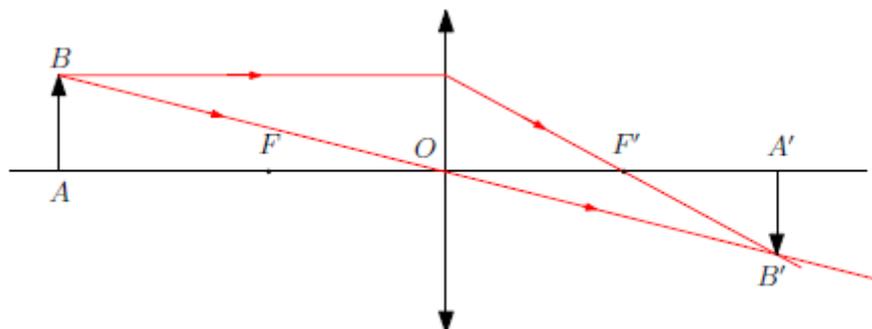
Il y a trois rayons particuliers que l'on peut utiliser lors des différents tracés :

- Un rayon parallèle à l'axe optique : il ressort en passant par  $F'$  ;
- Un rayon passant par  $F$  : il ressort parallèle à l'axe ;
- Un rayon passant par  $O$  : il n'est pas dévié.

#### III.5.2 Recherche de l'image d'un objet

Soit un objet  $AB$  perpendiculaire à l'axe optique, dont on cherche à construire l'image  $A'B'$  par une lentille convergente. Il suffit donc de faire ces étapes :

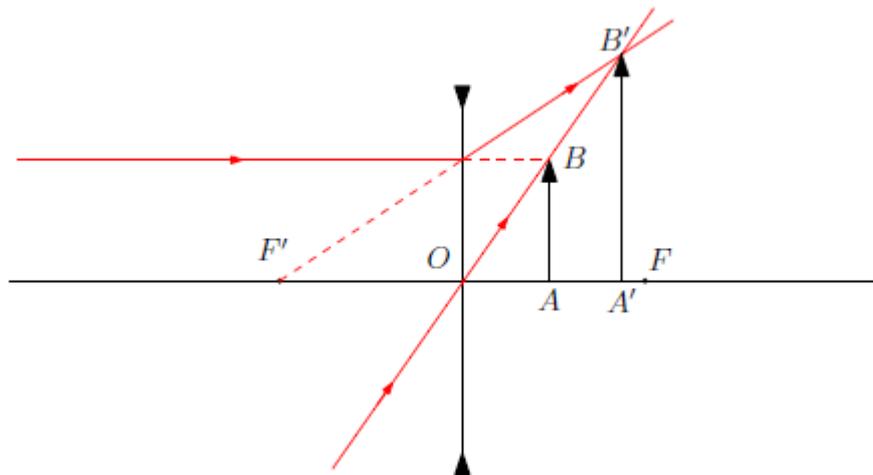
- Tracer deux (2) rayons venant du point  $B$  ;
- L'intersection des rayons émergents correspondant donne  $B'$  ;
- $A'$  est alors le projeté orthogonal de  $B'$  sur l'axe.

Figure .III.14 Image réelle d'un objet réel  $AB$  par une lentille convergente.

**Remarque**

Même raisonnement dans le cas où l'image  $A'B'$  est donnée :

- On trace deux rayons émergents particuliers contenant le point  $B$  ;
- L'intersection des rayons incidents correspondants donne le point  $B'$ .



**Figure .III.15** Image réelle d'un objet réel  $AB$  par une lentille divergente.

# Résumé du chapitre

## Définition de la lentille

Une lentille est un milieu transparent d'indice optique donné (verre organique ou minéral dans le domaine des longueurs d'onde visibles), séparé du milieu extérieur par deux surfaces dioptriques, dont un est sphérique et l'autre sphérique ou plane.

## Définition de la lentille sphérique mince

Les lentilles minces sont des lentilles dont l'épaisseur est très petite devant leurs diamètres c'est-à-dire :  $e \ll C_1S_1$  ;  $e \ll C_2S_2$  ;  $e \ll d$ . Dans ces conditions, on peut dire que :  $S_1 \approx S_2 \approx O =$  le centre optique.

Il existe plusieurs types de lentilles convergentes et divergentes :

**Lentilles convergentes** : biconvexe, plan convexe, ménisque convergent

**Lentilles divergentes** : biconcave, plan concave, ménisque divergent.

- Pour une lentille convergente :  $f < 0, f' > 0$  et  $V > 0$  ;
- Pour une lentille divergente :  $f > 0, f' < 0$  et  $V < 0$ .
- Distance focale objet la grandeur notée  $f$  et définie par  $f = OF$  ;
- Distance focale image la grandeur notée  $f'$  et définie par  $f' = OF'$  ;
- Vergence la grandeur notée  $V$  et définie par :  $V = 1/f'$  .

**Grandissement transversal :**

$$Y = \frac{A'B'}{AB}$$

**Relations de Descartes avec origine au centre**

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

**La relation de conjugaison de newton :**  $\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = ff' = -f'^2$

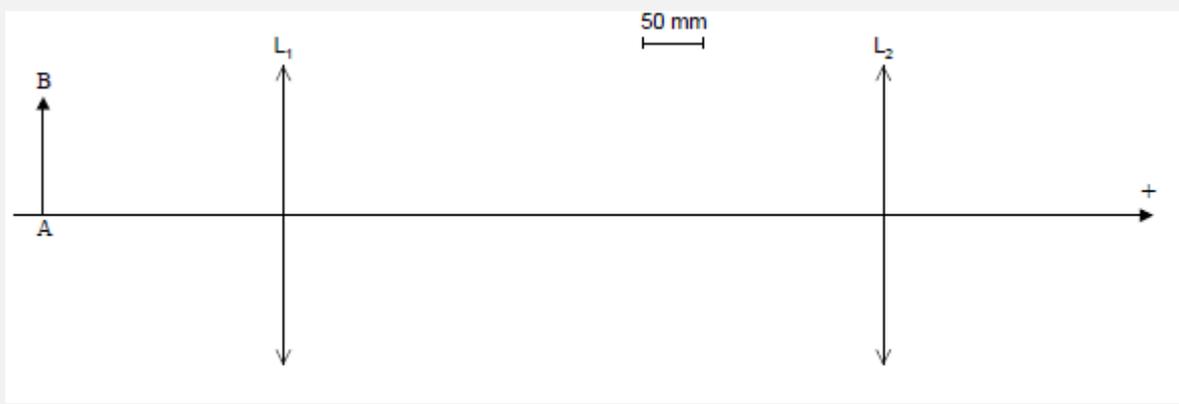
**Le grandissement angulaire le rapport :**  $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$

# Exercices et Solutions

## Exercice 1

On dispose de deux lentilles identiques de distance focale  $+100$  mm. Ces lentilles sont situées sur le même axe et sont distantes de  $500$  mm.

1. Construire l'image à travers le système des deux lentilles, d'un objet de taille  $100$  mm situé  $200$  mm avant la première lentille :

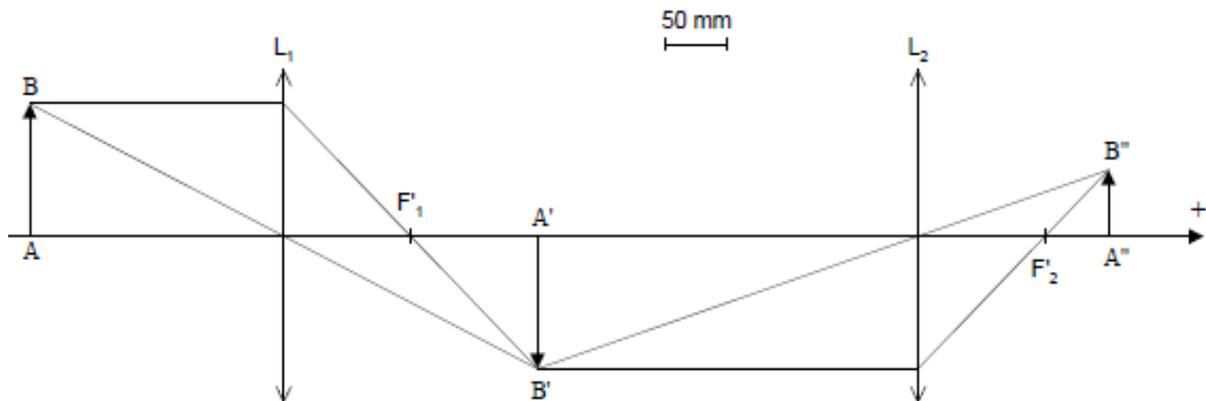


2. Retrouver les caractéristiques de l'image par les formules de conjugaison.

3. Où faut-il placer l'objet AB pour obtenir, à travers le système des deux lentilles, une image réelle, droite et de même taille ( $100$  mm) ?

## Correction exercice 1

1. Construction de l'image



2. Les caractéristiques de l'image

Première lentille (objet AB → image A'B')

$$p = -200 \text{ mm d'où : } p' = + 200 \text{ mm}$$

$$\gamma = -1$$

Deuxième lentille (objet A'B' → image A''B'')

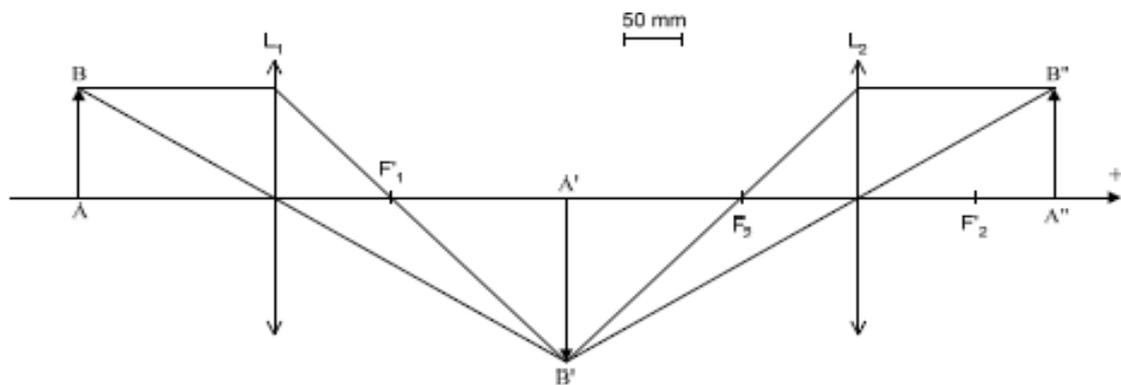
$$p = +200 - 500 = -300 \text{ mm d'où : } p' = + 150 \text{ mm}$$

$$\gamma = -0,5$$

3. L'image réelle

Enfin l'image A''B'' est réelle, située 150 mm après la deuxième lentille, droite et de taille 50 mm.

L'image intermédiaire A'B' doit se former au milieu des deux lentilles :



$$p' = +250 \text{ mm d'où : } p = -166,67 \text{ mm}$$

L'objet doit être situé 166,67 mm avant la première lentille.

**Exercice 2**

Une lentille convergente de 10 δ donne d'un objet une image de 1 cm de hauteur à 12 cm à droite de la lentille.

Déterminer la position, la grandeur, le sens et la nature de l'objet.

**Correction exercice 2**

1. Détermination de la position, la grandeur, le sens et la nature

$$\text{Comme } f' = 1/V \text{ donc, } SA = -0.6\text{m} ; \gamma = -0.2 ; A'B' = -0.01 ; AB = 0.05\text{m}$$

Image réelle, renversée et réduite.

**Exercice 3**

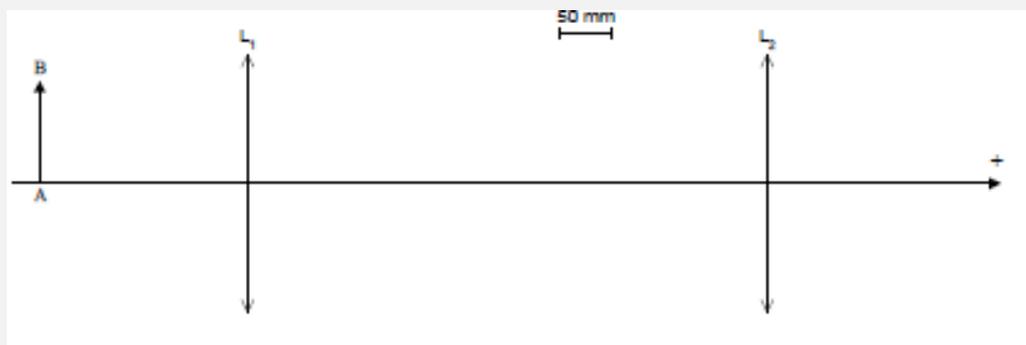
On dispose de deux lentilles :

L1 : distance focale +125 mm

L2 : distance focale +500 mm

Ces lentilles sont situées sur le même axe et sont distantes de 500 mm.

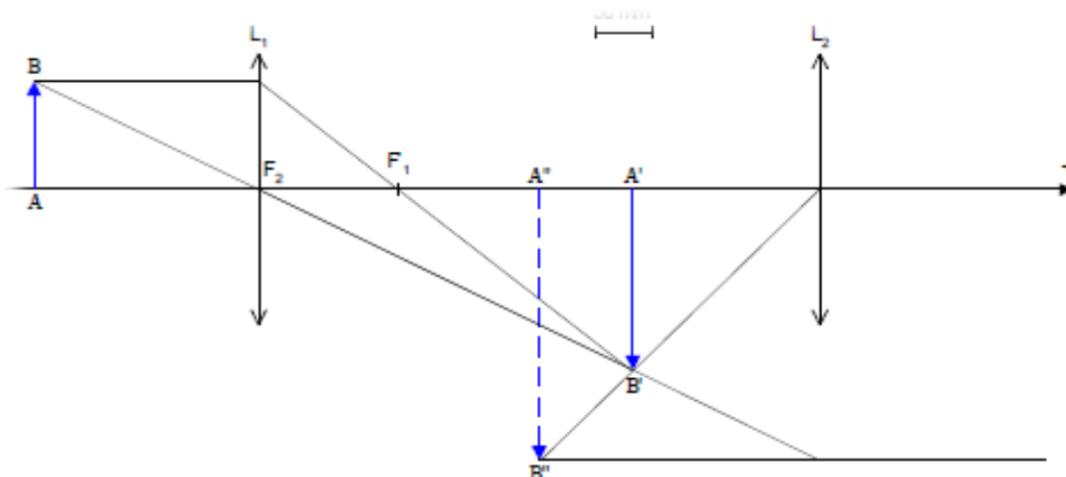
1. Construire l'image à travers le système des deux lentilles, d'un objet de taille transversale 100 mm situé 200 mm avant la première lentille :



2. Retrouver les caractéristiques de l'image par les formules de conjugaison.

**Correction exercice 3**

1. Construction de l'image



2. Première lentille (objet AB → image A'B')

$$p = -200 \text{ mm d'où : } p' = + 333,33 \text{ mm, } \gamma = -5/3$$

Deuxième lentille (objet A'B' → image A''B'')

$$p = +333,33 - 500 = -166,67 \text{ mm d'où : } p' = - 250 \text{ mm } \gamma = +3/2$$

Finalement l'image A''B'' est virtuelle, située 250 mm avant la deuxième lentille, renversée et de taille 250 mm.

#### Exercice 4

1. A quelle distance d'une lentille mince convergente L, de distance focale  $f' = 15 \text{ cm}$  se trouve l'image d'une flèche lumineuse de 18 mm de hauteur, placée perpendiculairement à l'axe principal et située à une distance de 60 cm de la lentille ?
2. Quel est le grandissement transversal  $\gamma_t$  ? Calculer la hauteur A'B' de l'image et préciser sa nature
3. Vérifier les résultats à l'aide d'une construction géométrique.

#### Correction exercice 4

1. La distance de l'image  $\overline{OA'}$

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OA} + \overline{OF'}}$$

$$\overline{OA} = -60 \text{ cm; } \overline{OF'} = +15 \text{ cm} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OA} + \overline{OF'}} = \frac{(-60) \cdot (+15)}{-60 + 15} = +20 \text{ cm}$$

2. Le grandissement transversal  $\gamma_t$

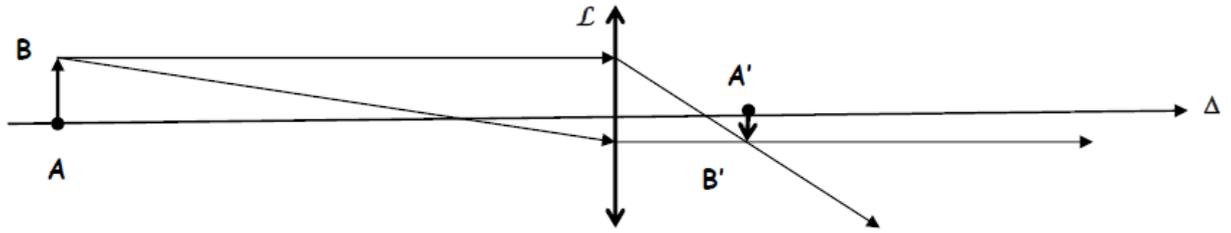
$$\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{+20}{-60} = \frac{1}{-3} = -0.333$$

L'hauteur  $\overline{A'B'}$  de l'image

$$\overline{A'B'} = \gamma_t \cdot \overline{AB} = \frac{1}{-3} \cdot 18 = -6 \text{ cm}$$

Il s'agit d'une A'B' renversée, réelle et plus petite que l'objet.

3. Vérification

**Exercice 5**

Pour obtenir l'image du Soleil la plus grande possible, on a le choix entre deux lentilles de vergence  $8\delta$  et  $2\delta$ . On utilise une seule lentille. Laquelle choisir ? Justifier la réponse à l'aide d'un schéma. Après avoir choisi la bonne lentille, on obtient un cercle de 4,5 mm de diamètre sur un écran. Quel est le diamètre apparent du soleil ?

**Correction exercice 5**

1. Quelle lentille a choisir

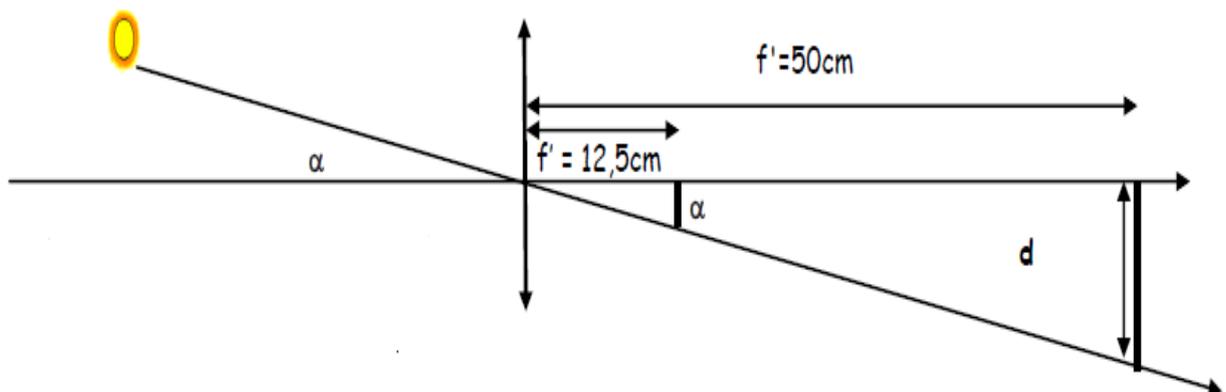
$V=1/f'$  d'où on a  $f' = 1/V$  Pour  $V = 8\delta$  on a  $f' = 12,5\text{cm}$  ; et Pour  $V=2\delta$  on a  $f' = 50\text{cm}$

La lentille qui forme l'image la plus grande est celle dont la distance focale est la plus grande.

2. Le diamètre apparent

L'image du soleil ainsi obtenue à l'aide  $d$ , de cette lentille de distance focale  $f'=50\text{ cm}$  est un disque de diamètre  $d= 4,5\text{ mm}$ . Le diamètre apparent  $\alpha$  du Soleil est l'angle  $\alpha$  :  $\text{tg}(\alpha)=d/f'=4,5 \cdot 10^{-1}/50=0,009\text{rd}=0,5^\circ=(1/2)^\circ$ .

Donc, le diamètre apparent du soleil dans le ciel est d'un demi-degré, alors que le diamètre réel du soleil est environ 1 400 000 km, soit 109 le diamètre de la Terre (12 800 km).



**Exercice 6**

Soit une lentille de distance focale  $f' = +3$  cm.

1. On considère un objet perpendiculaire à l'axe optique de taille 2 mm respectivement à 4 cm et 2 cm en avant du centre optique. Déterminer graphiquement l'image de l'objet dans chaque cas.
2. Même question avec un objet virtuel situé à 10 cm du centre optique (derrière la lentille).
3. Soit une lentille de distance focale  $f' = -3$  cm. Trouver l'image d'un objet réel de taille 2 mm situé à 5 cm du centre optique.
4. Même question avec un objet virtuel situé à 1,5 cm puis 5 cm du centre optique.
5. Retrouver les résultats précédents par le calcul algébrique, en utilisant la relation de conjugaison.

**Correction exercice 6**

1. Il s'agit d'une image  $A'B'$  réelle, renversée et 3 fois plus grande que l'objet  $AB$ . Cette image peut être projetée sur un écran situé à 12 cm derrière la lentille.

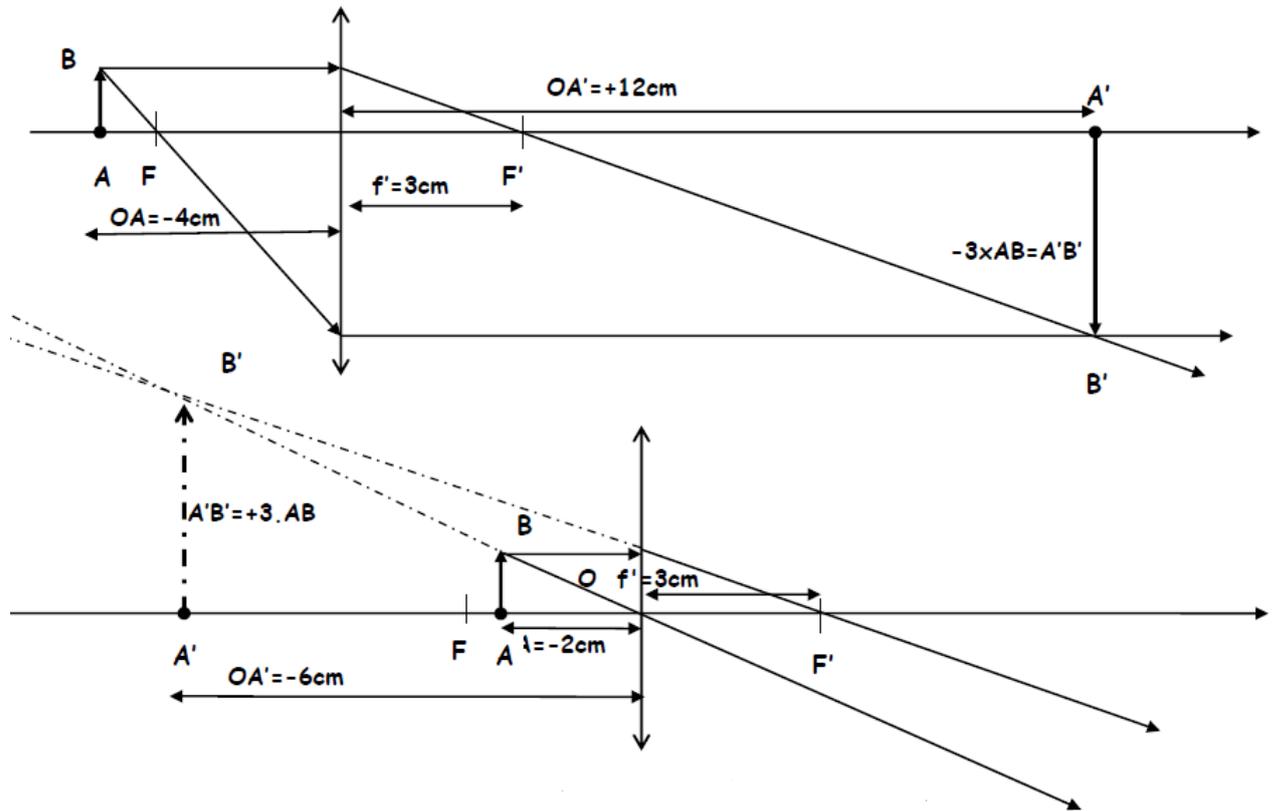
$$AB \xrightarrow{L_1} A'B' \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OA} + \overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{(-4) \cdot (+3)}{-4 + 3} = +12 \text{ cm}$$

$$\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -3 \Rightarrow \overline{A'B'} = -6 \text{ mm}$$

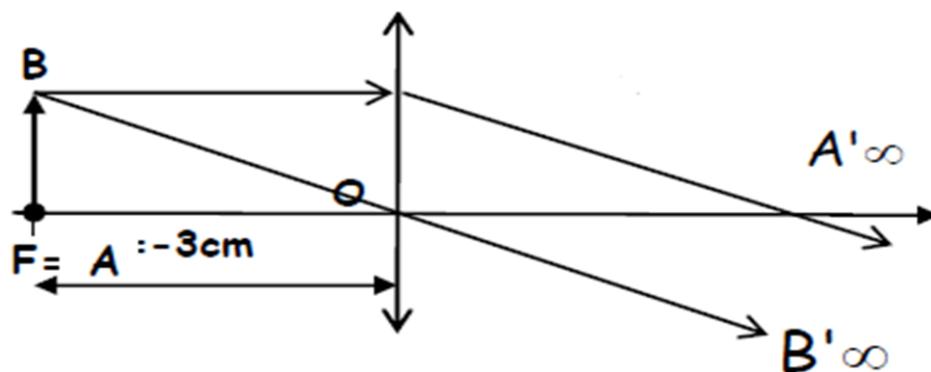
2. Il s'agit d'une image  $A'B'$  virtuelle, droite et 3 fois plus grande que l'objet  $AB$ . Cette image ne peut pas être projetée sur un écran situé derrière la lentille mais observable à travers cette lentille.

$$AB \xrightarrow{L_1} A'B' \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OA} + \overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{(-2) \cdot (+3)}{-2 + 3} = -6 \text{ cm}$$

$$\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = 3 \Rightarrow \overline{A'B'} = +6 \text{ mm}$$



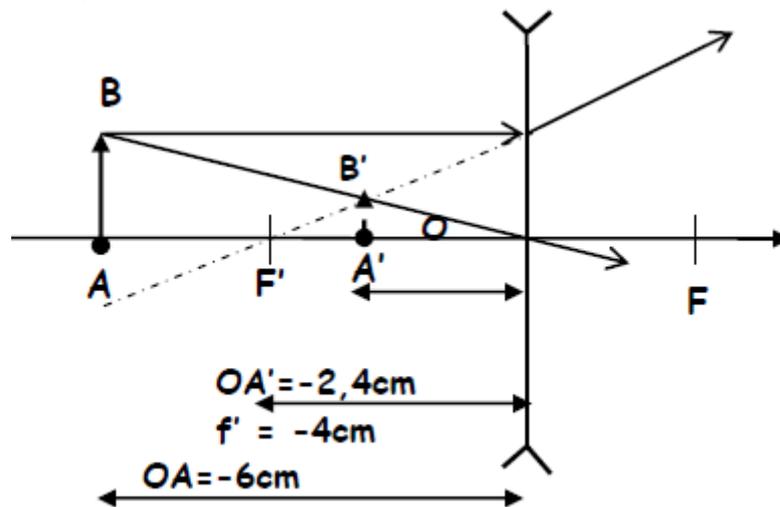
3- Si l'objet **AB** est placé sur le foyer principal objet **F** de cette lentille, alors son image **A'B'** sera projetée à l'infini. Les deux rayons lumineux émergeant de la lentille sont parallèles.



4- Pour un objet **AB** placé à **6 cm** devant la lentille divergente de distance focale **-4cm** son image **A'B'** est virtuelle droite et plus petite située à :

$$AB \xrightarrow{L_1} A'B' \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OA} + \overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{(-6) \cdot (-4)}{-6 - 4} = -2.4 \text{ cm}$$

$$\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{-2.4}{-6} = 0.4 \Rightarrow \overline{A'B'} = +0.8 \text{ mm}$$



Les deux lentilles **L<sub>1</sub>** et **L<sub>2</sub>** sont accolées alors la vergence de ce système optique est :

$$V = V_1 + V_2 - e \cdot V_1 V_2 \text{ avec } e = 0 \text{ d'où } V = V_1 + V_2 = \frac{100}{3} - \frac{100}{4}$$

$$V = 8.33\delta \Rightarrow f' = 12 \text{ cm}$$

# **Chapitre IV**

## **Les instruments optiques**

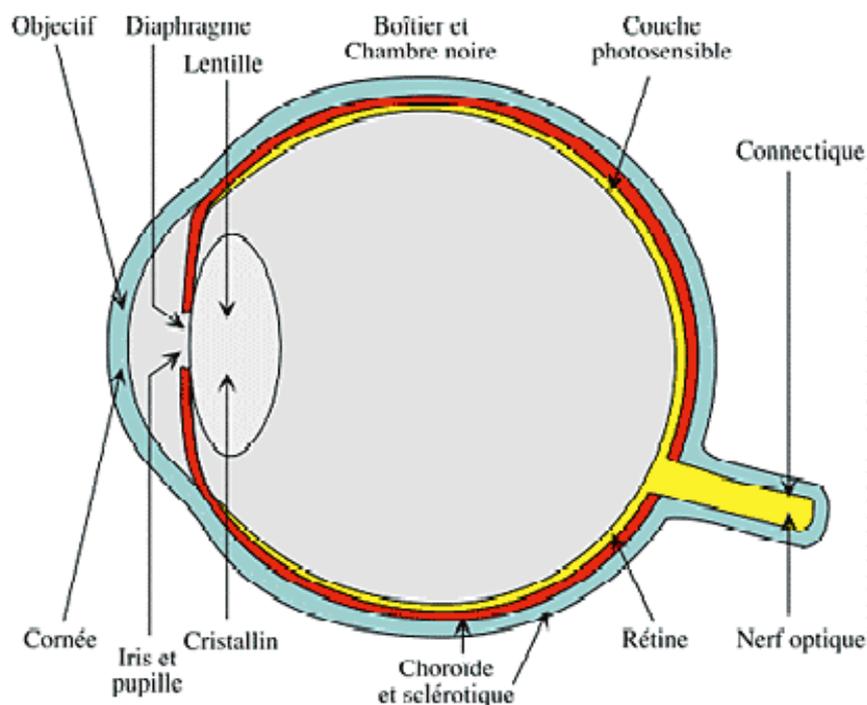
## IV.1 Introduction

On s'intéresse aux trois instruments d'optique : l'œil, le microscope optique et la lunette de Galilée. On précise qu'un instrument optique est constitué de deux parties:

- L'objectif qui est du côté de l'objet ;
- L'oculaire qui est du côté de l'œil.

## IV.2 L'œil

L'œil (figure .IV.1) est un organe de la vision et appelé aussi globe oculaire, permettant à l'humain d'analyser la lumière en captant le signal lumineux après transfert des données reçus au cerveau à l'aide des nerfs optiques par la suite le cerveau décode l'information ce qui permet d'analyser l'environnement.



**Figure .IV.1** L'œil humaine.

L'œil se compose de différentes régions et de quatre types de capteurs, des bâtonnets et trois types de cônes :

- Les cônes mesurent chacun une couleur rouge, vert ou bleu ;
- Les bâtonnets mesurent uniquement la luminosité, et sont les seuls actifs dans le noir.

- L'iris, dont l'ouverture forme la pupille.

On peut donc schématiser l'œil comme une lentille mince convergente (cornée et cristallin), d'une distance focale variable et un écran.

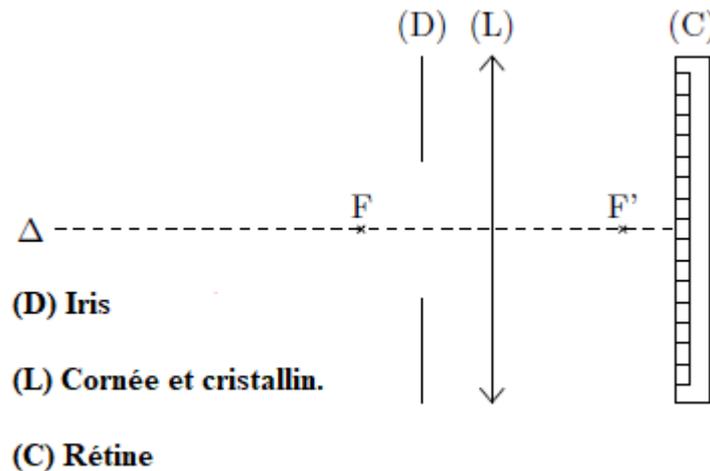


Figure .IV.2 Modélisation de l'œil humaine.

#### IV.2.1 Fonction de l'œil

##### ➤ Le globe oculaire

Ressemble à une petite balle d'un diamètre de 2.5 cm, d'une masse d'environ 7 grammes et d'un volume de 6.5 cm<sup>3</sup>.

- **La couche externe**, la sclérotique, est une enveloppe de protection. Elle recouvre environ les cinq sixièmes de la surface de l'œil. Elle donne à l'œil sa couleur blanche et sa rigidité.
- **La choroïde** : c'est une couche vasculaire de couleur noire qui tapisse les trois cinquièmes postérieurs du globe oculaire. Elle est en continuité avec le corps ciliaire et l'iris, qui se situent à l'avant de l'œil. Elle absorbe les rayons lumineux inutiles pour la vision, elle est très riche en vaisseaux sanguins afin de nourrir les photorécepteurs de la rétine.
- **La rétine**

C'est la couche sensible à la lumière grâce aux photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets). La rétine possède deux types de photorécepteurs :

- **Les bâtonnets** : De forme allongée, ils sont environ **130 millions**. Ils ont une très grande sensibilité à la lumière, d'où leur capacité à percevoir de très faibles lumières la nuit (vision de nuit). Ainsi car plusieurs dizaines de bâtonnets ne sont liés qu'à une seule fibre du nerf optique. Ils contiennent une substance

chimique appelée rhodopsine ou pourpre rétinien. Quand la lumière frappe une molécule de rhodopsine, celle-ci génère un faible courant électrique. Les signaux ainsi recueillis forment un message qui est transmis aux cellules nerveuses de la rétine.

- **Les cônes** : sont environ **5 à 7 millions**, se situent dans la fovéa, leur sensibilité à la lumière est très faible mais leur perception des détails est très grande pour deux raisons :
  - Il y a une densité très élevée de cônes dans la fovéa et surtout chaque cône de la fovéa transmet son information à plusieurs fibres du nerf optique (la vision de jour). Ainsi ils ont une très bonne sensibilité aux couleurs. Ils sont de trois types des ondes lumineuses de longueurs différentes : cônes contenant de l'érythrosine (sensibles au rouge), de la chloropsine (vert), de la cyanopsine (bleu).
- **La cornée** : est une membrane solide et transparente de 11 mm de diamètre au travers de laquelle la lumière entre à l'intérieur de l'œil. La cornée est privée de vaisseaux sanguins, elle est nourrie par un liquide fluide comme l'eau (l'humeur aqueuse). La cornée contient 78% d'eau et pour maintenir ce degré d'hydrophilie elle est constamment recouverte de larmes alimentées en continu par les glandes lacrymales et réparties par le battement des paupières.
- **Le cristallin** : C'est une lentille auxiliaire molle et composée de fines couches superposées. Il se déforme sous l'action du muscle ciliaire.
- **L'humeur vitrée** : Elle occupe 80% du volume de l'œil, elle est constituée d'une gelée (acide hyaluronique) qui donne à l'œil sa consistance.
- **L'iris (arc-en-ciel)** : Il s'agit du diaphragme de l'œil percé en son centre par la pupille. C'est un muscle qui fait varier l'ouverture de la pupille (entre 2.5 et 7 mm) afin de modifier la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil pour éviter l'aveuglement en plein soleil ou capter le peu de rayons la nuit. La couleur de l'iris est déterminée par la présence d'un pigment, la mélanine, le même composé chimique qui donne aussi leur couleur aux cheveux et à la peau.
- **La pupille** : Il s'agit d'un trou au centre de l'iris permettant de faire passer les rayons lumineux vers la rétine.

- **La fovéa** : la zone centrale de la macula (la zone de la rétine) où la vision des détails est la plus précise. Elle est située dans le prolongement de l'axe optique de l'œil. La fovéa est peuplée uniquement de cônes, et nous permet la meilleure résolution optique. Les cônes, permettent de voir en couleur. Lorsqu'on en est dépourvu on ne possède pas la vision couleur. Les bâtonnets sont repartis sur la rétine périphérique, qui donne une impression générale du champ de vision avec peu d'acuité visuelle. Son champ de vision est d'un degré.

#### IV.2.2 L'œil réduite

D'après ce qui a été dit plus haut on peut considérer que l'œil est constitué de quatre dioptries sphériques dont les centres sont situés sur l'axe visuel :

- Dioptrie air- face avant de la cornée ;
- Dioptrie face arrière de la cornée-humeur aqueuse ;
- Dioptrie humeur aqueuse-face avant du cristallin ;
- Dioptrie face arrière du cristallin-humeur vitrée.

Les deux dioptries premiers (air-face avant de la cornée et face arrière de la cornée) sont équivalents à une lentille convergente de 40 dioptries. Les deux derniers dioptries (humeur aqueuse-face avant du cristallin et face arrière du cristallin-humeur vitrée) sont équivalents à une lentille convergente de 20 dioptries. La convergence de l'ensemble est de l'ordre de 60 dioptries.

Pour un observateur moyen, on obtient les valeurs suivantes :

- Foyer image  $F'$  : situé sur la rétine ;
- Foyer objet  $F$  : situé 15 mm en avant de la cornée ;
- Distance focale objet :  $HF = - 16.7$  mm ;
- Distance focale image  $H'F' = 22.3$  mm ;
- Interstice  $HH' = NN' = 0.3$  mm avec  $HN = H'N' = 5.6$  mm.

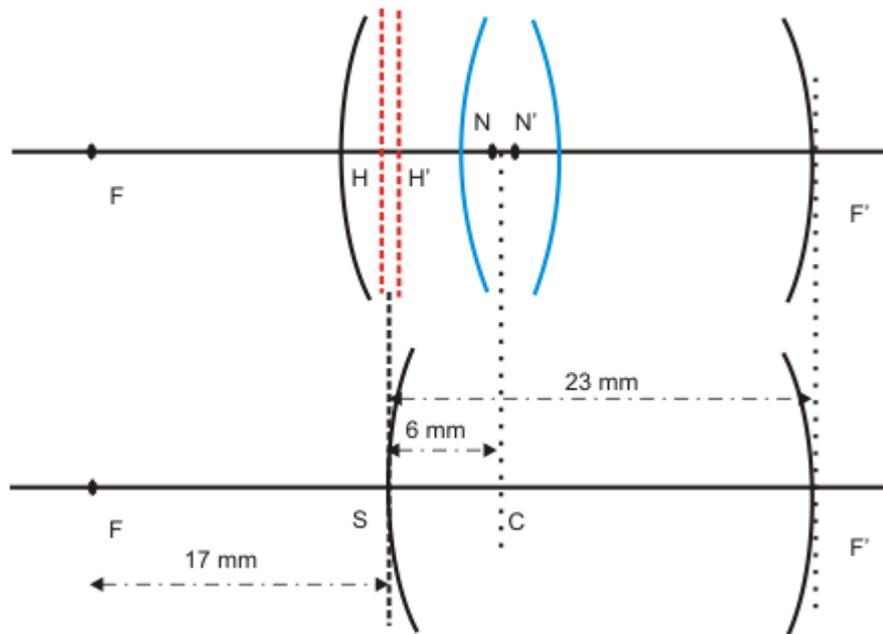


Figure .IV.3 L'œil réduite.

Comme les distances  $HH'$  et  $NN'$  sont beaucoup plus petit que les distances  $HN$  et  $H'N'$ , on peut donc faire les approximations suivantes :

- Confondre le point  $H$  et  $H'$  avec  $S$  ;
- Confondre le point  $N$  et  $N'$  avec  $C$ .

Avec ces approximation, on peut réduire l'œil à un dioptr sphérique unique caractérisé par :

- Sommet  $S$  situé à 2 mm en arrière de la cornée ;
- Rayon  $SC$  voisin de 6mm ;
- Distance focales  $f = SF = - 17$  mm et  $f' = SF' = 23$  mm.

### IV.2.3 L'œil normal

L'œil est dit normal lorsque l'image  $A'$  d'un objet  $A$  très éloigné se forme sur la rétine. Pour un œil normal au repos, le foyer image  $F'$  est sur la rétine. Si on rapproche l'objet de l'œil, son image se déplace et se forme derrière la rétine.

## IV.2.4 Caractéristique de l'œil

### IV.2.4.1 Champ de l'œil

Le champ de l'œil est l'ensemble des points de l'espace dont leur image se forme sur la rétine. Les points de l'espace sont vus nettement lorsque sont contenus dans un cône d'angle au sommet  $60^\circ$  dont l'axe est l'axe optique.

Par contre, si la tête est fixe et en faisant tourner les yeux, d'une part le champ de vision atteint environ  $30^\circ$  dans le sens vertical de l'axe et d'autre part  $25^\circ$  dans le sens horizontal.

### IV.2.4.2 Résolution de l'œil normal

La limite de résolution est la distance angulaire minimale entre deux points tels qu'ils sont considérés comme séparés. Elle est proche de  $1.5^\circ$  mais dépend de l'éclairement et du contraste entre l'objet et l'arrière-plan (le fond).

### IV.2.4.3 Accommodation de l'œil normal

Les objets proches ne peuvent pas être vus clairement car leurs images sont formées derrière la rétine. La vision nette des objets proches est possible lorsque l'objet se rapproche de l'œil (le foyer se rapproche de la cornée).

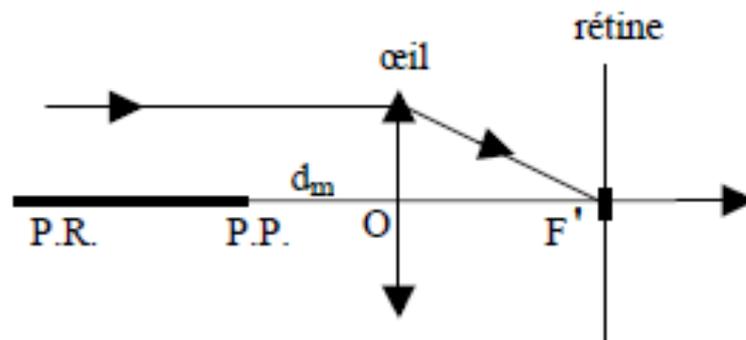


Figure .IV.4 Accommodation de l'œil normal.

Ceci est lié à la modification de la courbure du cristallin et au changement de son indice sous l'influence des muscles ciliaires et sa distance focale varie de manière à ramener le foyer image sur la rétine dans ce cas on dit que l'œil est accommodé. Ce phénomène se poursuit jusqu'à une distance minimale où l'œil n'est plus en mesure de former l'image sur la rétine. Cette valeur représente la distance de vision caractéristique minimale  $d_m$  : le point A correspondant est le "point proximal" (P.P.).

#### IV.2.4.3.1 L'accommodation est limitée

Pour un œil au repos (pas d'accommodation), le point le plus éloigné que l'on peut voir clairement c'est le point **R (punctum remotum R)** situé à une distance  $\Delta = SR$  de la cornée. Pour un œil normal, ce point est situé à l'infini.

De même, le point le plus proche que l'on peut voir clairement est le point proximum **P (punctum proximum P)** situé à la distance  $\delta = SP$  de la cornée.

Pour mieux comprendre un individu dans la vingtaine (20 ans), le **punctum proximum P** est situé à une distance de 20 cm. Il est possible de réduire cette distance à 15 cm par détriment d'une contrainte visuelle importante. En vieillissant, **R** s'approche et **P** s'éloigne de la cornée.

#### IV.2.4.3.2 Amplitude dioptrique d'accommodation



Au point P, la vergence est  $1 / \delta$  (négative) et en **R** elle est  $1 / \Delta$  ;

L'amplitude dioptrique est définie comme étant la quantité **A** :

$$A = \frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}$$

- Si  $\Delta$  et  $\delta$  varient avec les observateurs A est sensiblement la même pour des individus du même âge.
- Pour un œil normal :

$$A = \frac{1}{0.2} - \frac{1}{\infty} = 5 \text{ dioptries}$$

#### IV.2.5 Défauts de l'œil

Lorsque l'image d'un point à l'infini se forme sur la rétine donc on peut dire que l'œil est normal ou "emmétrope".

Lorsque l'image d'un point à l'infini se forme en avant ou en arrière de la rétine on dit que l'œil est l'œil anormal ou "amétrope".

##### IV.2.5.1 Myopie

Dans le cas où l'image se forme en avant de la rétine (c'est-à-dire au delà du foyer), le cristallin est trop convergent et l'œil est dit "myope".

Ce défaut est corrigé par une lentille divergente qui ramène le punctum remotum  $R$  à l'infini. Son punctum remotum est un point  $R$  à distance finie dont l'image  $R'$  se forme sur la rétine sans accommodation.

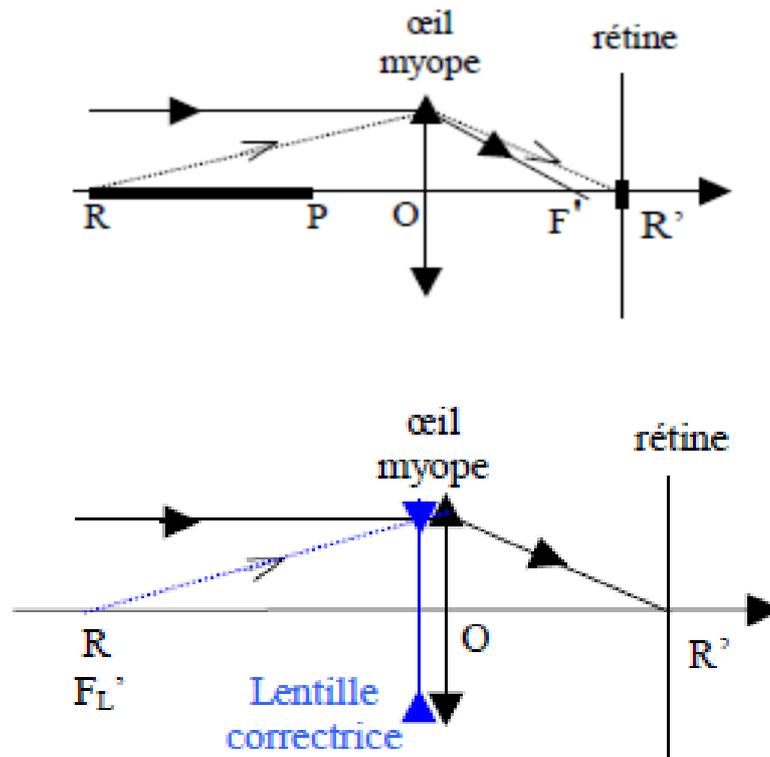


Figure .IV.5 L'œil myope.

#### IV.2.5.2 Hypermétropie

L'œil est dit "hypermétrope" lorsque la rétine est en avant du foyer dans ce cas le cristallin manque de convergence donc l'œil doit accommoder pour voir à l'infini. Le punctum remotum  $R$ , est un point virtuel ou son image  $R'$  se formant avant le foyer. Le punctum proximum  $P$  est plus éloigné que celui d'un œil normal. Ce défaut est corrigé par une lentille convergente dont la distance focale est  $OR$ .

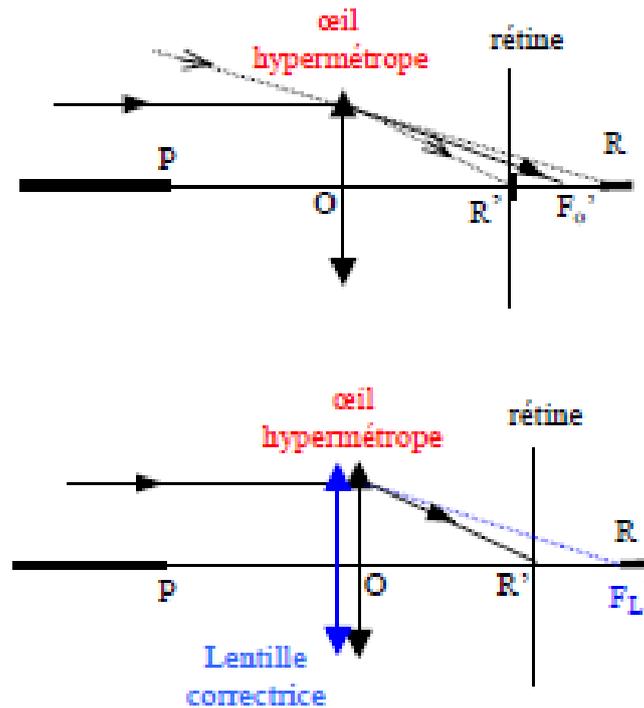


Figure .IV.6 L'œil hypermétrope.

#### IV.2.5.3 Presbytie

Dans ce cas, le défaut est dû au vieillissement humain. Le cristallin perd son élasticité et les muscles qui permettent l'adaptation perdent son élasticité, ainsi, la partie proximale de la zone du cristallin s'éloigne (la personne hypermétrope ne peut plus voir les objets proches). En général, la région périphérique n'est pas altérée: l'œil myope reste myope et l'œil myope reste. Ce défaut est corrigé par des lentilles convergentes, dont la distance focale dépend de la position de l'objet à observer (lunettes à focales multiples ou lunettes à focales progressives).

### IV.3 Le microscope

Un microscope contient généralement plusieurs objectifs, qui sont montés sur une tourelle qui doit être tournée pour changer les lentilles (les objectifs). La tourelle est placée au bout d'un tuyau d'une longueur standard de 16 cm. À l'autre extrémité du tube se trouve une autre lentille dite oculaire. L'observation au microscope nécessite que l'objet soit éclairé. L'éclairage est réalisé par un illuminateur, ce dernier est constitué d'un miroir sphérique, une lampe et un collecteur. Au centre du miroir sphérique se trouve une lampe afin que l'éclairage soit plus efficace, le collecteur formant l'image source dans le

plan focal de l'objet du condenseur. L'ouverture du collecteur est aussi grande que possible pour couvrir la surface maximale sur l'objet.

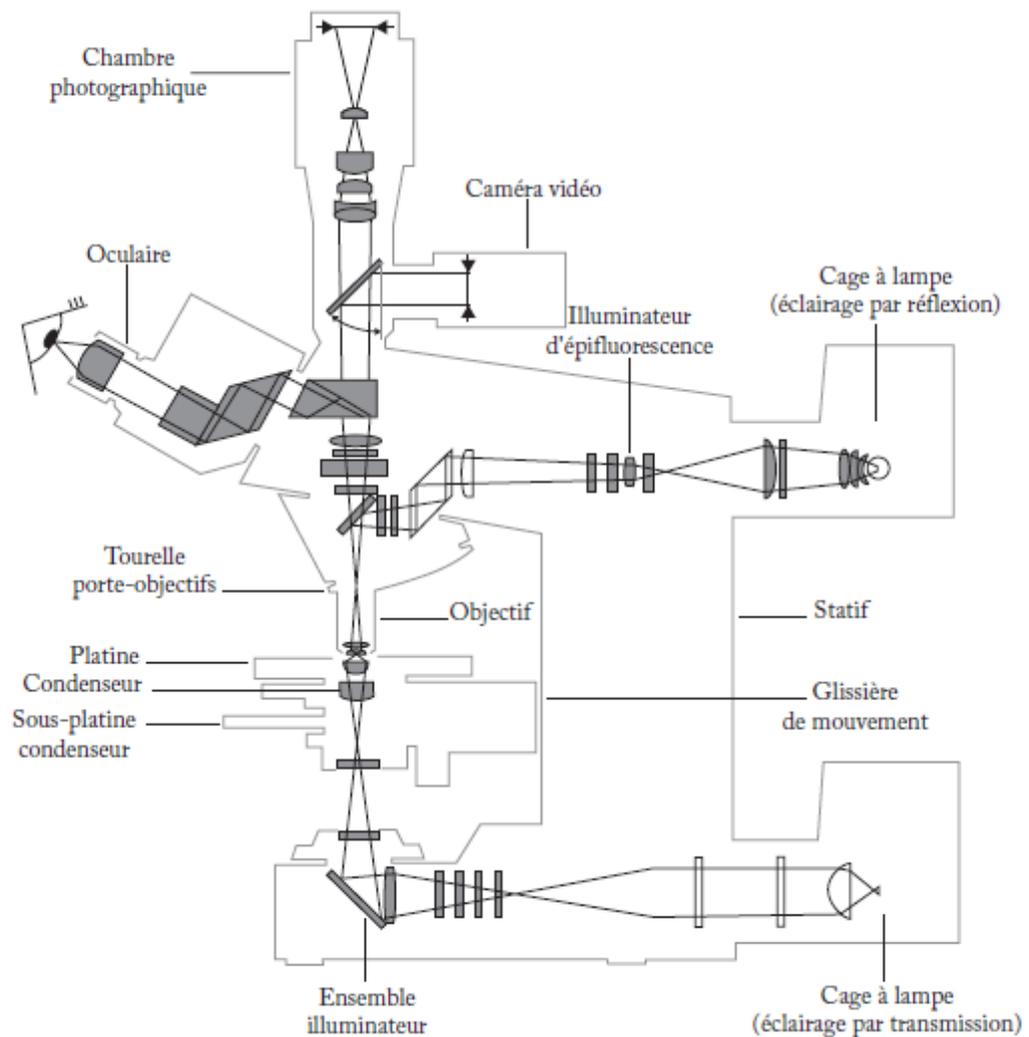


Figure .IV.6 Microscope optique.

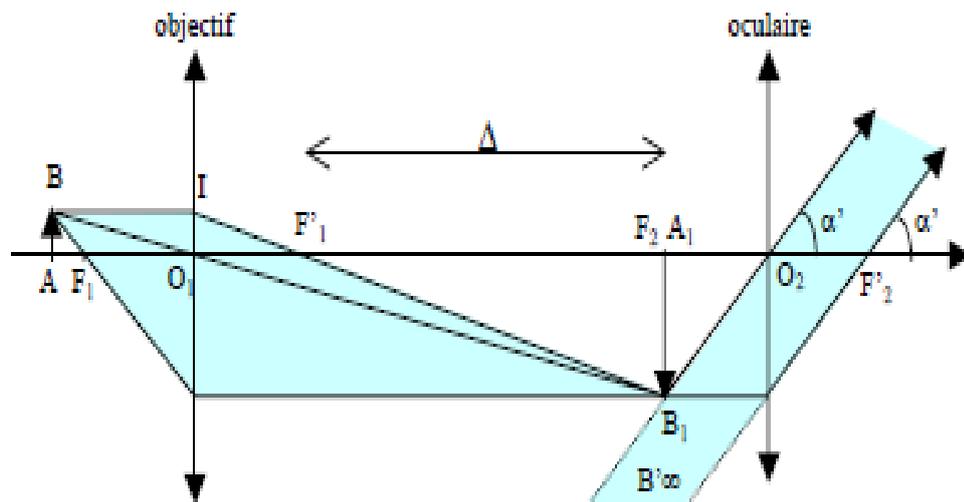
### IV.3.1 Principe de l'instrument

Le microscope est constitué de deux systèmes optiques :

- Le premier système c'est l'objectif : qui est assimilé à une lentille très convergente, de distance focale égale à quelques millimètres. C'est la pièce de la maîtresse du microscope car elle donne une image très agrandie par rapport à l'objet qui est très petit qui est observée à travers un second système dite l'oculaire.
- Le second système c'est l'oculaire : est également assimilé à une lentille convergente. Il est utilisé pour regarder l'image intermédiaire formée par l'objectif.

L'image définitive est beaucoup plus grande que l'objet. Le rôle de l'oculaire est comparable à celui d'une loupe.

Pour voir une image à travers le microscope, on considère un objet **AB** perpendiculaire à l'axe optique des deux lentilles (objectif et oculaire), le point A étant sur l'axe comme est montré dans la Figure. 11.4. Pour que l'objectif donne une image **A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>** réelle et agrandie, il est nécessaire que l'objet soit placé avant le plan focal objet de l'objectif (les foyers de l'objectif sont notés **F<sub>1</sub>** et **F'<sub>1</sub>**). Cette image **A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>** joue le rôle d'objet réel pour l'oculaire. Pour que l'observateur voie une image agrandie, il faut que cette image soit virtuelle et donc que **A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>** soit situé entre l'oculaire et son plan focal objet. L'image **A'B'** de l'objet **AB** à travers les deux lentilles est une image virtuelle, inversée et agrandie.



**Figure .IV.7.** Construction de l'image d'un objet à travers un microscope.

### IV.3.2 Caractéristiques d'un microscope

#### IV.3.2.1 Puissance

La puissance **P** d'un microscope est le rapport entre le diamètre apparent  $\alpha'$  de l'image définitive **A'B'** de l'objet **AB** et sa dimension **AB**. Cette puissance s'exprime en dioptrie. Donc on peut écrire la relation suivante :

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

On ajoutant le terme :

$$\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{A_1B_1}}$$

On peut déduire une autre relation de la puissance :

$$P = \frac{\alpha'}{\overline{A_1B_1}} * \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}}$$

$$P_{\text{microscope}} = P_{\text{oculaire}} * Y_{\text{objectif}}$$

Le premier facteur est la puissance de l'oculaire, Le deuxième facteur représente le grandissement linéaire transversal de l'objectif.

La puissance intrinsèque est obtenue lorsque l'instrument est utilisé dans les conditions où l'observateur vise à l'infini, c'est-à-dire lorsque l'image intermédiaire  $A_1B_1$  est dans le plan focal objet de l'oculaire.

D'après la figure on a :

- $P_{\text{oculaire}} = \frac{\alpha'}{\overline{A_1B_1}} = \frac{\text{Tan}\alpha'}{\overline{A_1B_1}} = \frac{1}{f'_{\text{oculaire}}}$  ;
- $\Delta = F'_1F_2$  : La distance donnée du microscope, est maintenue constante par un tube métallique ;
- Les triangles  $O_1IF'_1$  et  $A_1B_1F'_1$  permet d'écrire :

$$\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{OI}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = Y_{\text{objectif}} = \frac{\overline{A_1F'_1}}{\overline{O_1F'_1}} = \frac{\overline{F_2F'_1}}{\overline{O_1F'_1}} = \frac{\Delta}{f'_{\text{objectif}}}$$

Donc on peut conclure que :

$$P_{\text{microscope}} = \frac{\Delta}{f'_{\text{objectif}} f'_{\text{oculaire}}}$$

#### IV.3.2.2 Grossissement

Par définition, le grossissement  $G$  d'un microscope égal au rapport entre les diamètres apparents maximaux d'un objet vu à travers le microscope ou vu à l'œil nu.

Donc on peut écrire cette relation :

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

$$G = P d_m$$

Ou  $d_m$  est la distance minimale de vision distincte.

#### IV.4 Lunette de Galilée

La lunette de Galilée est formée d'un tube comprenant, à l'une de ses extrémités, un objectif convergent et à l'autre extrémité, un oculaire divergent, l'ensemble étant utilisé pour l'observation d'objets lointains. Grâce à un instrument de ce type qu'ils ont découvert en 1610 les satellites de Jupiter, puis les phases de Vénus, les montagnes de la Lune, les étoiles dont est composée la Voie Lactée, ou encore l'aspect insolite de Saturne. Les observations de Galilée marquèrent un tournant décisif dans l'histoire des sciences puisqu'elles apportaient la preuve de la réalité du système héliocentrique de Copernic.

##### IV.4.1 Principe de fonctionnement

La lunette Galilée dite lunette astronomique, c'est un instrument optique constitué de deux lentilles convergentes ayant le même axe optique. La première lentille dite l'objectif, est une lentille de grande distance focale de l'ordre du mètre, qui a pour rôle de donner à l'étoile AB une image réelle réduite  $A_1B_1$ , cette image est regardée par l'observateur à travers un oculaire de l'ordre de quelques centimètres de distance focale jouant le rôle de loupe.

Pour voir une image à travers la lunette Galilée, l'étoile étudiée peut être modélisé par un objet AB placé à l'infini (Fig. 11.10), son image  $A_1B_1$  par l'objectif est une image réelle et renversée, située dans le plan focal image.

##### IV.4.2 Grossissement angulaire d'une lunette

Le grossissement d'une lunette est par définition égal au rapport entre les diamètres apparents d'un objet vu à travers la lunette et vu à l'œil nu :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\alpha'}{A_1 B_1} \frac{\overline{A_1 B_1}}{\alpha} = \frac{\alpha'}{A_1 B_1} f'_1$$

$$G = f'_{\text{oculaire}} \cdot f'_1$$

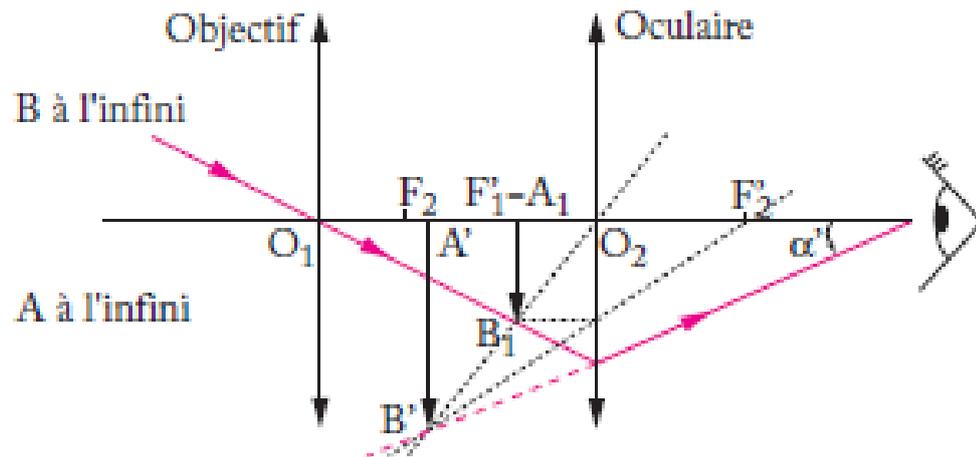


Figure .IV.8 Le principe de fonctionnement de la lunette Galilée.

# Résumé du chapitre

## L'œil

L'œil se compose de différentes régions et de quatre types de capteurs, des bâtonnets et trois types de cônes :

Les cônes mesurent chacun une couleur rouge, vert ou bleu ;

Les bâtonnets mesurent uniquement la luminosité, et sont les seuls actifs dans le noir ;

L'iris, dont l'ouverture forme la pupille.

On peut donc schématiser l'œil comme une lentille mince convergente (cornée et cristallin), d'une distance focale variable et un écran.

## L'accommodation est limitée

L'œil normal peut voir nettement des objets depuis un "punctum remotum" (P.R.), qui est à l'infini, jusqu'à un "punctum proximum" (P.P.) distant de l'œil d'environ 25 cm.

## Défauts de l'œil

**Myopie** : Dans le cas où l'image se forme en avant de la rétine

**Hypermétropie** : Dans ce cas l'œil présente le défaut inverse de la myopie.

**Presbytie** : Dans ce cas, le défaut est dû au vieillissement humain.

## Caractéristiques d'un microscope

### Puissance

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

On peut déduire une autre relation de la puissance :

$$P = \frac{\alpha'}{A_1B_1} * \frac{\overline{A_1B_1}}{AB}$$

$$P_{\text{microscope}} = P_{\text{oculaire}} * \gamma_{\text{objectif}}$$

La puissance intrinsèque

$$P_{\text{oculaire}} = \frac{\alpha'}{A_1B_1} = \frac{\text{Tan}\alpha'}{A_1B_1} = \frac{1}{f'_{\text{oculaire}}} ;$$

$\Delta = F'_1 F_2$  : La distance donnée du microscope.

$$P_{i \text{ microscope}} = \frac{\Delta}{f'_{\text{objectif}} f'_{\text{oculaire}}}$$

### Grossissement

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

$$G = P d_m$$

### Grossissement angulaire d'une lunette

Le grossissement d'une lunette est par définition égal au rapport entre les diamètres apparents d'un objet vu à travers la lunette et vu à l'œil nu :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\alpha'}{A_1 B_1} \frac{\overline{A_1 B_1}}{\alpha} = \frac{\alpha'}{A_1 B_1} f'_1$$

$$G = f'_{\text{oculaire}} \cdot f'_1$$

# Exercices et Solutions

## Exercice 1

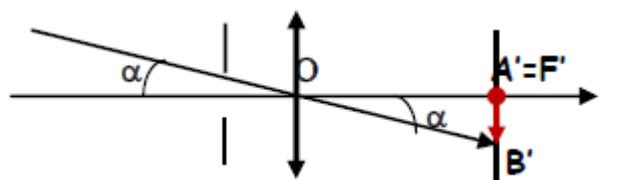
Ahmed observe à l'œil nu une mosquée éloignée. Le diamètre apparent de la mosquée a une valeur de  $10^\circ$ .

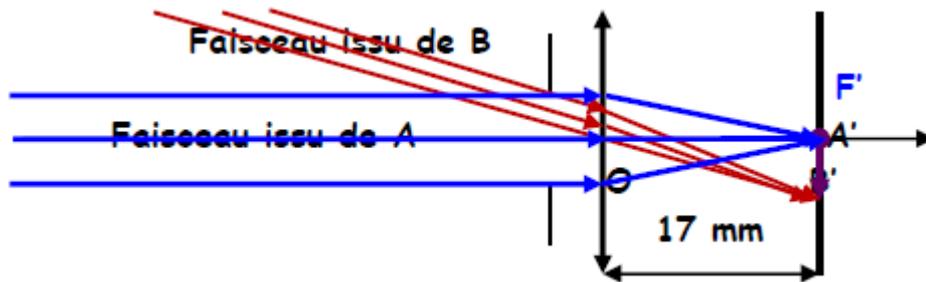
1. Quels sont les éléments optiques essentiels de l'**œil réel** et quel est leur rôle ?
2. Décrire le modèle de l'**œil réduit** et le mettre en correspondance avec l'**œil réel**.
3. En considérant que la mosquée est un objet AB situé à l'infini, faire un schéma, sans souci d'échelle, de l'œil réduit, et construire l'image A'B' de la mosquée. Justifier le tracé des rayons.
4. La distance focale de la lentille de l'œil réduit a pour valeur 17 mm. Quelle est alors la vergence de cette lentille ? Quelle est alors la taille de l'image obtenue sur l'écran

## Correction exercice 1

1- les éléments optiques essentiels de l'**œil réel** sont :

- L'Iris, qui limite la lumière pénétrant dans l'œil en fonction de l'éclairement ;
- L'ensemble des milieux transparents, dont la Cornée et le Cristallin, qui réfractent les rayons de lumière ;
- La rétine sur laquelle se forment les images.
- **L'œil réduit est composé de :**
- Un diaphragme équivalent à l'iris;
- la lentille convergente, équivalente à l'ensemble des milieux transparents ;
- l'écran équivalent à la rétine, situé à une distance constante d de la lentille et sur lequel se forme l'image de l'objet observé.





2- La rétine -----> Ecran ; diaphragme -----> Iris

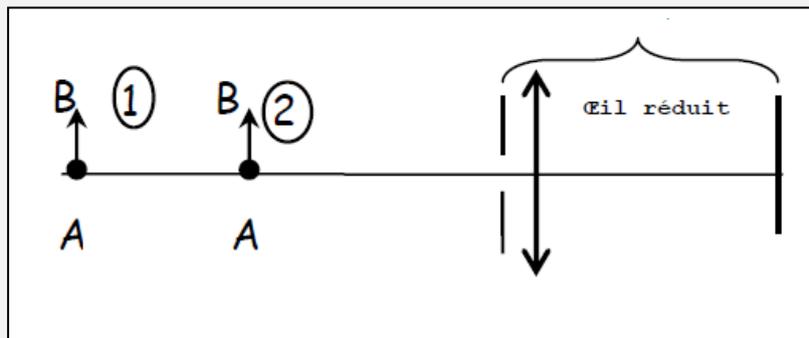
- L'ensemble des milieux transparents, Cornée et le Cristallin-----> lentille convergente

3- La vergence de cette lentille :  $V = 1/f' = 1/17 \cdot 10^{-3} = 1000/17 = 58,82\delta$

$$A'B' = \text{tg}\alpha \cdot f' = \alpha_{\text{rd}} \cdot f' = 0,175 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = (175 \times 17) 10^{-6} = 2975 \mu\text{m} = 2,975 \text{mm} \approx 3 \text{mm}$$

### Exercice 2

Le schéma ci-dessous représente le modèle de l'œil réduit.

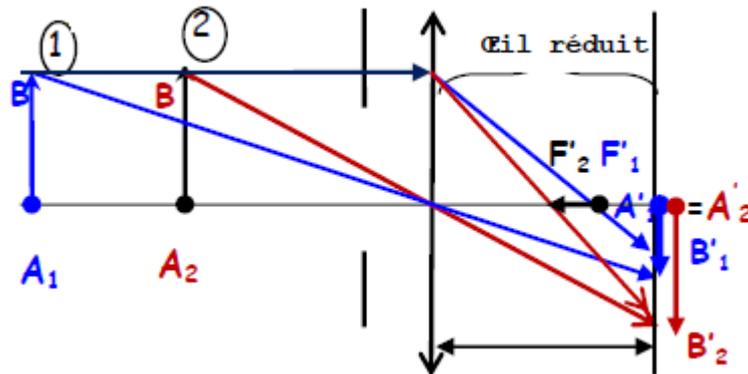


1. Où se forme l'image d'un objet lorsque cet objet est vu net par l'œil ?
2. En utilisant le rayon de lumière passant par le centre optique de la lentille, construire sur le même schéma les images  $A'B'_1$  de l'objet en position 1 et  $A'B'_2$  de l'objet AB en position 2.
3. En utilisant un autre rayon, déterminer la position du foyer image de la lentille pour les 2 positions de l'objet AB.
4. Comment évolue la distance focale de la lentille quand l'objet AB s'approche de l'œil.
5. Dans un œil réel, cette évaluation provient de la déformation du cristallin. Expliquer comment est modifié la forme du cristallin quand un objet s'approche de l'œil ?

## Correction exercice 2

1- Lorsque l'œil réduit observe l'objet **AB** en "**position 1**" la lentille en forme une image **A'B'<sub>1</sub>**, sur l'écran-rétine.

Le tracé permet de construire le point image **B'<sub>1</sub>** sur l'écran-rétine, ce qui détermine la position du foyer principal image **F'<sub>1</sub>** de la lentille. Pour que l'objet soit toujours vu net, il faut que l'image **A'B'** reste sur la rétine quand l'objet s'approche de l'œil. Lorsque



l'objet est en "**position 2**" : La lentille en forme une image **A'<sub>2</sub>B'<sub>2</sub>** sur l'écran-rétine. Le tracé permet de construire le point image **B'<sub>2</sub>** sur l'écran-rétine ce qui détermine la position du foyer principal image **F'<sub>2</sub>** de la lentille. Ainsi **OF'<sub>2</sub>** est inférieur à **OF'<sub>1</sub>** **donc la distance focale de la lentille diminue quand l'objet s'approche** de l'œil, autrement dit sa vergence augmente ainsi que son rayon de courbure. Donc, pour que **l'image** reste toujours sur **la rétine**, le **cristallin** se déforme, ce qui **modifie sa distance focale** : c'est le **phénomène de l'accommodation**

## Exercice 3

Soit un œil normal dont le pouvoir de séparation est de **1'**, le **Punctum Remotum PR** est infini et le **Punctum Proximum PP** est situé à 25 cm devant l'œil.

**a-** Quelle distance minimale doit séparer deux points lumineux pour que cet œil puisse les distinguer à une distance de 100 m ?

**b-** Sachant que la distance cristallin-rétine vaut 15 mm, calculer les valeurs extrêmes de la vergence du cristallin.

## Correction exercice 3

La taille minimale d'un objet AB, situé à une distance  $d=100\text{m}$ , vue par l'oeil dont le pouvoir séparateur est  $\varepsilon=1'$  est :

$$\tan = \frac{\overline{AB}}{d} = \varepsilon_{rd} \Rightarrow \overline{AB} = d \cdot \varepsilon_{rd} \Rightarrow \overline{AB} = 10^5 \text{ mm} \cdot 2,907 \cdot 10^{-4} \text{ rd} = 29,07 \text{ mm}$$



$$AB \xrightarrow{L_1} A'B' \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OA} + \overline{OF'}}$$

Objet **AB** situé sur le **PR** (infini) alors son image A'B' est située sur la rétine :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\underbrace{\overline{OA}}_0} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow V_{min} = \frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{1}{15 \cdot 10^{-3}} = 66.67\delta$$

Objet AB situé sur le **PP** (-25cm) alors son image A'B' est toujours située sur la rétine:

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow V_{max} = \frac{\overline{OA} - \overline{OA'}}{\overline{OA} \cdot \overline{OA'}} = 70.67\delta$$

$$V_{min} = 66.67\delta \leq V \leq V_{max} = 70.67\delta$$

**Exercice 4**

Quelles lunettes faut-il prescrire :

1. à un myope qui ne peut lire un texte qu'éloigné de ses yeux de 20cm au maximum ?
2. A un hypermétrope qui ne peut lire un texte qu'éloigné de ses yeux de 50cm au minimum ?
3. Un homme a une vision normale dans l'eau. Est-il myope ou hypermétrope ?

**Correction exercice 4****1. Le myope :**

Son PR est à 20 cm au lieu d'être à l'infini.

Pour voir à l'infini, il faut que l'image d'un objet à l'infini soit à travers les lunettes ramené à 20cm des yeux du myope => lentille divergente avec  $f' = -20\text{cm}$  ou  $-5\delta$  (dioptries)

**2. L'hypermétrope :**

Son PP est à 50 cm.

Si on veut le ramener à 25 cm (valeur normale), il faut que l'image d'un objet à 25 cm des yeux soit amenée à 50cm par les lunettes.

La vergence de la lentille vaut :

$$V = \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = OA' = -50\text{cm}, p = OA = 25\text{cm}$$

Il faut donc des lentilles convergentes de Vergence  $2\delta$  (dioptries).

Dans l'eau, au niveau de la cornée, au lieu d'avoir un dioptre air-eau, on a un dioptre eau-eau (approximativement). Donc l'œil est beaucoup moins convergent dans l'eau.

⇒ On est naturellement hypermétrope dans l'eau.

3. Si un homme a une vision correcte dans l'eau, c'est que son œil est beaucoup plus convergent que la normale. ⇒ Cet homme est par conséquent très myope

**Exercice 5**

Une lunette astronomique est formée de deux lentilles :  $L_1$  l'objectif,  $L_2$  l'oculaire.  $f_1' = 80\text{cm}$ ,  $f_2' = 2\text{cm}$ . Ce type d'instrument est afocal.

1. Déterminer la distance  $O_1O_2$  pour qu'il en soit ainsi.

Un objet à l'infini donne donc une image à l'infini. Soit  $\alpha$  le diamètre angulaire d'une planète et  $\alpha'$  le diamètre angulaire de son image à travers la lunette.

2. Où se trouve l'image de la planète par  $L_1$  ?

3. Déterminer le grossissement de la lunette :  $G = \alpha'/\alpha$ . Si maintenant on désire, avec cette lunette, regarder un objet à la distance  $d$  de l'objectif.

4. Où se trouve maintenant l'image de cet objet par  $L_1$  (comparer à la position de l'image de la planète) ?

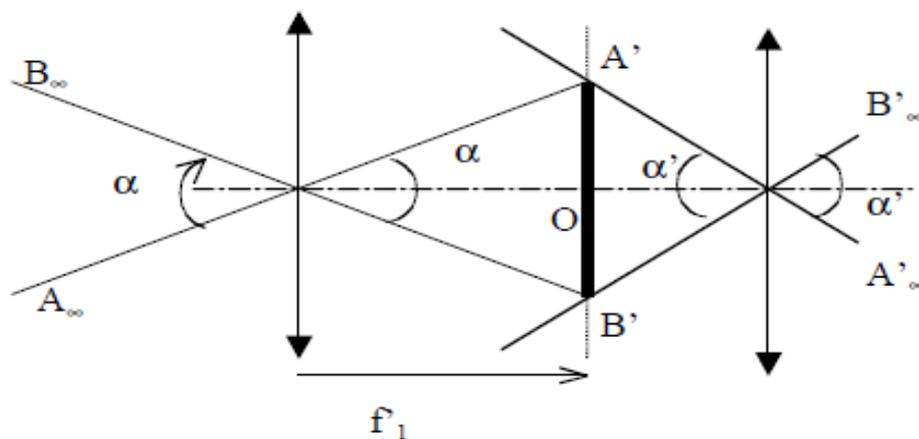
5. De combien faut-il déplacer l'oculaire et dans quelle direction pour que l'image de cet objet par la lunette soit à l'infini ?

**Correction exercice 5**

1. Si l'instrument est afocal, tout rayon arrivant parallèlement à l'axe doit ressortir parallèle à l'axe  $\Rightarrow$  le foyer image de  $L_1$  doit se trouver au niveau du foyer objet de  $L_2$ .

$$O_1O_2 = O_1F_1' + F_2O_2 = f_1' + f_2' = 82\text{cm}.$$

2. La planète étant à l'infini, son image par l'objectif sera en son foyer image :  $F_1'$ . Sa taille sera d'ailleurs  $|\alpha f_1'| = A'B'$ .



3. Cette image est ensuite renvoyée à l'infini avec l'oculaire. Et le nouveau diamètre angulaire de la planète à la sortie est  $|\alpha'| = |(\alpha f_1')/f_2'| \Rightarrow G = -f_1'/f_2'$  grossissement de la

lunette. ( $G$  grossissement de la lunette. ( $G$  grossissement de la lunette. ( $G < 0$  car l'image à l'infini vue par l'œil est renversée).

4. La planète est plus grosse à la sortie de la lunette, comme l'œil n'est sensible qu'aux dimensions angulaires, celle-ci nous semble plus proche qu'à l'œil nu.

Objet à distance finie  $O_1A = -d$

Image  $A'$  par  $L_1$  :

$$\frac{1}{O_1A'} - \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \overline{O_1A'} = \frac{df_1'}{d - f_1'} = f_1' + \frac{f_1'^2}{d - f_1'}$$

(On a  $d - f_1' > 0$  si l'objet n'est pas trop près).

Donc l'image  $A'$  est à droite de  $F_1'$  (logique, les objets et les images se déplacent dans le même sens) Pour que l'objet soit renvoyé à l'infini à la sortie de la lunette, il faut que  $A'$  se trouve en  $F_2$  foyer objet de l'oculaire.

### Exercice 6

Un microscope est formé d'un objectif assimilé à une lentille convergente  $L_1$  de vergence  $250 \delta$  et d'un oculaire assimilé à une lentille convergente  $L_2$ , située à 18,9 cm en arrière de  $L_1$ . On place un objet  $AB$  à 4,1 mm en avant du centre optique  $O_1$  de  $L_1$ .

- Quelle est la nature et la position de l'image  $A'B'$  formée par l'objectif  $L_1$ .
- Calculer la taille de cette image  $A'B'$  pour un objet  $AB$  de 10  $\mu\text{m}$ .
- L'œil regarde à travers le microscope. Quelle est la nature de l'image finale  $A''B''$  ?
- On veut que cette image finale  $A''B''$  soit à l'infini. En déduire la distance focale  $f_2$  de la lentille  $L_2$  (l'oculaire).
- On observe un globule rouge assimilé à un cylindre aplati dont l'axe est l'axe optique  $\Delta$  du microscope. L'image finale  $A_1''$  de la face inférieure  $A_1$  du globule se forme à l'infini. Où se trouve alors l'image intermédiaire  $A_1'$  de cette face  $A_1$  ?

## Correction exercice 6

On a :  $V_1=250\delta \Rightarrow f'_1=4\text{mm}$ ,  $O_1O_2=18.9\text{ cm}=189\text{ mm}$ ,  $O_1A=-4.1\text{mm}$ ,  $V_2=?$

- a) Un microscope est formé d'un objectif assimilé à une lentille convergente **L1** de vergence  $250\delta$ . Sa distance focale  $f'_1$  est égale à 4cm. L'objet **AB** a pour image **A'B'**, formée par la lentille **L1** telle que :

$$AB \xrightarrow{L1} A'B' \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{\overline{O_1F'_1}} \Rightarrow \overline{O_1A'} = \frac{\overline{O_1A} \cdot \overline{O_1F'_1}}{\overline{O_1A} + \overline{O_1F'_1}} = 164\text{ mm et } \Rightarrow$$

$$\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{164}{-4.1} = -40$$

- b) Cette image **A'B'** est réelle, renversée et plus grande que l'objet de 40 fois et elle mesure  $400\mu\text{m}$ , sachant que l'objet **AB** mesure  $10\mu\text{m}$ .

- c) **A''B''** est une image virtuelle, renversée, agrandie, formée par la lentille **L2** qui joue le rôle de la Loupe.

d)

$$AB \xrightarrow{L1} A'B' \xrightarrow{L2} A''B'' \Rightarrow \frac{1}{\overline{O_2A''}} - \frac{1}{\overline{O_2A'}} = \frac{1}{\overline{O_2F'_2}} \quad \text{avec } \overline{O_2F'_2} = \overline{O_2A} = \overline{O_2O_1} + \overline{O_1A'}$$

$$= -189 + 164 = -25\text{ mm}$$

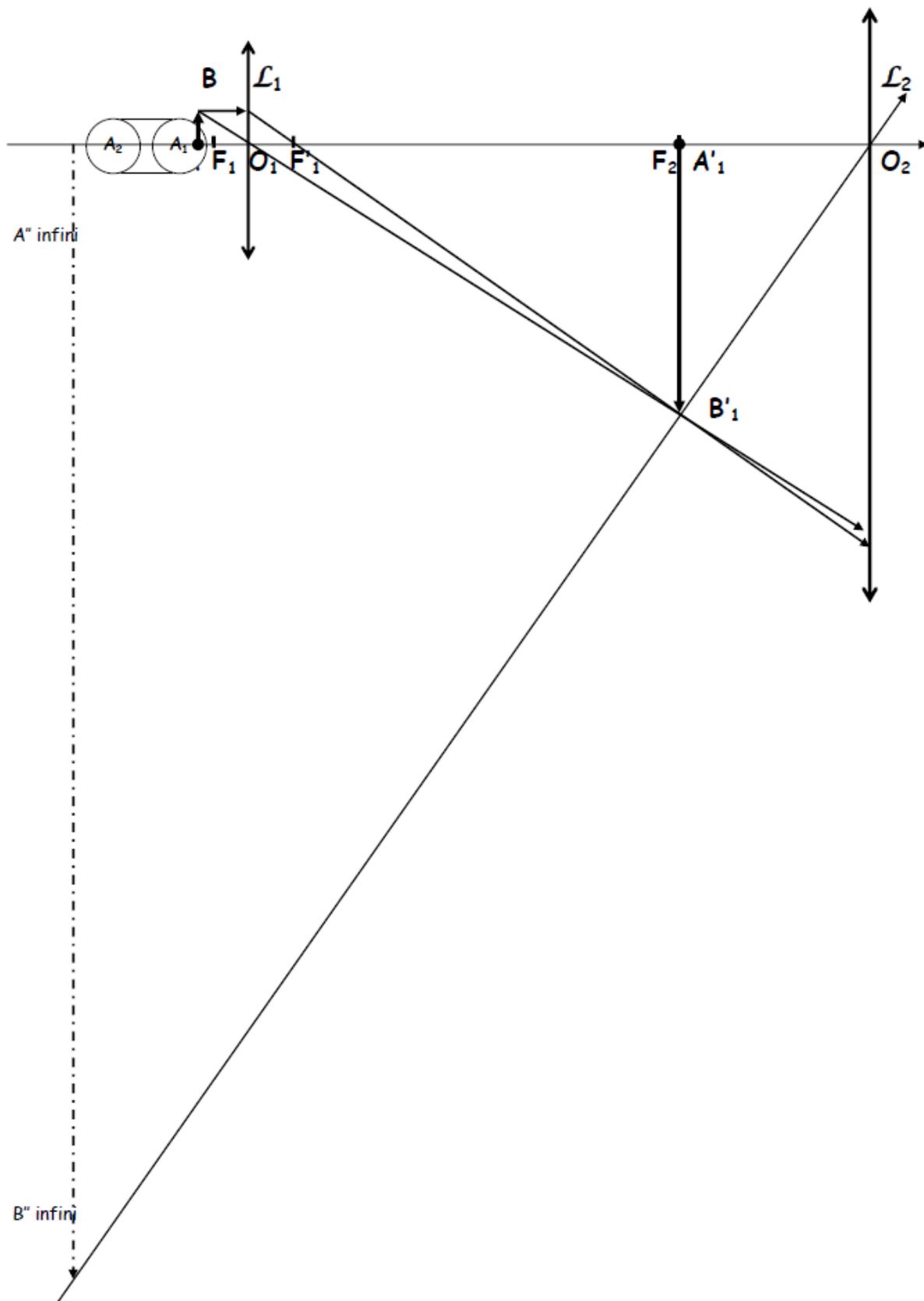
- e) L'image **A''B''** est située à l'infini, alors l'image intermédiaire **A'\_1B'\_1**, formée par la lentille **L1**, doit être située sur le plan focal principal objet  $F'_2$  de la lentille **L2**.

f)

$$AB \xrightarrow{L1} A'B' \xrightarrow{L2} A''B''$$

En vertu de la question (d), on a :

$$\overline{O_1A_1} = -4.1\text{ mm} \Rightarrow \overline{O_1A'_1} = 164\text{ mm et } \overline{O_1A'_1} = \overline{O_2F'_2} = -25\text{ mm} \Rightarrow A'_1 \rightarrow \infty$$



# Références

# Références

- [1] J-P. Parisot, P. Segonds, S. Le Boiteux, Cours Physique Optique, Sciences Sup, Dunod, 2003.
- [2] N. Awanou, Cours de Physique Optique, Fascicule. Cotonou, 1996.
- [3] T. Bécherrawy, Optique géométrique : Cours et exercices corrigés, Broché, 2005.
- [4] M. May, Introduction à l'optique, Ed. Dunod, Paris, 1993.
- [5] A. Moussa et P. Ponsonnet. Cours de physique-Optique, éditions Desvigne, Paris, 1992.
- [6] L. Quaranta, Introduction à l'optique, Ed Masson, Paris, 1999.
- [7] J.L. Queyrel et J. Mesplede, Les Nouveaux Précis de Physique Optique : Cours et exercices résolus, Editions Bréal, Paris, 1999.
- [8] JP. Maratrey, Principe de Fermat indice de réfraction, Octobre, 2011.
- [9] Agnès Maurel, Cours physique optique géométrique, Ed Belin, 2002
- [10] Sid Ahmed Beldjilali, Polycopié de cours optique géométrique ; 2015-2016.
- [11] Abdelaziz Drici et Azzedine Ainsouya, polycopié de cours optique géométrique : Les miroirs plans et sphériques.
- [12] Hassan Akabli, cours optique géométrique : Chapitre V : Les systèmes centrés, Université Abdelmalek Essaadi, ENSA Tanger.
- [13] Zeineb Ben Ahmed, Habib Bouchriha et Samia Kaddour, Polycopié de cours d'Optique géométrique, Université Virtuelle de Tunis, 2006
- [14] Touma, Travaux dirigés, Université Mohammed V Agdal, 2013-2014.
- [15] Sabri, Travaux dirigés, Université Chouaïb Doukkali El Jadida , 2019-2020.
- [16] [http://www.edu.upmc.fr/physique/lp103ElectOpt/doc\\_opt/optique\\_td3\\_cor.pdf](http://www.edu.upmc.fr/physique/lp103ElectOpt/doc_opt/optique_td3_cor.pdf)
- [17] <http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere>