UNIVERSITÉ PARIS 13 NORD

## Licence Physique/Chimie

# Cours d'Optique Instrumentale

**2007-2008**

**Sébastien Forget**

武漢工程大學 Wuhan Institute of Technology

# SOMMAIRE

*Séance n° 0*

*Introduction à l'optique*

# I. Introduction

L'optique est la partie de la physique qui étudie la lumière et les phénomènes qu'elle engendre, même lorsque ceux-ci ne sont pas détectables par l'œil humain. Mais, pourquoi étudier l'optique ?

- L'optique conditionne notre perception de l'environnement puisqu'elle est la science de la vision
- Le laser a entraîné un renouveau complet de cette discipline
- Les technologies optiques sont partout : télécommande infrarouge, CD, lunettes, télescope, imagerie par satellite, lecteur de code barre….

# II. La lumière

## II.1. Les sources

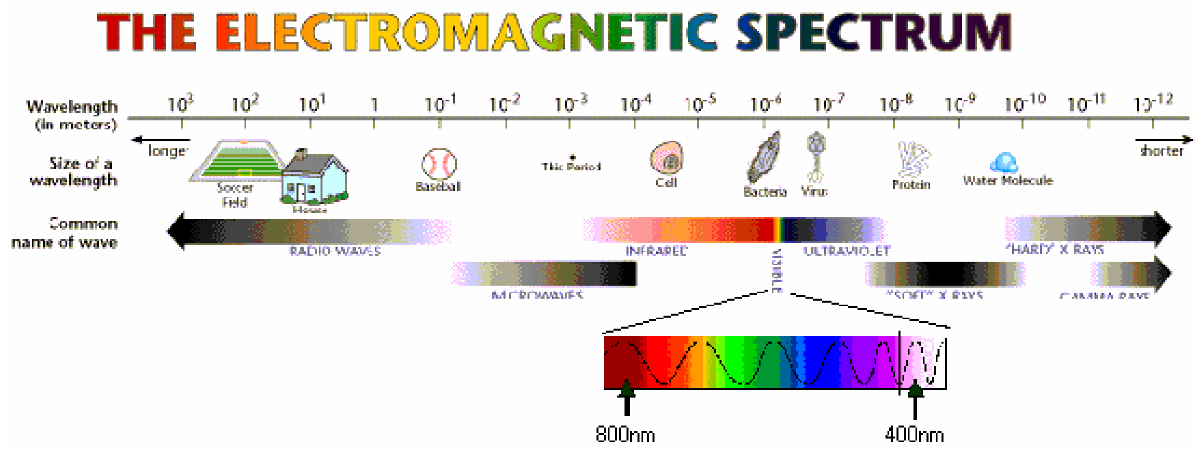
Les sources de lumière sont très variées. Elles peuvent être à incandescence comme le Soleil ou la plupart des ampoules que l'on utilise. En fait tous les corps portés à une certaine température émettent de la lumière. Lorsque la lumière est produite par tout autre moyen que le chauffage, on parle de luminescence : par exemple, les tubes néon ou les lampes fluorescentes. Le laser est un autre type de source lumineuse considérée comme quasi-parfaite. Ces diverses sources peuvent être caractérisées par différents paramètres : leur intensité, leur direction d'émission, leur rendement (puissance lumineuse émise sur puissance fournie) ou leur mode d'émission. Un autre paramètre important est la « couleur » du rayonnement émis par la source. Cette notion fait intervenir le spectre électromagnétique.

## II.2. Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques couvrent une très large gamme de fréquence : la lumière visible ne constitue qu'une infime partie des ondes électromagnétiques (voir théorie ondulatoire), parmi lesquelles on compte les ondes radio (et télé), les micro-ondes, l'infrarouge (responsable de la sensation de chaleur), l'ultraviolet (responsable entre autres du bronzage…), les rayons X et les rayons gamma.

On classifie les ondes en fonction de leur longueur d'onde dans le vide $\lambda_0$ (en mètres) ou de leur fréquence $\nu$ (en Hz). On a la relation $\lambda_0 = c/\nu$ avec c la vitesse de la lumière dans le vide.

Excepté la lumière produite par un laser qui est quasiment monochromatique (une seule couleur), toute lumière produite par d'autres sources peut être décomposée en plusieurs couleurs. C'est le but de la **spectrométrie**.




Le visible ne correspond qu'à la partie du spectre correspondant à $\lambda_0$ **compris entre 400 et 800 nm**.

### *II.2.1.La théorie corpusculaire*

Cette théorie conçoit la lumière comme un ensemble de particules (ou corpuscules) dont le mouvement est décrit dans un cadre proche de celui de la mécanique. Ces particules sont appelées photons et ont une énergie $E=h\nu$ : où h est la constante de Planck ($h=6.63 \times 10^{-34}$ J.s) et $\nu$ la fréquence de l'onde lumineuse en Hz. **Les trajectoires suivies par ces particules sont les rayons lumineux que l'on retrouvera en optique géométrique**.

### *II.2.2.La théorie ondulatoire*

La théorie ondulatoire conçoit la lumière comme une onde, dont la propagation est régie par les équations de Maxwell. Dans ce cas, **le champ électromagnétique oscille perpendiculairement à un axe qui correspond au rayon lumineux de l'optique géométrique**.

#### II.2.2.1.<u>Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?</u>

On appelle onde le phénomène de propagation dans un milieu sans transport de matière :

- une onde se propage à partir d'une source dans toutes les directions de l'espace.

- la perturbation se transmet de proche en proche avec un transfert d'énergie sans transport de matière ;

- ce phénomène dépend du temps.

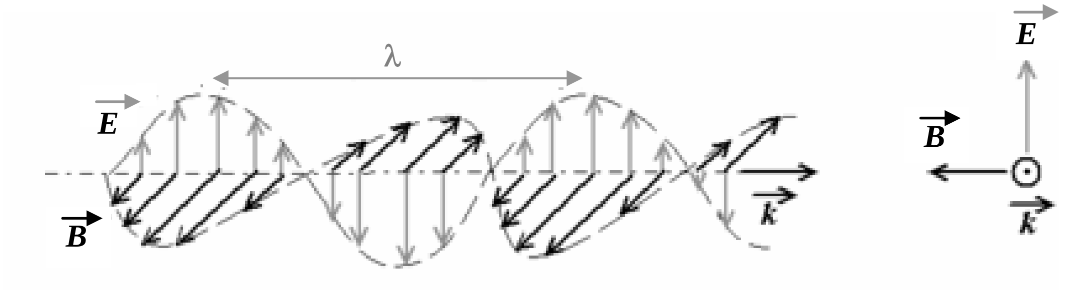
- la vitesse de propagation d'une onde est une propriété du milieu : la vitesse de la lumière dépend par exemple de l'indice du milieu qu'elle traverse.

Contrairement aux ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide.

#### II.2.2.2.<u>Le champ électrique :</u>

Les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ oscillent autour d'un axe repéré par le vecteur $\vec{k}$.

$\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont toujours perpendiculaire entre eux. Chacun d'eux est perpendiculaire à $\vec{k}$ : on dit qu'ils forment un trièdre direct ($\vec{E}, \vec{B}, \vec{k}$).




**a. Propagation d'une onde électromagnétique le long du vecteur k** **b. Trièdre direct (E,B,k)**

$\vec{E}$ oscille en fonction du temps perpendiculairement à la direction de propagation indiquée par le vecteur $\vec{k}$ comme $\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_0(\vec{r})\cos(\vec{k}.\vec{r} - 2\pi\nu t)$.

Où $\vec{r}$ est le vecteur position

$\nu$ est la fréquence de l'onde.

$|\vec{E}_0|$ est l'amplitude du champ électrique.

La direction de ce vecteur définit ce que l'on appelle la polarisation du champ. Ce concept n'est pas présent dans l'optique géométrique ou corpusculaire. Mais il permet de décrire certains phénomènes, comme la réflexion de la lumière sur certaines surfaces, le fonctionnement des filtres polariseurs ou les propriétés de certains cristaux.

La polarisation est aussi utilisée pour « visualiser » les contraintes que subit un matériau ou le dosage de solutions.

**<u>Attention :</u> Ne pas confondre la direction de propagation de l'onde (selon $\vec{k}$) et la polarisation de l'onde, associée à la direction du champ électrique $\vec{E}$.**

Ces deux théories ne sont pas en concurrence, chacune d'elle décrivant bien le comportement de la lumière dans une situation donnée. C'est pourquoi on parle de la dualité onde corpuscule.

# III. Optique géométrique

L'optique ondulatoire est nécessaire pour décrire les phénomènes de polarisation et d'interférences, mais devient vite compliquée et très lourde à utiliser pour décrire les instruments d'optique. De même la théorie corpusculaire à proprement parler n'est pas nécessaire à ce niveau là. Pour décrire les éléments optiques simples on utilisera plutôt le modèle de l'optique géométrique.

## III.1. Cadre de l'optique géométrique

Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite selon toutes les directions de l'espace à la vitesse c = 299792458 m.s$^{-1}$. C'est une vitesse limite que rien ne peut dépasser. Lorsque la lumière se propage dans un milieu transparent homogène et isotrope, elle se déplace à une vitesse v donnée par :

**v = c/n**

où n est l'indice de réfraction du milieu et c la vitesse de la lumière dans le vide. L'indice n est nécessairement supérieur à 1. L'indice dépend de plusieurs paramètres dont **la nature du milieu** et **la longueur d'onde** de la lumière considérée.

Quelques valeurs d'indice de réfraction courantes :

- pour le vide n=1
- pour l'air n=1,00029
- pour l'eau n=1,33
- pour le verre en silice usuel n=1,5

Un milieu **homogène** est un milieu dont l'indice de réfraction est le même en tout point. Un milieu **isotrope** est un milieu dont l'indice de réfraction ne dépend pas de la direction considérée. C'est le cas pour l'air ou l'eau mais c'est faux pour la plupart des cristaux où l'indice dépend du trajet suivi par la lumière. Dans un tel cas, le milieu est dit anisotrope.

Dans les milieux qui sont à la fois homogènes, transparents et isotropes (MHTI), on considère que les **rayons** lumineux se propagent en ligne droite. Un ensemble de rayons forme un **faisceau** lumineux. Une telle approche est pratique pour construire des images : c'est l'optique géométrique. Avec la construction d'images, il devient possible de comprendre le fonctionnement d'instruments d'optique simples comme une lentille puis plus complexes comme l'œil. Pourquoi ne voit-on qu'une étendue limitée ? Que se passe-t-il lorsqu'un œil est myope ? Pourquoi suffit-il de mettre des lunettes adaptées pour corriger les défauts de la vision ? Avec la construction des rayons, nous verrons qu'il est possible d'observer l'infiniment petit comme l'infiniment grand. Ainsi, vous comprendrez pourquoi un microscope permet d'observer les petites molécules biologiques alors qu'une lunette astronomique permet de regarder les étoiles.

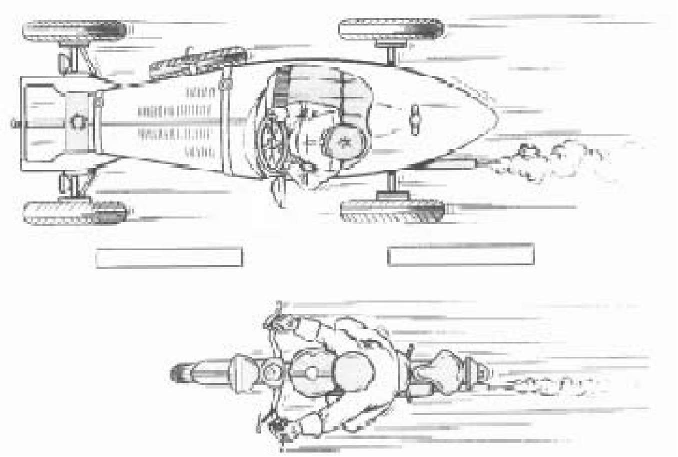
Dans tout ce qui suivra, sauf mention explicite, nous supposerons que le milieu considéré est un milieu homogène, transparent et isotrope.

### III.2. Le miroir plan

Le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à la droite perpendiculaire à la surface passant par le point d'incidence. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :

$$\boxed{r = i}$$

Exercice : L'automobiliste peut-il voir le motard dans son rétroviseur sur la figure suivante ? Justifier votre réponse à l'aide d'un tracé



#### *III.2.1. Image virtuelle*

Considérons un point lumineux A. Il envoie des rayons dans toutes les directions ; parmi ceux-ci le rayon AI se réfléchit selon les lois de la réflexion suivant IR dont le prolongement passe par A'. Il en est de même pour I'R', rayon réfléchi correspondant au rayon incident AI'. L'œil ne reçoit qu'un pinceau de rayons compris entre IR et I'R' et ne représentant qu'une infime partie des rayons émis par l'objet.

Pour un œil qui regarde dans un miroir, tout se passe comme si les rayons issus de A venaient d'un point fictif A' qui est le symétrique de A par rapport au miroir. L'œil (et le cerveau) étant conditionné à la propagation rectiligne de la lumière, il « croit » voir un objet en A', en tous points identiques à A ; l'œil est trompé par le changement de marche dû à la réflexion sur le miroir. A' est appelé image virtuelle du point A, car si on place un écran en A', bien sûr, il ne se passe rien car la lumière ne franchit jamais le miroir !
A chaque point de l'objet, le miroir fait correspondre un point image virtuel et l'ensemble de ces points images constitue l'image de l'objet. Nous pouvons donc déduire de ces observations qu'un miroir plan donne, d'un objet réel, une image virtuelle de l'objet symétrique par rapport au miroir.

Exercice : Une femme mesurant 1,60m se tient debout devant un miroir plan vertical. Quelle est la hauteur minimale du miroir et à quelle hauteur du sol doit se trouver le bord inférieur du miroir pour que la femme puisse se voir des pieds à la tête (on supposera que ses yeux se situent à 10cm au dessous du sommet de son crâne). A quelle distance par rapport au miroir doit-elle se poster?

Remarques :

- L'œil ne verra pas le rayon (1) issu de A puisqu'il n'est pas réfléchi vers la pupille de l'œil.

- Il faut au moins deux rayons pour dessiner l'image d'un point par un système optique ; l'image se trouve à l'intersection des deux rayons sortants.

- On note que plus on éloigne l'objet, plus les rayons issus de A et perçus par l'œil feront un angle petit entre eux. Ainsi en optique géométrique on fera l'approximation que les rayons provenant d'un objet à l'infini sont parallèles.

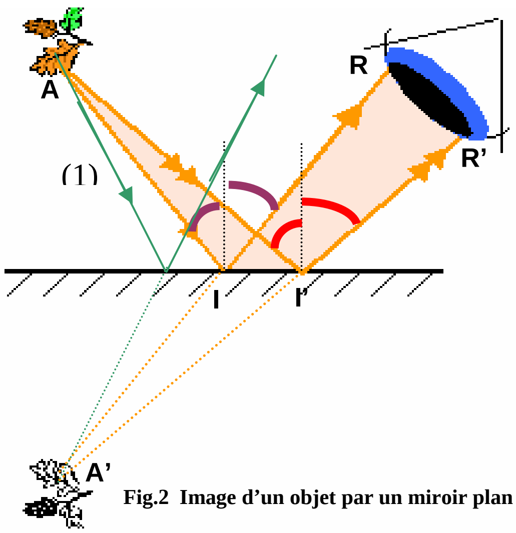


**Fig.2 Image d'un objet par un miroir plan**

##### III.2.2. Mirage

C'est le même type d' « illusion d'optique » qui est à l'origine de l'observation des mirages :

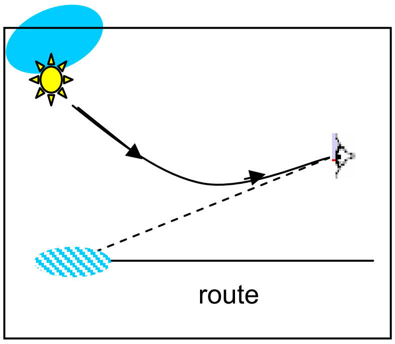



**Fig.3 exemple de mirage et schéma explicatif**

Lorsque la température du sol est différente de celle de l'atmosphère, il existe au voisinage du sol une couche d'air dans laquelle l'indice de réfraction varie rapidement, entraînant la courbure des rayons lumineux : on croit voir un reflet sur un plan d'eau alors qu'en fait c'est « l'image virtuelle du ciel » que l'on voit !

*Voir pour plus d'information : [http://www-lpl.univ-paris13.fr:8088/lumen/Ressources_Diverses.htm#mirage](http://www-lpl.univ-paris13.fr:8088/lumen/Ressources_Diverses.htm#mirage)*

### III.3. Les lois de Snell-Descartes

Le hollandais W. Snell (1580-1627) étudia le comportement d'un rayon lumineux à l'interface de deux milieux. Descartes retrouva indépendamment ces résultats et les publia en 1637.

##### III.3.1. Réflexion et réfraction d'un rayon lumineux

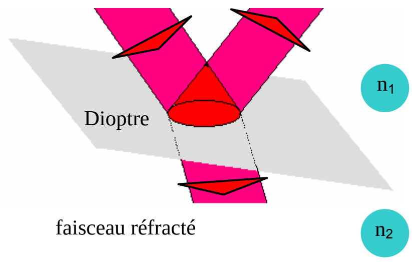



**Fig.4 réflexion et réfraction d'un faisceau sur un dioptre**

Que se passe-t-il quand un rayon arrive à la surface séparant deux milieux d'indices différents (cette surface est appelée dioptre) ?

A l'interface de deux milieux d'indices optiques différents, un rayon lumineux donne généralement naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté, ou transmis.

On dit qu'il y a ***réflexion*** lorsque le rayon émergent se propage dans le même milieu que le rayon incident.

On dit qu'il y a ***réfraction*** lorsque le faisceau émergent se propage dans le milieu séparé du milieu incident par le dioptre.

##### III.3.2. Plan d'incidence

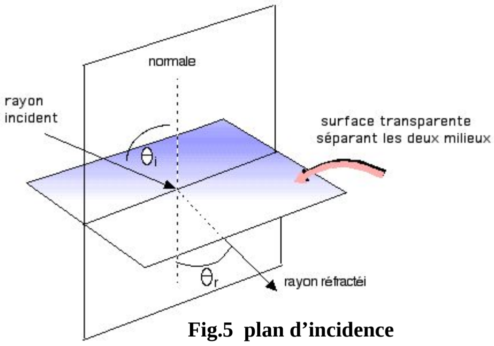



**Fig.5 plan d'incidence**

Soit un rayon lumineux arrivant sur un dioptre. Celui-ci peut être assimilé localement à un plan (plan tangent) et on appelle normale toute droite perpendiculaire à ce plan. On appelle plan d'incidence le plan contenant le rayon incident et la normale au point d'incidence.

### III.3.3. *Lois de la réflexion*

Comme dans le cas du miroir, le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence.

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

$$\boxed{r = i_1}$$

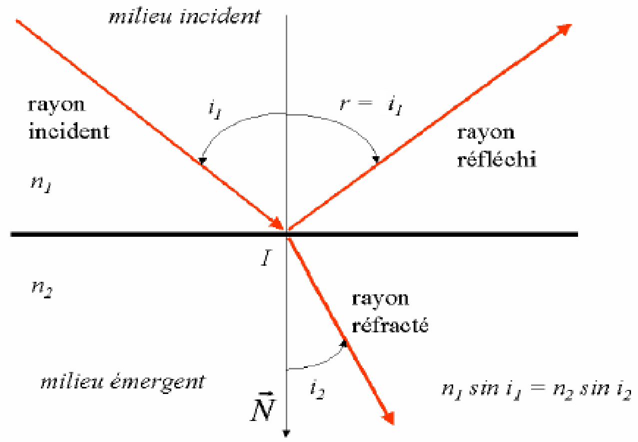



**Fig.6 illustration des lois de Descartes.** *Ici $n_1 > n_2$*

Remarque : Typiquement, la quantité de lumière réfléchie sur un vitre est de l'ordre de 4% seulement. Vous ne verrez donc votre reflet dans la vitre du métro que dans les tunnels et pas dans les stations où la lumière provenant de l'extérieur est beaucoup plus intense que celle réfléchie.

### III.3.4. *Lois de la réfraction*

Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence.

L'angle de réfraction $i_2$ est lié à l'angle d'incidence $i_1$ par la relation :

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

Ainsi si $n_2 > n_1$, on aura $i_2 < i_1$. Autrement dit, si le premier milieu est moins réfringent que le second ($n_1 < n_2$) le rayon se rapproche de la normale ($i_2 < i_1$).

### III.3.5. *Réflexion totale*

Les deux phénomènes de réflexion et de réfraction se produisent en général simultanément. Nous voyons à la fois notre reflet sur la vitrine d'un magasin et ce qu'il y a à l'intérieur. Les lois de Descartes ne précisent pas la quantité de lumière transmise et la quantité de lumière réfléchie. Il existe cependant un cas particulier où toute la lumière est réfléchie : c'est la **réflexion totale**.

Dans le cas où le rayon arrive d'un milieu 1 d'indice $n_1$ plus grand que l'indice du milieu 2 (**$n_1 > n_2$**), il est possible que l'équation $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ n'ait pas de solution pour $i_2$ si $i_1$ est supérieur à un angle limite $i_L$ tel que :

$$\boxed{\sin i_L = \frac{n_2}{n_1}}$$

**Si l'angle d'incidence est supérieur à $i_L$, il n'y a pas de rayon réfracté**, la réflexion est totale.

La réflexion totale peut être utilisée pour canaliser la lumière. Les ampoules de certaines lampes décoratives éclairent ainsi un ensemble de tubes transparents souples dont seules les extrémités apparaissent lumineuses. Ce phénomène est aussi utilisé dans les fontaines lumineuses où le jet d'eau canalise la lumière qui ne ressortira que lorsque ce dernier sera pulvérisé en une multitude de gouttes colorées (voir http://www-lpl.univ-paris13.fr:8088/lumen/Ressources_Diverses.htm#fontaine ). Enfin c'est aussi sur ce principe que fonctionnent les fibres optiques à saut d'indice, comme vous le dans la partie correspondante du cours.

**Remarques :**

- Le cas où $\boldsymbol{i_1 = i_L}$ est le cas limite pour lequel $n_1 \sin i_1 = n_2$ , soit $\sin i_2 = 1$ ou encore : $\boldsymbol{i_2 = 90°}$.
  Le rayon réfracté sort donc en rasant la surface du dioptre.
- Dans le cas de la réflexion totale 100% de la lumière incidente est réfléchie, rien n'est transmis.
- Lorsque le milieu d'indice faible est l'air (cas le plus fréquent) l'angle limite devient :

$$\boxed{i_L = Arc \sin\left(\frac{1}{n}\right)}$$

#### *III.3.6. Retour inverse de la lumière*

Les lois de Descartes ne font pas intervenir le sens de propagation de la lumière. Un rayon lumineux se propageant dans un milieu d'indice $n_2$ avec un angle d'incidence $i_2$ sera transmis dans le milieu d'indice $n_1$ avec un angle de réfraction $i_1$ tel que $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.

Tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être dans le sens opposé ; c'est le principe de **retour inverse de la lumière**.


$n_1 > n_2$ $\qquad\qquad$ $n_2 < n_1$

# Pour vous entraîner…

# Quizz

1. **A quel siècle Descartes a-t-il vécu ? A quel domaine de L'optique s'est-il intéressé ?**

2. **Citez les grandeurs caractéristiques d'une onde sinusoïdale ? Par quelle(s) relation(s) sont-elles reliées ?**

3. **A quel domaine de longueurs d'onde correspond la lumière visible ? Quelle est la longueur d'onde typique du rouge ?**

4. **Définir l'indice d'un milieu**

5. **Rappelez les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction d'un rayon lumineux**

6. **Entourez la ou les bonnes propositions**

**a.** L'approximation que la lumière se propage en ligne droite est valable dans :

*1. Les milieux isotropes, transparents et homogènes* *2. Les milieux homogènes, absorbants et isotropes*
*3. L'air* *4. L'eau* *5. Tous les milieux*

**b.** Dans un milieu matériel :

*1. La fréquence est augmentée* *2. La fréquence est diminuée* *3. La fréquence est identique*
*4. La vitesse de la lumière augmente* *5. La vitesse de la lumière diminue*
*6. La vitesse de la lumière reste la même*

**c.** La réflexion totale peut se produire lors du passage d'un milieu d'indice $n_1$ vers un milieu d'indice $n_2$ :

*1. Si $n_1 > n_2$ et pour des angles d'incidence faibles*
*2. Si $n_1 < n_2$ et pour des angles d'incidence faibles*
*3. Si $n_1 > n_2$ et pour des angles d'incidence importants*
*4. Si $n_1 < n_2$ et pour des angles d'incidence importants*

**d.** Lors de la réfraction sur un dioptre air/eau, un rayon venant de l'air :

*1. Se rapproche de la normale dans l'eau*
*2. S'écarte de la normale dans l'eau*
*3. N'est jamais réfléchi, même partiellement*

**e.** La lumière se déplace plus vite dans l'eau que dans :

*1. Le vide* *2. L'air* *3. Le verre*

# Exercices supplémentaires (avec correction)

**<u>Exercice 1</u>: Translation d'un miroir plan**

L'œil O d'un observateur est placé à un mètre du miroir plan.

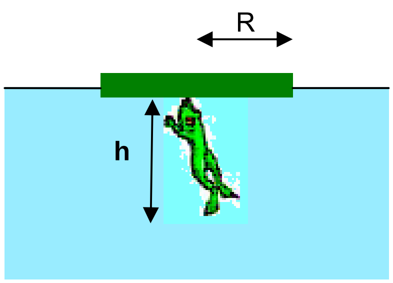
1) A quelle distance est-il de son image O' dans ce miroir ?
2) On déplace le miroir parallèlement à lui-même, d'abord en avant de 25 cm, puis en arrière de 25 cm que devient dans chaque cas la distance de l'œil à son image ? On s'attachera à faire deux schémas clairs illustrant chaque cas.
3) Généraliser ces résultats dans l'énoncé d'un théorème concernant la translation d'un miroir plan. (*Vous appellerez x la distance dont est translatée le miroir plan et vous donnerez la distance de l'œil à son image en fonction de x. Vous résumerez cette démonstration en énonçant un théorème uniquement avec des mots (pas de formules).* )

**<u>Exercice 2:</u> Dispersion de la lumière blanche.**

Un verre a l'indice n = 1,595 pour la lumière rouge et n = 1,625 pour la lumière violette. Un rayon de lumière blanche, qui contient ces deux couleurs, se propage dans ce verre et arrive à la surface de séparation avec l'air sous une incidence de 35° .

1. Calculer l'angle que font dans l'air les rayons rouge et violet.
2. Calculer l'angle de réfraction limite dans le verre pour ces deux longueurs d'onde.

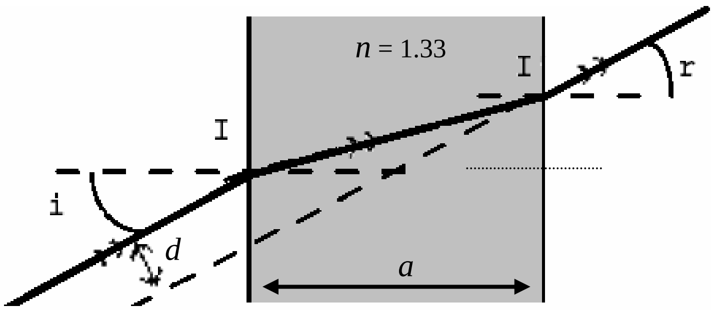
**<u>Exercice 3:</u> Réflexion totale**




Pour se cacher des prédateurs, une grenouille s'est accrochée sous un des nénuphars qui flotte sur l'étang. La grenouille a une hauteur *h* et le nénuphar un rayon *R* et une épaisseur très faible.

**a)** Quel doit être le rayon minimal $R_0$ du nénuphar pour que les pieds de la grenouille ne soient pas visibles par un prédateur situé en-dehors de l'eau ?
**b)** On suppose $R < R_0$. Montrer que les rayons diffusés par les pieds de la grenouille et sortant de l'eau ont une inclinaison dans l'air comprise entre deux valeurs que vous calculerez.
*Données :* Indice de l'eau n = 1.33 , R = 10cm et h = 10 cm.
*Indice :* Comme la grenouille, pensez à la réflexion totale.

**<u>Exercice 4 :</u>** Un rayon lumineux traverse une vitre d'épaisseur *a* et d'indice *n* =1.33 sous une incidence $i_1$. Montrez que le rayon sort parallèle au rayon incident. Calculez le déplacement *d* de ce rayon.
*Données :* $i_1 = 45°$, $a = 5$ mm.



# Réponses au Quizz

1. **A quel siècle Descartes a-t-il vécu ? A quel domaine de L'optique s'est-il intéressé ?**

*Descartes a vécu au 17ème siècle et a contribué au développement de l'optique géométrique*

2. **Citez les grandeurs caractéristiques d'une onde sinusoïdale ? Par quelle(s) relation(s) sont-elles reliées ?**

*Je citerais la fréquence $\nu$ et la longueur d'onde dans le vide $\lambda_0$. On sait d'ailleurs que $\lambda_0 = c/\nu$*

3. **A quel domaine de longueurs d'onde correspond la lumière visible ? Quelle est la longueur d'onde typique du rouge ?**

*Le visible correspond à peu près à $\lambda_0$ compris entre 400 et 800 nm. Le rouge s'étend d'environ 620 à 800 nm soit un moyenne vers $\lambda_R$ =700nm.*

4. **Définir l'indice d'un milieu**

*L'indice n d'un milieu est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur sa vitesse dans le milieu matériel .*

$$\boxed{n = \frac{c}{vitesse}}$$

5. **Rappelez les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction d'un rayon lumineux**

*Réflexion : le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence et l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :* $\boxed{r = i_1}$

*Réfraction : Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence et l'angle de réfraction $i_2$ est lié à l'angle d'incidence par $i_1$ la relation :* $\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}$

6. **Entourez la ou les bonnes propositions**

**a.** L'approximation que la lumière se propage en ligne droite est valable dans :

*1. Les milieux isotropes, transparents et homogènes* *2. Les milieux homogènes, absorbants et isotropes*
*3. L'air* *4. L'eau* *5. Tous les milieux*

**b.** Dans un milieu matériel :

*1. La fréquence est augmentée* *2. La fréquence est diminuée* *3. La fréquence est identique*
*4. La vitesse de la lumière augmente* *5. La vitesse de la lumière diminue*
*6. La vitesse de la lumière reste la même*

**c.** La réflexion totale peut se produire lors du passage d'un milieu d'indice $n_1$ vers un milieu d'indice $n_2$ :

*1. Si $n_1 > n_2$ et pour des angles d'incidence faibles*
*2. Si $n_1 < n_2$ et pour des angles d'incidence faibles*
*3. Si $n_1 > n_2$ et pour des angles d'incidence importants*
*4. Si $n_1 < n_2$ et pour des angles d'incidence importants*

**d.** Lors de la réfraction sur un dioptre air/eau, un rayon venant de l'air :

1. *Se rapproche de la normale dans l'eau*
2. *S'écarte de la normale dans l'eau*
3. *N'est jamais réfléchi, même partiellement*

**e.** La lumière se déplace plus vite dans l'eau que dans :

1. Le vide 2. L'air 3. Le verre

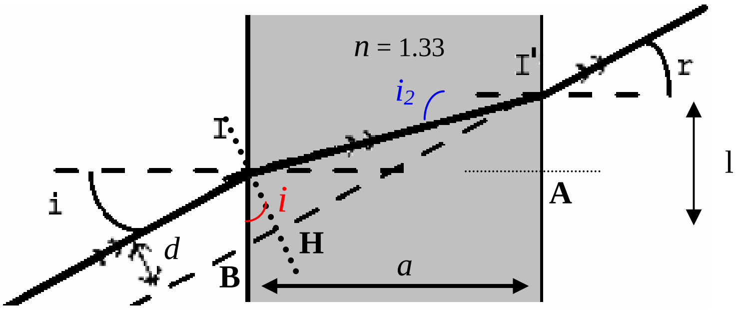
**Réponse Exercice 1 :** a) 2m, b) 1.5 m – 2.5 m c) 2(D-x) avec D = distance initiale entre l'objet et le miroir et x compté algébriquement.

**Réponse Exercice 2 :** Angle pour les rayons violets : 68.6°
Angle pour les rayons rouges : 66 °

**Réponse Exercice 3 :** a) 11.4 cm b) entre 90 et 70.1 degrés (comptés à partir de la normale, comme d'habitude)

**Réponse Exercice 4 :** Un rayon lumineux traverse une vitre d'épaisseur *a* et d'indice *n* =1.33 sous une incidence $i_1$. Montrez que le rayon sort parallèle au rayon incident. Calculez le déplacement *d* de ce rayon.

*Données : $i_1 = 45°$, c*




*Rappelons la loi de Descartes pour la réfraction aux deux interfaces : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ et*
*$n_2 \sin i_2 = n_3 \sin i_3$ soit ici avec $i_1 = i$, $i_3 = r$, $n_1 = n_3 = 1$ et $n_2 = n$ ;*
*$\sin i = n.\sin i_2 = \sin r$, donc $i = r$ et le rayon sort parallèle au rayon incident.*

*Le triangle IHB est rectangle d'où $d = IH = IB.\cos i$*
*D'autre part, $l = I'A + IB = a.\tan i$*
*et $I'A = a.\tan i_2$*
*Donc*

$$\boxed{d = a.(\sin i - \cos i.\tan i_2)}$$

*où*

$$\boxed{d = a.\sin i.(1 - \frac{1}{n}.\frac{\cos i}{\cos i_2})}$$

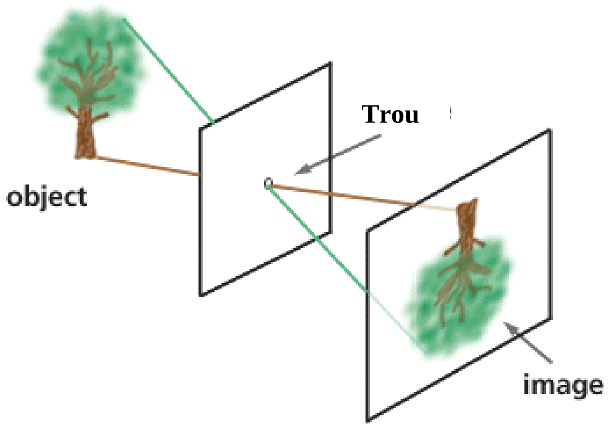
*On trouve* $i_2 = 32°$ *et* $d = 1{,}32$ *mm*

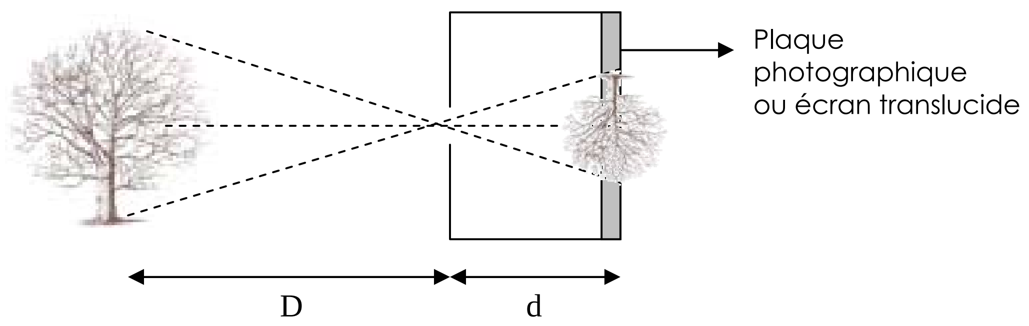
# Séance n° 1
# Notions de base - Lentilles

## I. Notion d'objet et d'image en optique géométrique

### I.1. Le sténopé (ou chambre noire)

C'est l'ancêtre de la photographie. Il s'agit d'un procédé très simple pour former sur un écran translucide (papier calque) ou sur une plaque photographique une image inversée d'un objet. Il consiste à prendre une boîte hermétique à la lumière (chambre noire, une boîte à chaussures convient), à percer un petit trou sur un côté, et à remplacer le côté opposé au trou par un écran translucide.
Parmi tous les rayons émis (dans toutes les directions) par un point de l'objet lorsque cet objet est éclairé par une source de lumière (par exemple, l'extrémité d'une feuille éclairée par le soleil), seul « un » rayon[1] traverse le trou et vient frapper l'écran. Puisque chaque rayon porte une information sur l'objet d'où il est issu (rayon intense si l'objet réfléchit beaucoup la lumière, rayon vert si l'objet est vert, etc.), on reconstitue point par point cette information sur l'écran.



Cette technique était couramment utilisée au 17ème siècle par les peintres, qui se servaient de l'image projetée comme d'un guide pour peindre par-dessus (Vermeer en particulier l'a abondamment exploitée). On raconte que Leonard de Vinci en aurait aussi eu connaissance, et même qu'Aristote l'utilisait pour observer les éclipses du soleil.

Inconvénients :

La limitation principale d'un tel appareil est liée à la taille du trou : s'il est grand, chaque point de l'objet fournit un cône de lumière susceptible de passer dans le trou, donc l'image est constituée de taches plutôt que de points : la résolution est mauvaise. *A contrario* si le trou est très petit très peu de lumière passe. Si le fond de la chambre est une pellicule photo, il faudra poser longtemps avant d'avoir une image nette, ce qui interdit de prendre en photo des objets en mouvement par exemple.

**Exercice :**

a) Y a-t-il une distance particulière à respecter entre le trou et l'écran ?
b) L'image est-elle plus nette quand l'écran est placé près du trou ou loin du trou ?
c) Donner l'expression de la taille de l'image en fonction de la taille de l'objet h, de la distance objet-trou L, et de la distance trou-image d.
d) si le trou est TROP GRAND (en pratique quelques mm), que se passe-t-il ? (faire un dessin)
e) si le trou est trop petit (par exemple de l'ordre de la dizaine de microns ou moins), en dehors du fait que la quantité de lumière récoltée sera trop faible, quel phénomène physique rencontre-t-on, qui serait susceptible d'altérer l'image ?

Remarque : de nos jours, on utilise encore ce procédé pour prendre des photos du soleil (car la quantité de lumière reçue n'est pas franchement un problème !), en particulier lors d'événements exceptionnels comme des éclipses.

### I.2. Instrument d'optique (ou système optique) et image

Comment faire pour créer des images plus lumineuses qu'avec un sténopé ? Il suffit qu'au lieu de récolter un seul rayon, on en récolte plusieurs.
Mais pour cela, agrandir le trou ne servirait à rien puisqu'on n'obtiendrait pour chaque point de l'objet qu'une grosse tache floue sur l'écran.

Il faudrait donc réussir à fabriquer un composant spécial qui aurait la propriété illustrée à la figure ci-dessous : il faudrait que *tout rayon issu de A et parvenant à rentrer dans l'instrument soit dévié du bon angle pour aller vers le point A'*. Pour que l'instrument soit vraiment utile, il faut naturellement qu'il ait cette propriété pour les autres points de l'objet, comme le point B.

Si l'on parvient à fabriquer un tel instrument (pour l'instant on ne dit pas comment on s'y prend), on voit que **tout rayon issu du point objet A passe par le point image A' après traversée de l'instrument.**
On dit dans ce cas que **A' est l'image de A par l'instrument d'optique.**

[1] Le « rayon lumineux » est une abstraction, une ligne imaginaire ; par conséquent quand on dit « un rayon » c'est une façon de parler, il serait peut-être plus prudent de dire « un faisceau » ou un « pinceau » très mince.

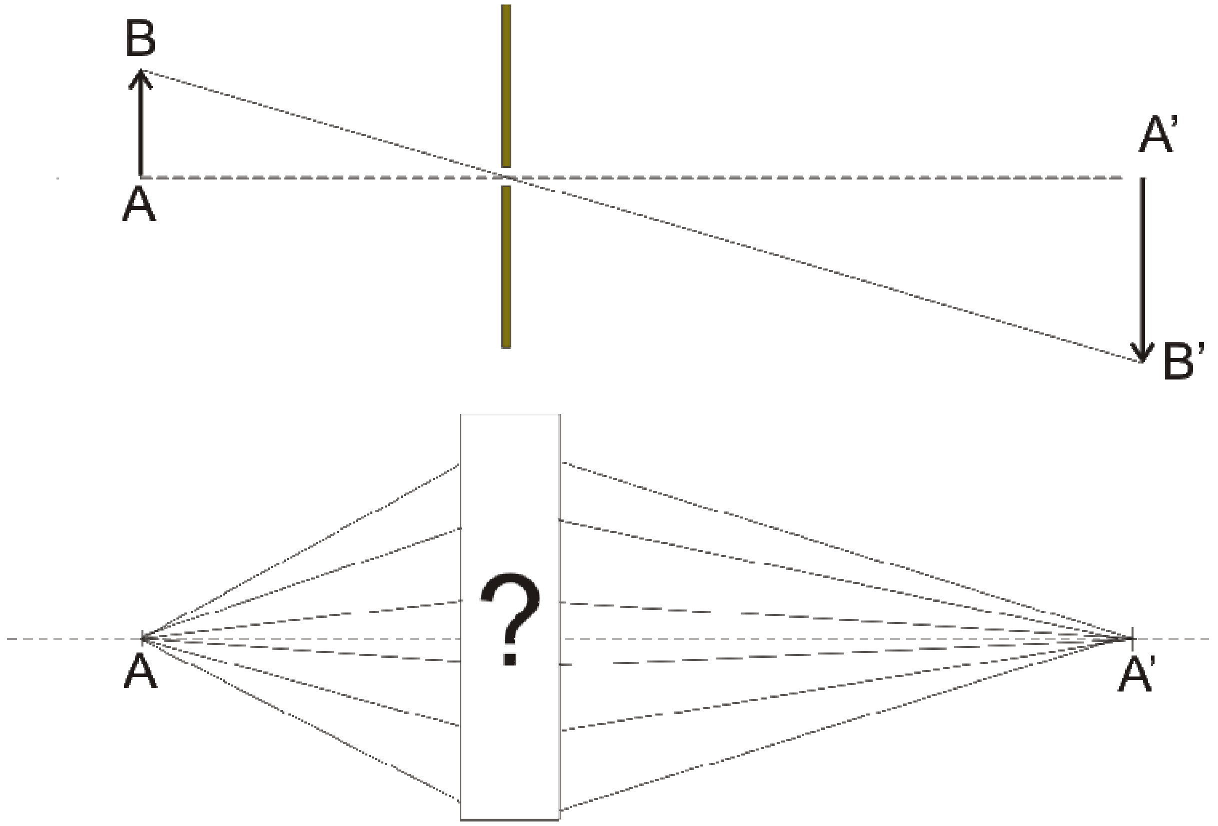
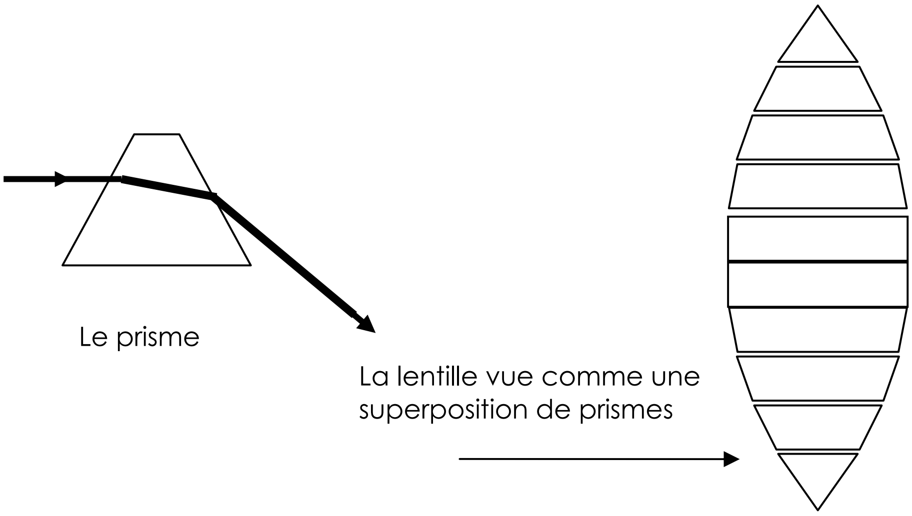



***Schéma d'un sténopé (en haut) et d'un instrument d'optique (en bas)*** *: dans un sténopé un très faible nombre de rayons (à la limite « un seul ») contribue à former l'image, alors que dans le second cas il y en a de nombreux. On n'a pas représenté l'image de B par l'instrument d'optique pour ne pas alourdir le dessin. Conséquence : l'image est beaucoup plus lumineuse avec l'instrument d'optique. On notera également que du coup, la position de l'image est imposée : si on place l'écran ailleurs qu'en A', on a une tâche floue ! L'utilisation d'un instrument d'optique implique donc une mise au point, qui n'était pas nécessaire avec le sténopé.*

Cet instrument existe-t'il ? La réponse est « oui, sous certaines conditions ».
En combinant deux dioptres de forme sphérique, on réalise une « lentille » qui est capable, sous certaines conditions, de réaliser l'instrument ci-dessus.

On peut expliquer la convergence des rayons par une analogie avec le prisme :
Une lentille est équivalente à plusieurs prismes d'angles de plus en plus importants superposés.



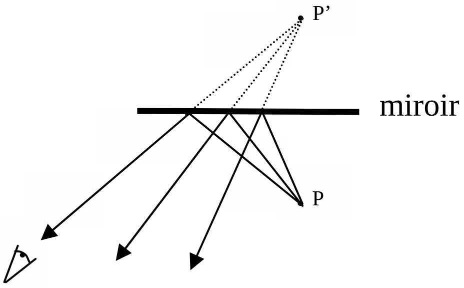

## II. Quelques définitions

- On dit qu'il y a **STIGMATISME** rigoureux lorsque tout rayon émis par un point objet A, passe après avoir traversé un système optique par un point image A' unique. Un système optique ayant cette propriété est dit stigmatique.

- **Image réelle** : Lorsque tout rayon issu d'un point A passe réellement par un point A' après traversée d'un système optique, on dit que A' est une image réelle. C'est le cas représenté à la figure précédente avec une lentille. Lorsque l'image est réelle, il faut en général mettre un écran pour la voir. L'image est dite « nette » lorsque tous les rayons issus d'un point objet A convergent en un point image A' *sur l'écran*. Sinon, l'image est « floue ».

- **Image virtuelle** : Lorsque tout rayon issu d'un point A *SEMBLE* venir d'un point A' après traversée d'un système optique, on dit que A' est une image VIRTUELLE. C'est le cas représenté ci-dessous avec un miroir (le système optique ici est le miroir : la « traversée » du système optique est à prendre au sens large : ici c'est la réflexion sur le miroir).

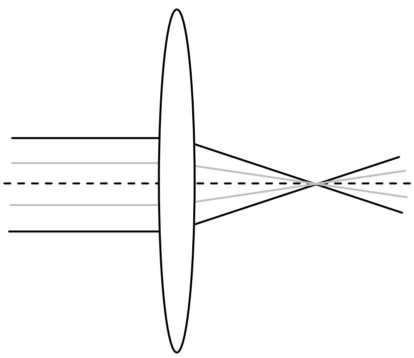
**Pour un œil qui regarde dans un miroir, tout se passe comme si les rayons issus de P venaient d'un point fictif P' qui est le symétrique de P par rapport au miroir**.
L'œil (et le cerveau) étant conditionné à la propagation rectiligne de la lumière, il « croit » voir un objet en P', en tous points identiques à P. *Ce n'est donc pas parce qu'une image est virtuelle que notre œil ne peut pas la voir.* Si on place un écran en P ', bien sûr, il ne se passe rien car la lumière ne franchit jamais le miroir !



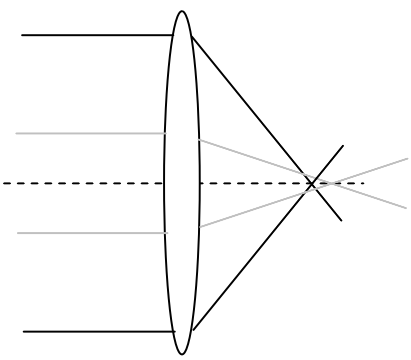

- Soit un système optique possédant un axe de symétrie $\Delta$ appelé **axe optique**. Il y a **APLANETISME** si pour tout objet *AB* plan et perpendiculaire à $\Delta$, son image *A'B'* est plane et perpendiculaire à $\Delta$. Les systèmes optiques habituels sont aplanétiques : c'est pour cela que les écrans de cinéma projettent sur un écran plat l'image d'une pellicule plane.

Un **système est centré** s'il admet un axe de symétrie de révolution. Cet axe de symétrie est l'axe optique du système centré. Un rayon arrivant suivant l'axe optique n'est pas dévié.

- Pour un système centré réel, afin de vérifier les conditions de stigmatisme et d'aplanétisme (approchées), il faut se placer dans les **CONDITIONS DE GAUSS** : rayons lumineux peu inclinés par rapport à l'axe optique et peu écartés de cet axe.



Conditions de Gauss vérifiées



Conditions de Gauss NON vérifiées

**Note** : le phénomène de diffraction empêche de réaliser un stigmatisme totalement rigoureux : même avec un instrument d'optique parfait, sans aucun défaut, on ne peut jamais concentrer tous les rayons en un seul point. On obtient dans le meilleur des cas une tache dite « tache de diffraction ». Cela est dû au fait que le rayon lumineux, comme on l'a dit, n'est qu'une approximation. La lumière doit être considérée comme une onde pour comprendre ces problèmes. La diffraction limite la **résolution** de tous les instruments d'optique (appareils photo, caméras, télescopes…), c'est-à-dire la taille du plus petit objet dont on peut faire l'image.

# III.Introduction aux lentilles

## III.1. Définitions

### Lentille mince

Une **lentille** est dite **mince** lorsque son épaisseur est faible comparée au rayon de courbure de ses faces. Dans le cadre des conditions de GAUSS, les lentilles minces sphériques réalisent un stigmatisme et un aplanétisme approchés.

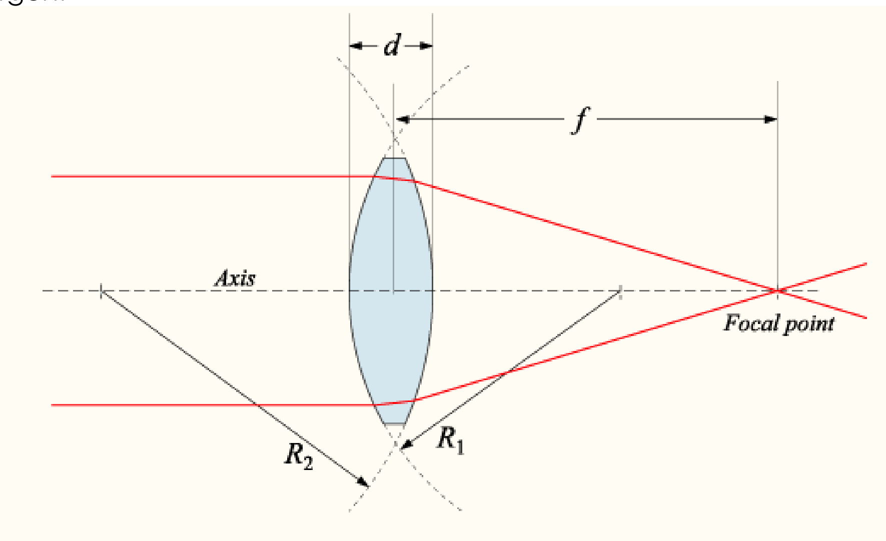
### Centre optique

On désigne par **centre optique** le point de l'axe optique appartenant à la lentille : c'est l'axe passant par les deux centres des dioptres sphériques formant la lentille. On le note O.

### III.2. Types de lentilles

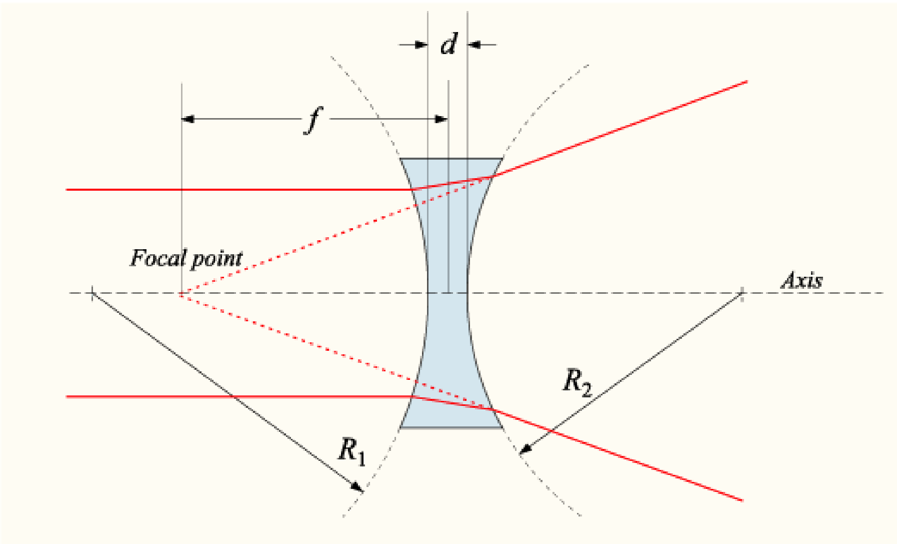
On distingue deux types de lentilles :

- les lentilles à bords minces (**convergentes**) : le faisceau lumineux les traversant devient plus convergent

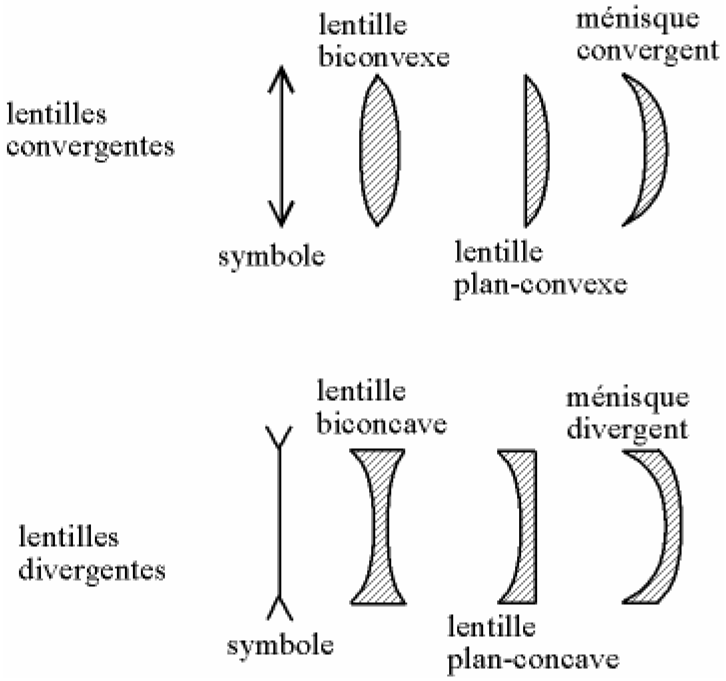



Positive (converging) lens

- les lentilles à bords épais (**divergentes**) : le faisceau lumineux les traversant devient plus divergent




Negative (diverging) lens


lentille
biconvexe
ménisque
convergent
lentilles
convergentes
symbole
lentille
plan-convexe
lentille
biconcave
ménisque
divergent
lentilles
divergentes
symbole
lentille
plan-concave

# Séance n° 2
# Notions de distance focale - Constructions

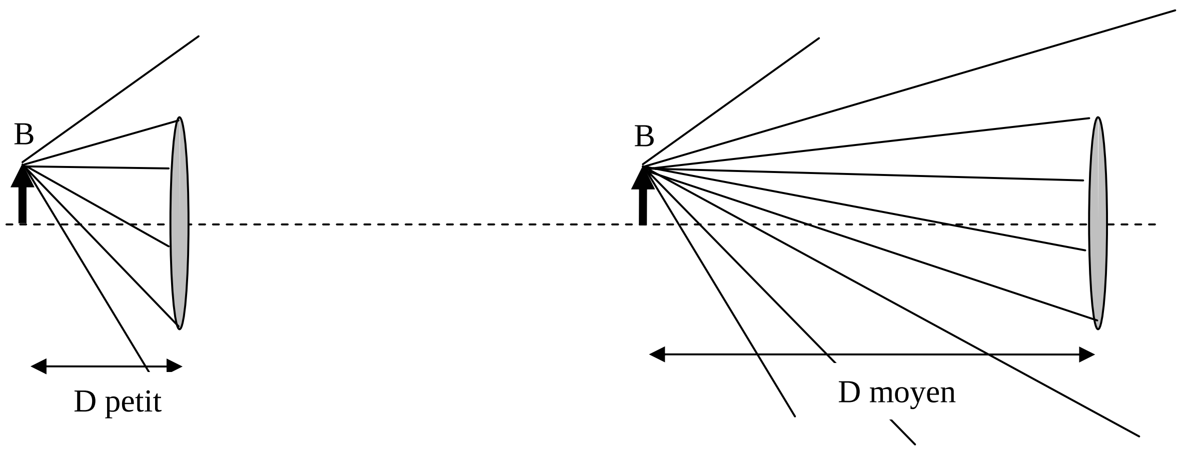
## I. Notion de distance focale

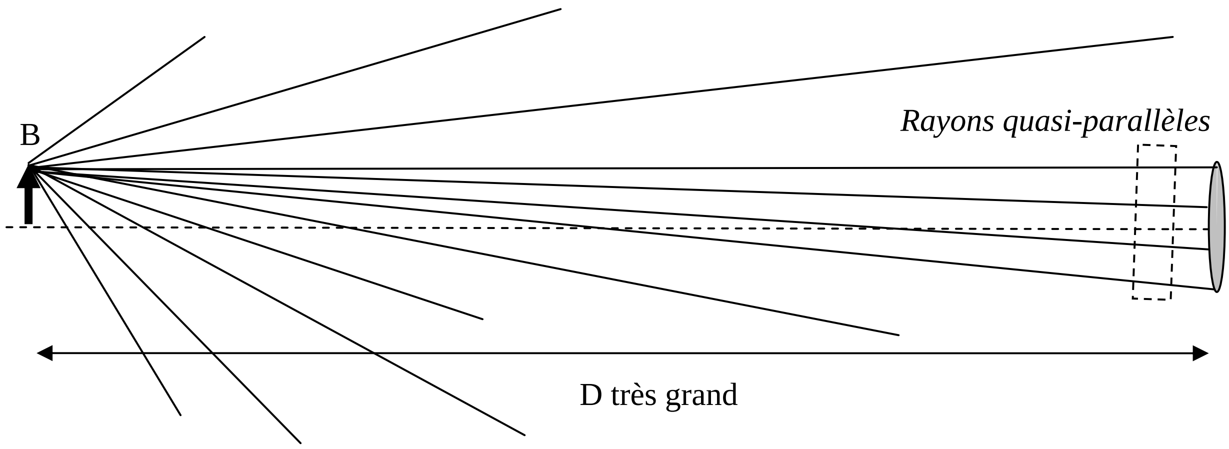
*<u>Qu'est ce que l'infini en optique géométrique ?</u>*

On parlera souvent d'objet ou d'image « à l'infini ». Que signifie ce terme ?
Voyons ce qui se passe quand un objet est situé à une distance D de la lentille (voir aussi schéma ci-dessous).

- Si D est petit, les rayons issus d'un point de l'objet (appelé B sur le schéma) arrivent sur la lentille avec des angles très différents.
- Si D augmente (l'objet s'éloigne), les rayons issus de B qui arrivent sur la lentille ont des angles qui deviennent comparables les uns aux autres.
- Si D est très grand, les rayons issus de B qui arrivent sur la lentille sont presque parallèles ! (Ils font tous le même angle avec l'axe optique). On dit alors que l'objet est **à l'infini** : en pratique, cela signifie qu'il est assez loin pour que les rayons provenant de cet objet soient quasi-parallèles lorsque ils atteignent la lentille.

Remarque : *<u>attention</u> ! Les rayons partant du point B sont toujours émis dans toutes les directions, quelque soit D ! Mais quand D est grand, seul quelques rayons atteignent la lentille, et sont alors parallèles entre eux. Les autres passent « à côté » de la lentille.*

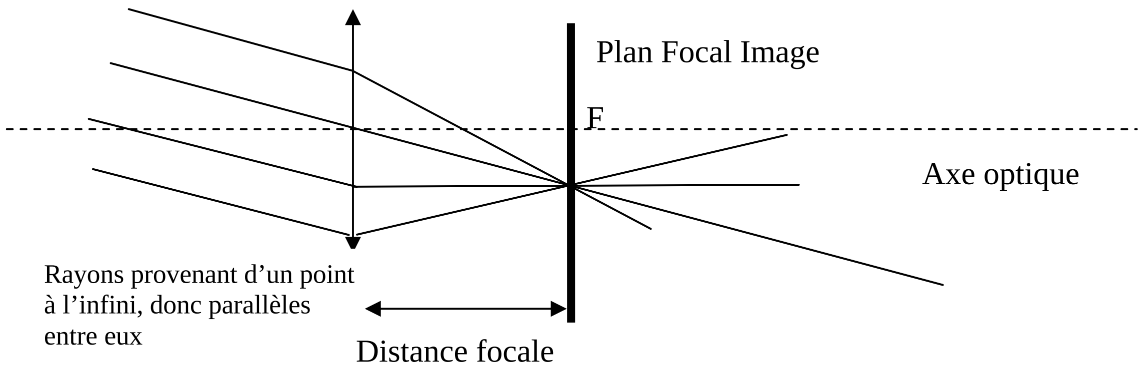





*Petite application numérique : Si on a une lentille de diamètre 4 cm, et un objet ponctuel (un point sur l'axe), à quelle distance de la lentille doit-on le placer pour qu'on puisse considérer qu'il est « à l'infini » ? Pour pouvoir répondre, il faut décider ce qu'on appelle « rayons parallèles » : on posera par exemple que deux rayons sont considérés comme parallèles s' ils font entre eux un angle inférieur à 0.01 radians (environ 0.5 degrés). On admettra que tan $\theta = \theta$ (valable pour les petits angles), et on fera attention à l'orientation des angles.*
*Réponse : 4 m*

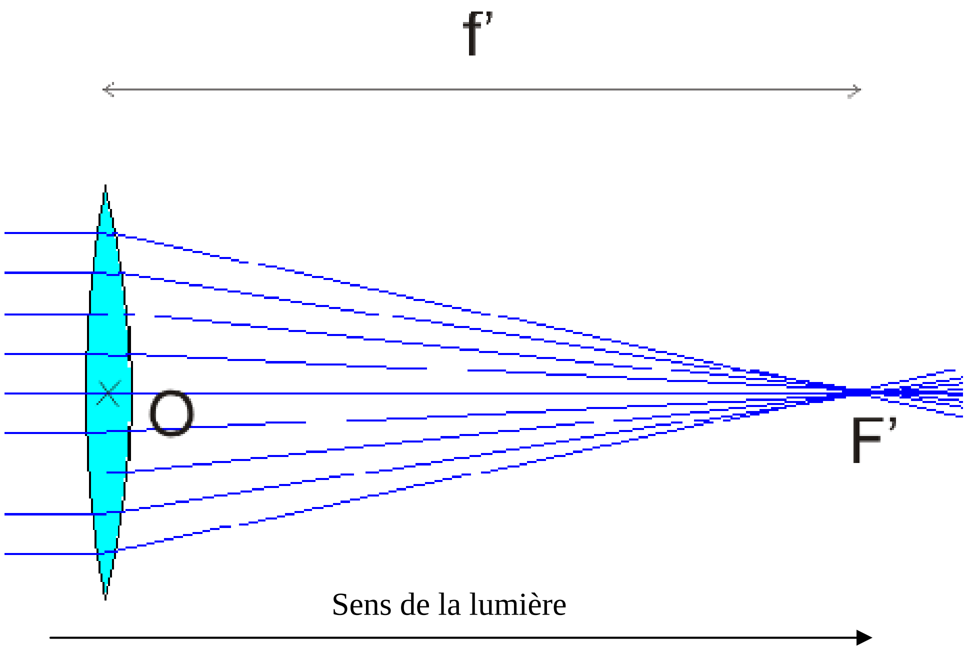
### I.1. Définition du Plan Focal Image

- Si l'on place un objet plan à une distance infinie (cf plus haut) d'une lentille mince convergente, celle-ci fournit une image réelle nette de cet objet dans le **plan appelé plan focal image** de la lentille. La distance entre le plan de la lentille et son plan focal est la **distance focale** f.

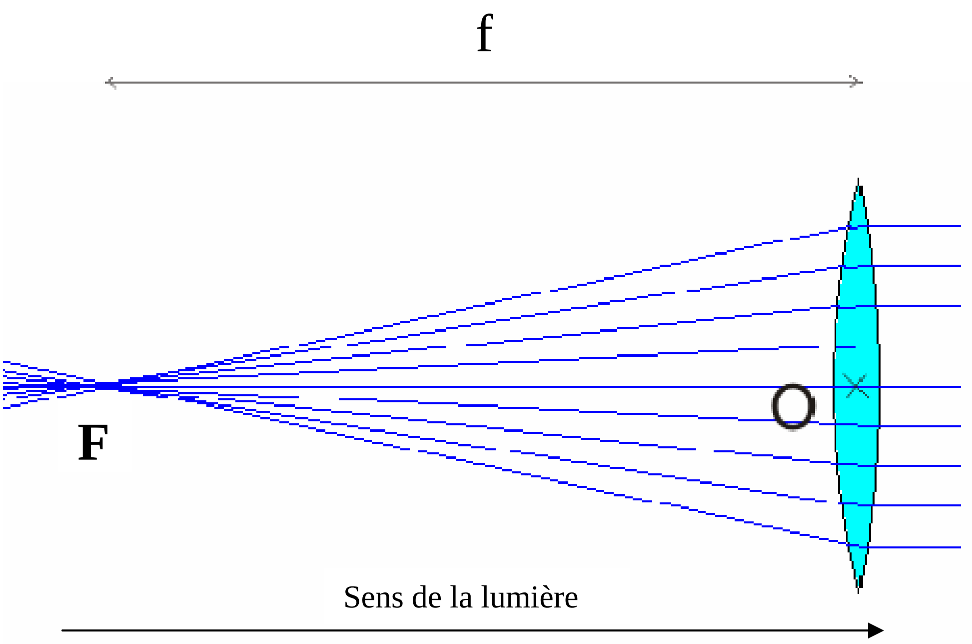



### I.2. Définition des Foyers Image et Objet

- On note F' le point de l'axe optique appartenant au Plan Focal Image : il correspond au point d'intersection des rayons arrivant sur la lentille parallèles entre eux et parallèles à l'axe optique. **F' est appelé le foyer image**.

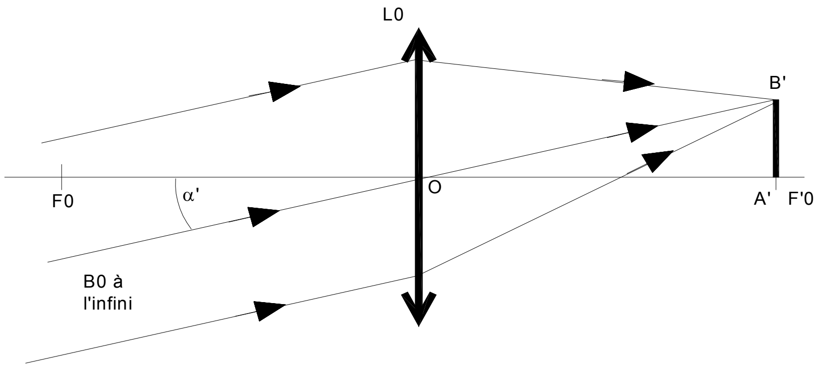



Le **Foyer Objet** est noté F : il est symétrique de F' par rapport à O. Tous les rayons issus de ce point et atteignant la lentille en ressortent parallèles entre eux et parallèles à l'axe optique.

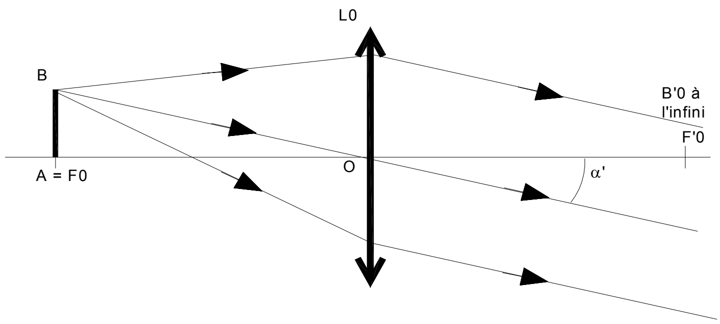



## I.3. Construction

Tous les rayons lumineux arrivant sur la lentille en étant **parallèles à une direction donnée (alpha)** convergent en un point du **plan focal image.** Ce point est donné par l'intersection du plan focal image avec la droite parallèle à la direction alpha et passant par le centre de la lentille.




- Suivant le principe du retour inverse de la lumière, on peut traiter objet et image de façon symétrique. Ainsi, une lentille mince convergente donne une **image à l'infini** (c'est-à-dire que les rayons sortant de la lentille sont parallèles entre eux) d'un objet situé dans son plan focal objet, situé également à la distance f de la lentille. Tous les rayons lumineux issus d'un point de l'objet sont alors parallèles à la sortie de la lentille.



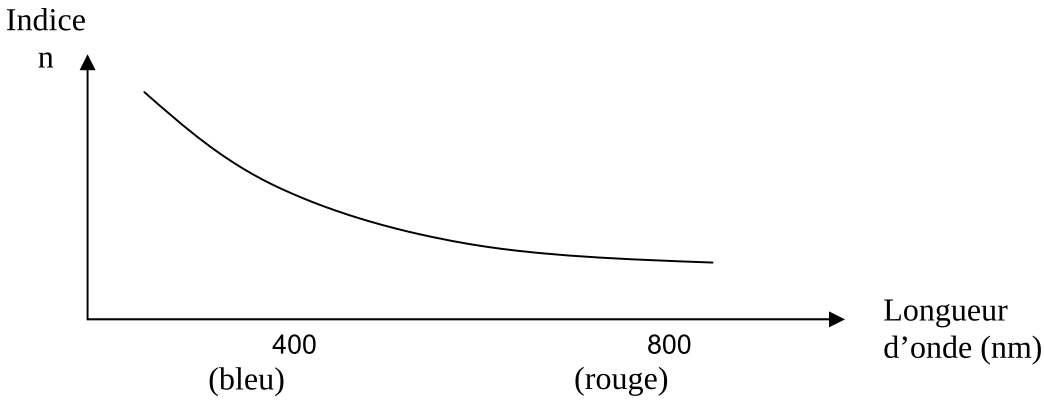

*Rappel* : L'intersection des plans focaux image et objet avec l'axe optique définissent respectivement le foyer principal image F' et le foyer principal objet F. Ainsi :

- Le foyer principal objet *F* est le point objet de l'axe dont l'image se trouve à l'infini.
- Le foyer principal image *F'* est l'image du point objet situé à l'infini sur l'axe optique.

Que la lentille soit convergente ou divergente, les foyers principaux objet *F* et image *F'* sont sur l'axe optique de la lentille, symétriques l'un de l'autre par rapport au centre optique *O*.

## I.4. Notion de chromatisme

On sait que dans un matériau quelconque (en particulier dans du verre), l'indice optique vu par un rayonnement dépend de la longueur d'onde de ce rayonnement. Pour les matériaux usuels et les longueurs d'ondes visibles l'indice varie qualitativement de la façon suivante :

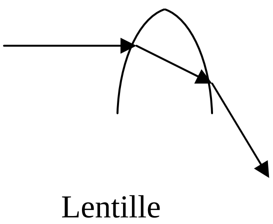


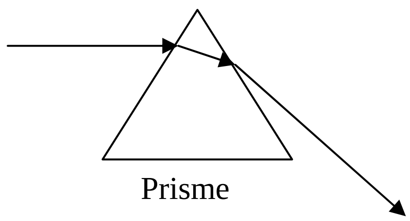

<u>Remarque</u> : La forme générale la plus simple de la variation de l'indice avec la longueur d'onde est une loi empirique connue sous le nom de « loi de Cauchy » :

$$n(\lambda) = A + B / \lambda^2$$

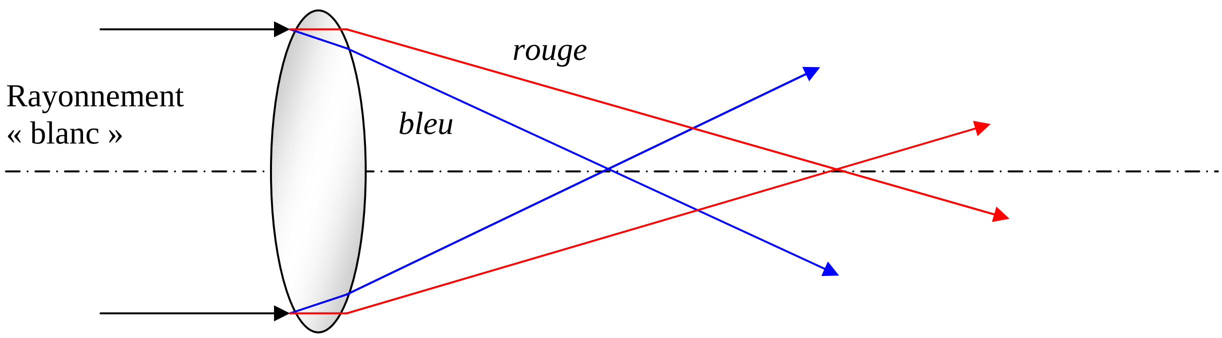
avec A et B des paramètres différents suivant les matériaux et $\lambda$ en µm.
Il existes des modèles plus précis (mais toujours empiriques) faisant intervenir des ordre supérieurs de la longueur d'onde ($\lambda^3$, $\lambda^4$..) : on les appelle « loi de Sellmeier »

C'est la réfraction qui gouverne le fonctionnement des lentilles : les rayons sont réfractés deux fois, d'abord à l'interface air - verre puis après propagation dans le verre à l'interface verre - air. La loi de la réfraction, ou loi de Snell-Descartes, faisant intervenir l'indice du matériau, on sent bien que les rayons seront déviés différemment si l'indice qu'ils voient est différent.



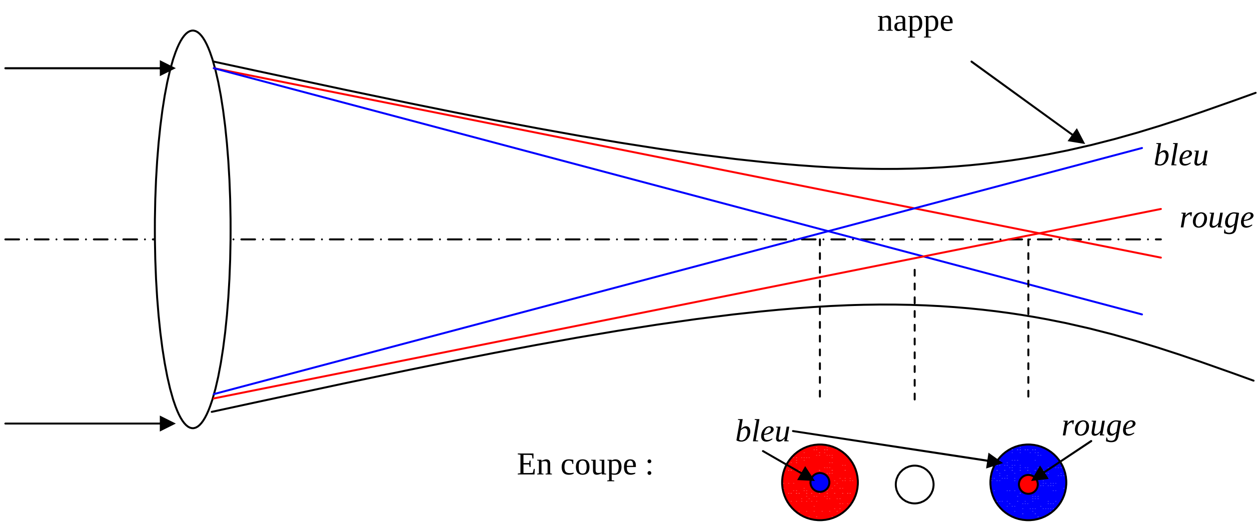




On a vu que l'extrémité d'une lentille d'épaisseur non nulle ressemble à s'y méprendre à un prisme (cf. figure) : par conséquent, de la même façon, les rayons « bleus » sont plus déviés que les « rouges » :



Donc comme n (bleu) > n (rouge), il vient f' (bleu) < f' (rouge)
Les rayons bleus se focalisent plus près de la lentille que les rayons rouges.

Il n' y a donc pas un foyer mais bien un par longueur d'onde. Bien sûr le dessin ci-dessus est très exagéré et les foyers « bleu » et « rouge » sont en fait très proches.
Si on utilise un faisceau monochromatique (i.e. ne contenant qu'une seule longueur d'onde, par exemple un laser), on ne voit évidemment pas apparaître ce phénomène. Par contre, en lumière « blanche », on constate que le faisceau forme une « nappe » aux alentours du point de focalisation théorique : il n'existe pas de « point » de focalisation, mais seulement un diamètre minimal de la nappe.




Remarque : l'aberration chromatique n'existe par définition pas pour les miroirs – puisqu' aucune matière n'est traversée - d'où l'intérêt d'utiliser pour les télescopes des systèmes à miroirs plutôt qu'à lentilles (de plus les miroirs présentent moins de pertes que les lentilles).

Correction de l'aberration chromatique

Pour les systèmes oculaires, il n'est pas indispensable d'effectuer cette correction car l'œil (ou plutôt le cerveau) la fait lui-même. Pour les autres systèmes imageurs, on peut corriger cette aberration en accolant à la lentille une autre lentille qui va compenser le chromatisme de la première. En particulier, le chromatisme d'une lentille divergente étant de sens opposé à celui d'une lentille convergente, on peut obtenir en accolant les deux un système achromatique.

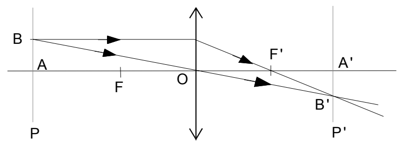
## II. Construction d'une image

Dans l'approximation de Gauss, à tout objet *AB* perpendiculaire à l'axe optique correspond une image *A'B'* perpendiculaire à cet axe. Les plans de *AB* et *A'B'* sont dits plans conjugués. La construction d'une image peut être réalisée géométriquement en utilisant les points *O*, *F* et *F'*, et deux des trois rayons issus de *B* dont on connaît la propagation à travers la lentille :

- **1. Un rayon incident passant par *O* n'est pas dévié,**
- **2. Un rayon incident passant par *F* ressort parallèle à l'axe optique,**
- **3. Un rayon incident parallèle à l'axe optique donne un faisceau émergeant qui passe par le foyer *F'*.**

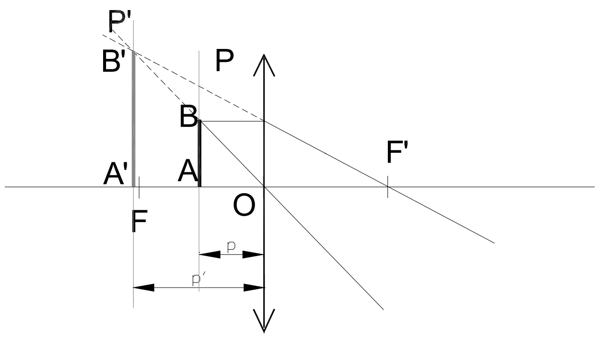
**La connaissance de ces 3 lois de construction simples permet de tracer n'importe quel rayon, et de construire n'importe quelle image, même à travers un système complexe de plusieurs lentilles ! Il est <u>indispensable</u> de bien maîtriser ces constructions.**

L'intersection de deux de ces rayons donne la position du point image *B'* correspondant, comme dans la figure ci dessous :

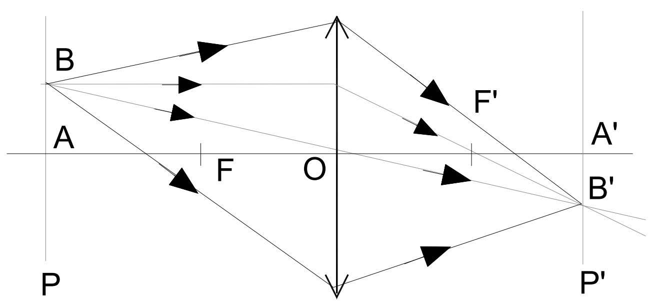



**Attention :** il ne s'agit là que d'une technique de construction géométrique de l'image, en réalité **<u>tous</u>** les rayons issus de B et traversant la lentille convergent au point B'.

Si le plan P de l'objet se trouve entre F et O, l'image sera **virtuelle**, agrandie et du côté de l'objet :




En utilisant la construction ci-dessous, on voit aisément que **l'objet et son image se déplacent dans le même sens**. Si AO diminue, OA' augmente, A'B' s'éloigne de F' et grandit. Si AO augmente, OA' diminue, A'B' se rapproche de F' et diminue.



**Exercice**

Construire l'image d'un objet réel situé à une distance égale à 2f de la lentille. Donner les caractéristiques de l'image obtenue.

Idem pour un objet virtuel situé à une distance égale à f/2 de la lentille.

# III. Cas de la lentille divergente

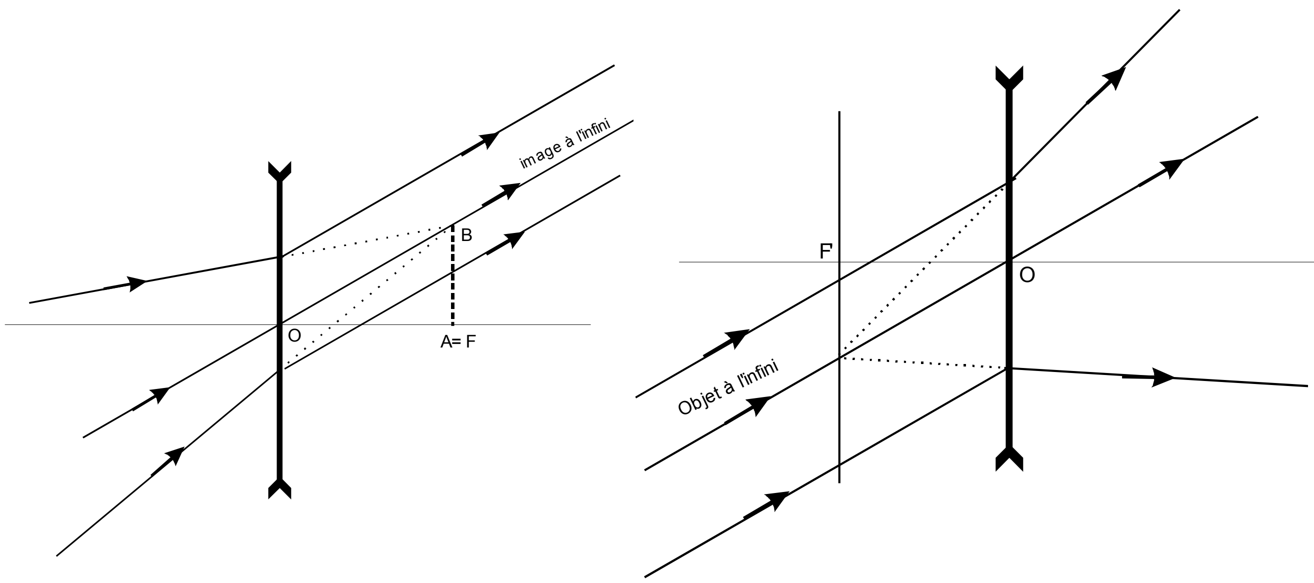
Par rapport à une lentille convergente, la position des foyers objets et image est inversée. On dit qu'une lentille divergente a une focale négative.

***Les règles de constructions sont exactement les mêmes que pour les lentilles convergentes, en inversant foyer objet et image (F et F')sur l'axe :***

- **1. Un rayon incident passant par *O* n'est pas dévié**
- **2. Un rayon incident passant par F ressort parallèle à l'axe optique**
- **3. Un rayon incident parallèle à l'axe optique donne un faisceau émergeant qui passe par le foyer *F'*.**

En pratique, pour effectuer ces constructions, il faudra souvent tracer **le prolongement** des rayons.

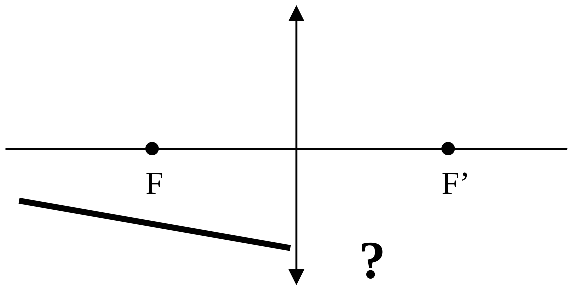
Dans le schéma ci-dessous, les rayons incidents dessinés viendraient sans lentille se rassembler au point B : on dit alors que l'objet AB est « virtuel » (on reverra ce point plus loin). Comme l'objet est dans le plan focal objet, l'image est à l'infini, c'est-à-dire que les rayons, après la lentille, sont parallèles entre eux.




Inversement, un ensemble de rayons parallèles incident est transformé après la lentille en un ensemble de rayons venant du même point, qui est l'intersection du plan focal image et du rayon passant par le centre optique. Après la lentille tout se passe comme si les rayons venaient de ce point.

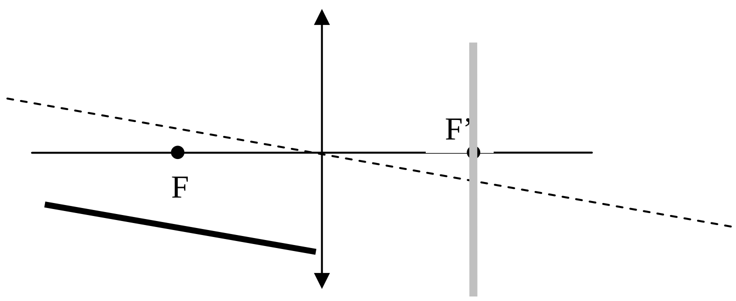
## Méthode pour tracer le prolongement de n'importe quel rayon

Nous savons tracer les trajectoires de 3 rayons particuliers : passant par le centre, par les foyers et parallèles à l'axe optique.
Soit maintenant un rayon quelconque incident sur une lentille. Comment déterminer son cheminement dans l'espace objet (à droite de la lentille) ?

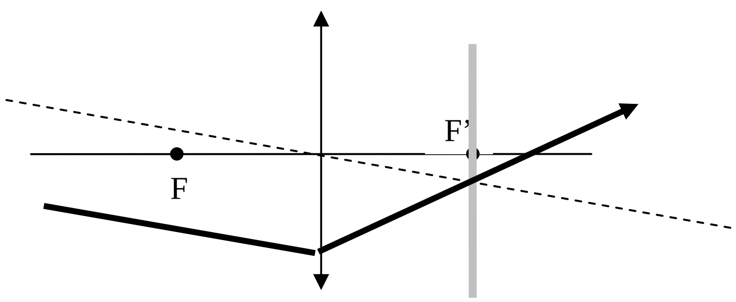



Il suffit d'utiliser les connaissances sur les trois types de rayons particuliers que nous avons déjà vu !

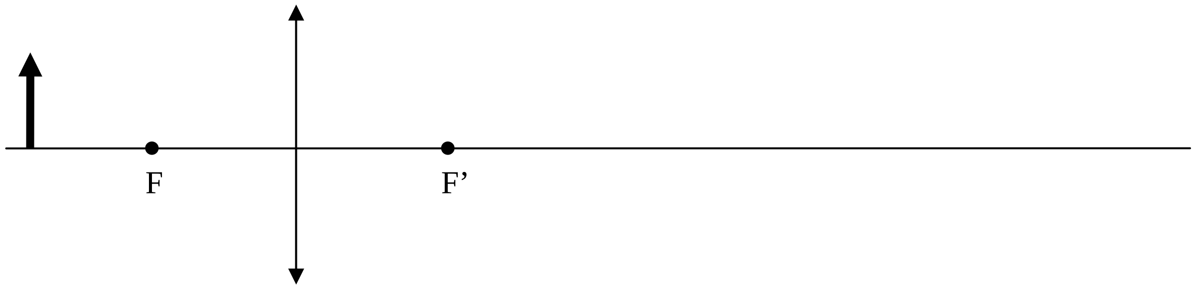
1) on trace un rayon « virtuel », parallèle au rayon réel, et passant par un point particulier (par exemple le centre, mais on pourrait aussi choisir un foyer – essayez à titre d'exercice) : il est représenté en pointillé.



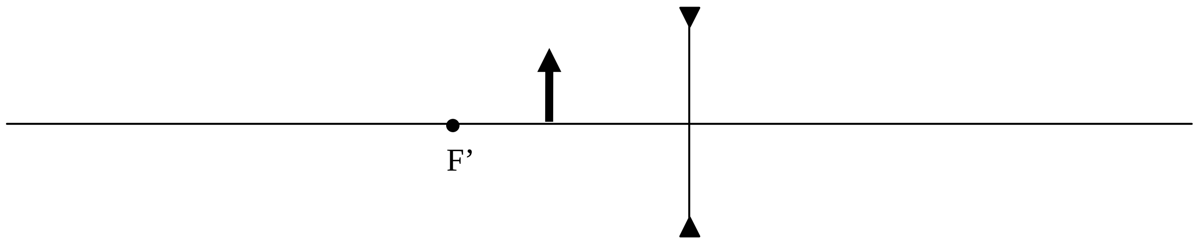

2) Comme ce rayon « virtuel » passe par le centre de la lentille, il n'est pas dévié (règle 1).
3) L'ensemble formé du rayon réel et du rayon virtuel forme un faisceau de rayons parallèles. On sait que dans ce cas l'image se forme dans le plan focal image (trait gris sur la figure)
4) Par conséquent, comme tous les rayons parallèles viennent se couper au même point, on peut tracer le prolongement du rayon réel : il va rejoindre l'intersection du plan focal image et du rayon « virtuel ».
5) On peut alors effacer le rayon « virtuel » qui n'a servi qu'à la construction.

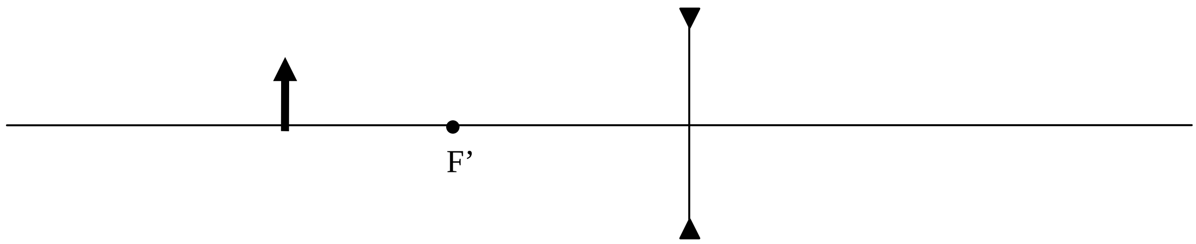


Exercice : tracez l'image de l'objet AB dans les cas suivants

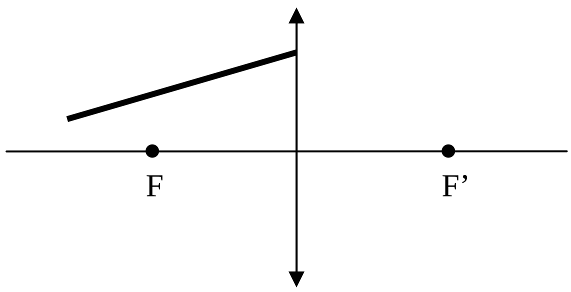


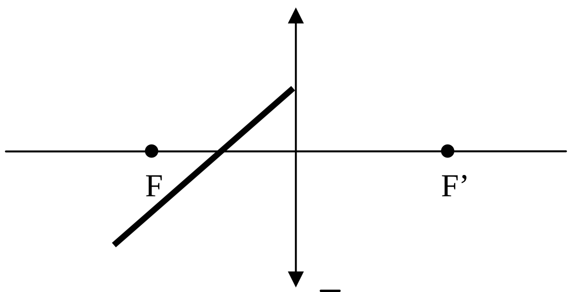


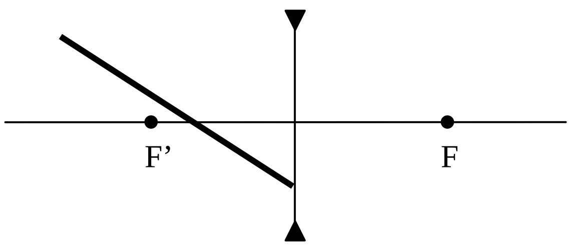


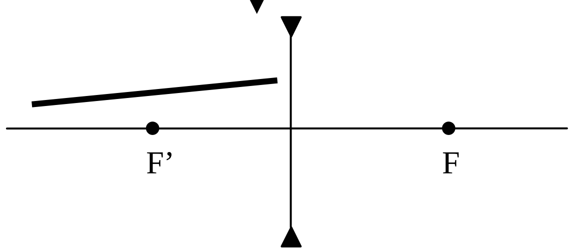




Exercice : tracez le prolongement des rayons (allant de gauche à droite)



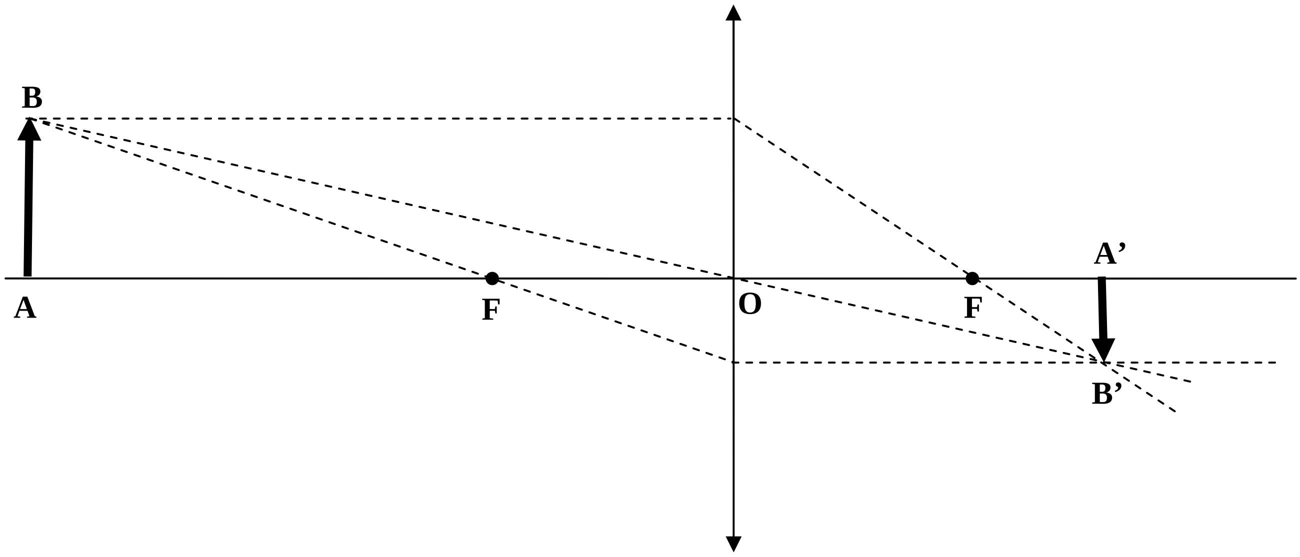



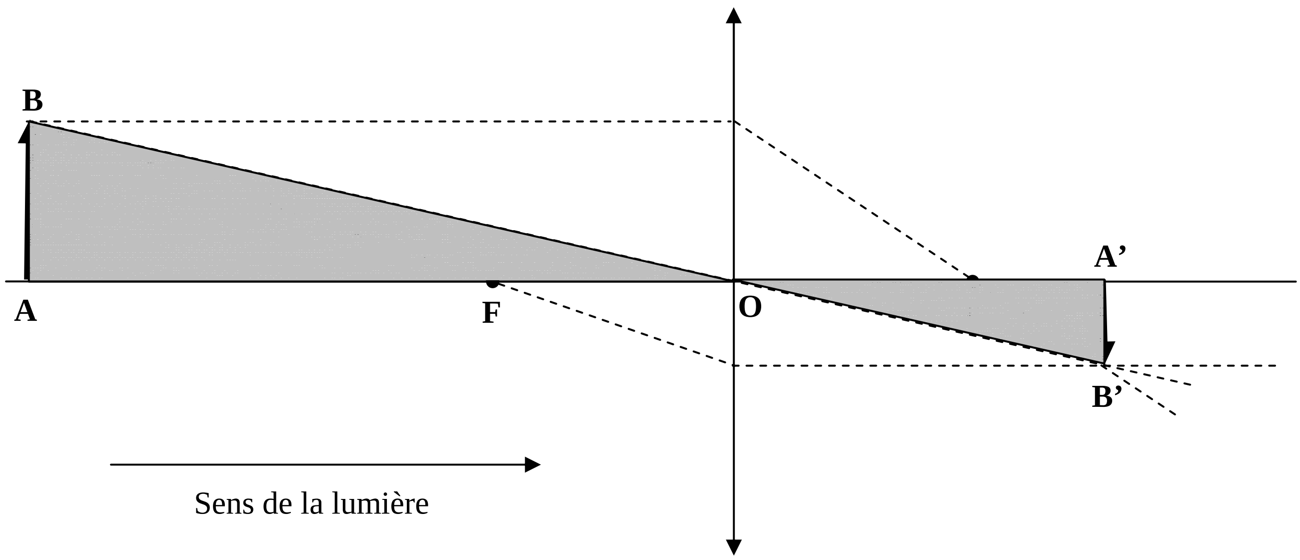



# Séance n° 3
# Formules de Conjugaison

Il est souvent (toujours) intéressant de contrôler le tracé des rayons par le calcul et vice-versa. Nous allons donc déterminer les formules algébriques permettant de connaître la taille et la position d'une image quand on connaît la taille et la position de l'objet et la focale de la lentille utilisée.




## I. Grandissement



On définit le grandissement comme le rapport entre la taille de l'image et la taille de l'objet. On remarque par construction (Théorème de Thales) que l'on a la relation importante :

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

**IMPORTANT : <u>Les valeurs algébriques</u>**

Les grandeurs reportées dans la formule du grandissement et dans toutes les suivantes sont dites « grandeurs algébriques » et sont notées avec un trait au-dessus. Cela signifie que les grandeurs correspondantes sont prises <u>avec leur signe : elles peuvent être positives ou négatives.</u>
Pour connaître ce signe, il suffit de **définir un sens** (on prendra toujours le sens de la lumière, de gauche à droite, sur toutes les figures – voir figure ci-dessus)) et de **compter les distances dans l'ordre de lecture des lettres.**

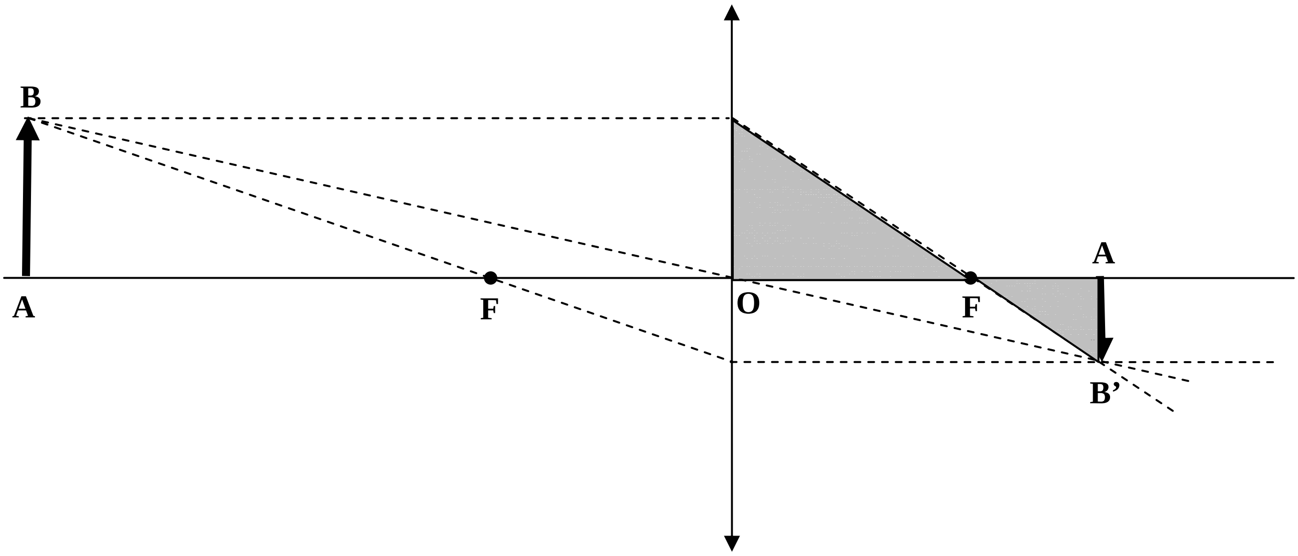
Par exemple :
$\overline{OA}$ est <u>négatif</u> car lorsqu'on va de O vers A, on est en sens inverse de la lumière
$\overline{OA'}$ est <u>positif</u> car lorsqu'on va de O vers A', on est va dans le même sens que la lumière
Pour les grandeurs perpendiculaires à l'axe optique, on définit le sens positif « vers le haut » et négatif « vers la bas » :
$\overline{A'B'}$ *ou* $\overline{BA}$ sont négatifs, car on va de A' à B' (ou de B à A) en allant « vers le bas »
$\overline{AB}$ est positif car on va de A à B « vers le haut »

En résumé, il faut être très vigilant :

1) <u>toujours faire un dessin</u>, même approximatif (c'est-à-dire pas forcement à l'échelle)
2) lire sur ce dessin les lettres <u>dans l'ordre</u> pour connaître le signe.

   *Exemple sur la formule du grandissement : quel est le signe de $\gamma$ ?*
   $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$ *or* $\overline{OA'}>0$ *et* $\overline{OA}<0$ *: on a donc* $\gamma < 0$*, ce qui est logique puisque l'image est inversée par rapport à l'objet (traduit par le signe « moins »)*

# II. Formules de conjugaison




Si l'on compte algébriquement les distances dans le sens de propagation de la lumière, on peut démontrer la formule de conjugaison ou formule de Descartes :

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

*démonstration* :

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'A'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{F'O}} \text{ (aires grisées) donc } \overline{F'O}\,(= -f) = \frac{\overline{AB}}{\overline{A'B'}}.\overline{F'A'} = \frac{\overline{F'A'}}{\text{grandissement } \gamma}$$

$$\text{Or } \overline{F'A'} = \overline{OA'} - \overline{OF'} = \overline{OA'} - f'$$

$$\text{Donc} : -f' = (\overline{OA'} - f').\frac{\overline{OA}}{\overline{OA'}}$$

$$\text{On en déduit } f'.(\overline{OA} - \overline{OA'}) = \overline{OA}.\overline{OA'}$$

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

<u>Cas de la lentille divergente</u> : c'est la même formule, mais *f'* est négatif.

## Exercice

*- Retrouvez la définition de la focale à l'aide de cette formule*

*- Pour quelle valeur de $\overline{OA}$ l'image est-elle réelle? Virtuelle?*

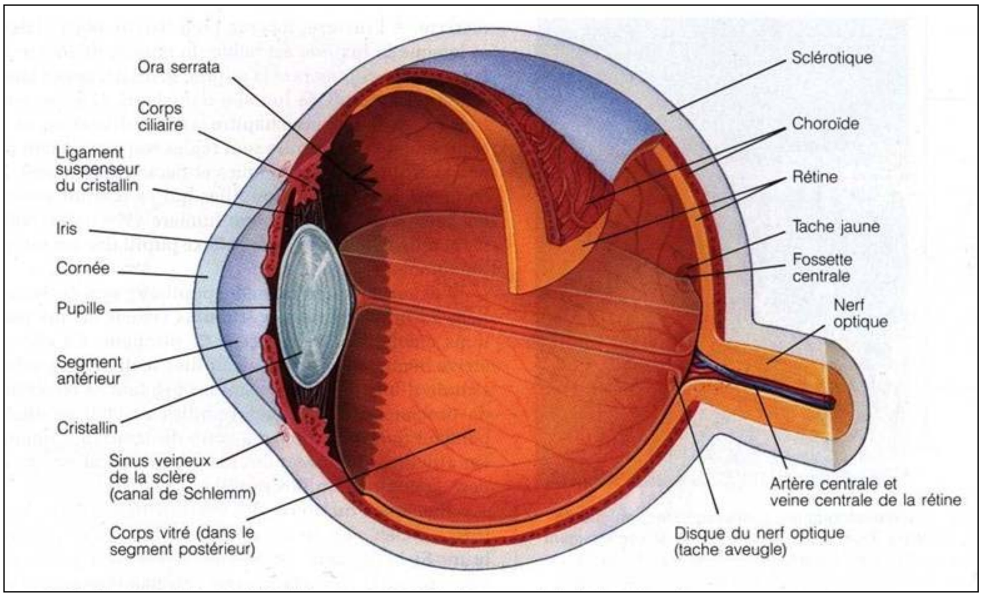
*- Pour quelle valeur de $\overline{OA}$ le grandissement d'une lentille convergente est-il plus grand que 1 en valeur absolue?*

# Séance n° 4
# L'œil et les instruments visuels

## I. Propriétés et défauts de l'œil

### I.1. Rappels sur l'œil

L'œil est un système complexe convergent permettant de former sur une membrane photosensible, **la rétine**, une image réelle renversée des objets vus par l'observateur (ou des images d'objets vus à travers un instrument d'optique). La rétine est tapissée de cellules sensibles à la lumière (**les cônes et les bâtonnets**) qui transmettent les informations au cerveau via le **nerf optique**. L'ensemble rétine-nerf optique code cette image sous forme d'influx nerveux et le transmet au cerveau qui l'interprète : retournement de l'image, correction de la distorsion, impression de relief grâce aux informations transmises par les deux yeux. Plus le nombre de cellules touchées par la lumière est grand, plus l'information transmise au cerveau est précise. L'œil n'est sensible qu'à certaines radiations du **spectre visible**, dont les longueurs d'onde sont comprises approximativement entre 0,4 et 0,7 $\mu$m. Sa sensibilité varie avec la longueur d'onde dans ce domaine (maximum de sensibilité à $\lambda$=0,557 $\mu$m). La pupille joue le rôle d'un diaphragme en limitant l'intensité lumineuse pénétrant dans l'œil.




En première approximation, nous assimilerons l'œil à un système optique composé d'une lentille mince convergente, le **cristallin,** et d'un écran, la **rétine**. La distance cristallin-rétine est constante (voisine de 1.5cm). Pour former l'image d'un objet, dont la position varie, à distance constante d'une lentille, il faut que la vergence (c'est-à-dire la distance focale, f=1/vergence) de celle-ci varie : c'est le phénomène d'**accommodation**. L'augmentation de la vergence de l'œil se fait par déformation du cristallin à l'aide des muscles qui l'entourent.

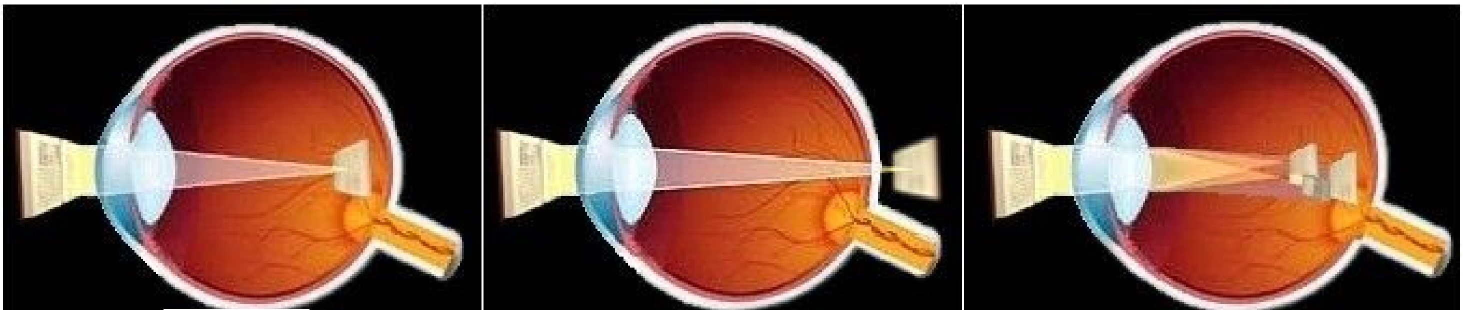
On appelle **Punctum Remotum (PR)**, le point le plus éloigné visible par l'œil sans accommodation. On appelle **Punctum Proximum (PP)**, le point le plus proche de l'œil pouvant être perçu nettement. L'œil à ce moment accommode et la vergence du cristallin est maximum. La distance du Punctum Proximum à l'œil s'appelle la **distance minimum de vision distincte ($d_m$)**.
Le Punctum Remotum et le Punctum Proximum varient avec l'œil de chaque observateur. Pour un œil normal, dit emmétrope, le Punctum Proximum est à 25 cm et le Punctum Remotum est à l'infini. La rétine est alors dans le plan focal de l'œil (cristallin non déformé). Pour une observation à l'infini, l'œil est au repos ce qui correspond à la situation la plus souhaitable pour le confort de l'observateur : il faudra donc toujours s'arranger pour former une image à l'infini quand on observera à travers un instrument.

### I.2. Défauts de l'œil

La myopie : le cristallin est trop convergent. Le *PP* est plus près que pour l'œil normal et le *PR* est à distance finie. La lentille correctrice est divergente.

L'hypermétropie : le cristallin n'est pas assez convergent. L'hypermétrope doit accommoder pour voir à l'infini, et son *PP* est plus éloigné que pour l'œil normal. La lentille correctrice est convergente.

L'astigmatisme : l'œil ne possède pas la symétrie de révolution. La lentille correctrice n'est pas sphérique.



Myopie Hypermétropie Astigmatisme

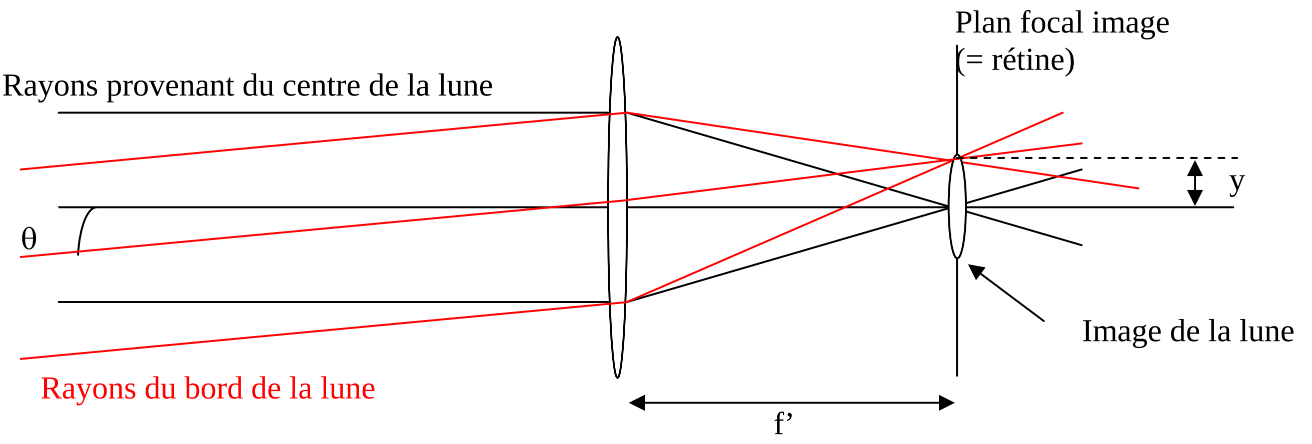
La presbytie : elle est liée au vieillissement de l'œil qui perd sa faculté d'accommodation : le cristallin se rigidifie un peu et ne peut plus se déformer autant sous l'action des muscles. On ne peut donc plus augmenter la vergence autant qu'avant : l'œil devient incapable de voir de près (autrement dit, le Punctum Proximum recule). L'œil en vieillissant distingue donc souvent mal les objets rapprochés et mieux les objets à l'infini. Cette diminution de la faculté d'accommodation impose l'utilisation de plusieurs lentilles correctrices suivant la distance objet-œil. Des verres à deux ou trois foyers (ou des verres à foyers progressifs) sont alors nécessaires.

## II. Grandeurs et notions propres aux instruments visuels

### II.1. Notion de diamètre apparent

On a vu que les objets lointains (« à l'infini ») sont caractérisés par le fait que chacun de leurs points envoie un faisceau parallèle sur un instrument optique donné 'lentille, œil ou autre). La position de l'image de chacun de ces points sur la rétine (dans le cas de l'œil) dépend donc uniquement de l'angle sous lequel arrivent ces faisceaux parallèles, comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous.

*Exemple : image de la lune*




Les rayons qui proviennent du centre de la lune sont parallèles à l'axe optique. Par definition, ils viennent donc se focaliser en F' (point focal image).
Les rayons issus du bord de la lune font un angle θ avec l'axe optique. Ils viennent se focaliser dans le plan focal image (puisque l'objet est à l'infini, et donc que tous les rayons issus d'un point du bord de la lune sont considérés comme parallèles), à la distance y de l'axe optique.

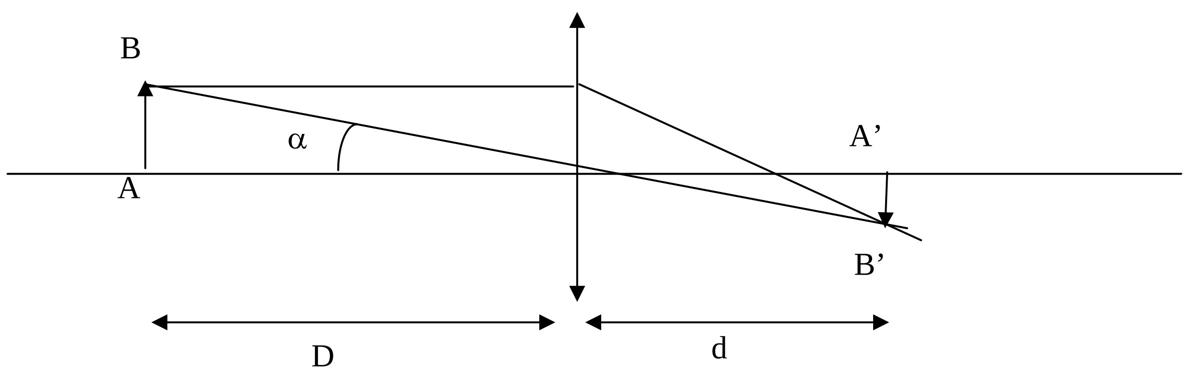
La taille y de l'objet sur la rétine est determinée par la relation trigonométrique suivante :

**Tan θ = y / f'**

La taille sur la rétine des objets à l'infini est donc définie par leur ***diamètre apparent***, c'est à dire l' écart entre les deux directions des rayons issus des bords opposés de la lune. Si on définit θ comme l'angle sous lequel on voit la lune depuis le centre de l'objectif (cf. schéma), alors le diamètre apparent vaut 2 θ (exprimé en radians).

AN : pour la lune, θ = 30' = 0,5 degrés.

De façon plus générale (que les objets soient à distance finie ou infinie), **le diamètre apparent est défini comme l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu.** Soit α le diamètre apparent d'un objet réel *AB* placé à la distance *D* de l'œil. La dimension de l'image rétinienne *A'B'*, dont dépend la qualité de l'information sur l'objet arrivant au cerveau, ne dépend que de α. En effet, la distance *d* séparant le cristallin de la rétine est constante. On a donc la relation :




$$\tan\alpha = \frac{AB}{D} = \frac{A'B'}{d}$$

**Il faut donc chercher à augmenter α pour que l'image *A'B'* soit la plus grande possible**.

**Comment augmenter α ?**

On pourra :

soit : rapprocher l'objet de l'œil, mais il y aura une limite. En effet *D* ne peut être inférieure à la distance minimum de vision distincte.

soit : augmenter la dimension de l'objet par un moyen auxiliaire ; par exemple pour mieux observer une photographie, on pourra l'agrandir ; pour mieux observer une diapositive, on la projettera sur un écran.

soit : utiliser un instrument d'optique qui permettra d'observer l'image de cet objet sous un angle supérieur à celui sous lequel on l'observerait à l'œil nu (jumelles, loupe,...).

### II.2. Grandeurs relatives aux instruments d'optique visuels

**- Grandissement « g »**

C'est le rapport de la grandeur de l'image à la grandeur de l'objet, comme on l'a vu auparavant.
C'est une grandeur surtout intéressante pour les systèmes de projection, où on projette sur un écran une image « g fois plus grande » de l'objet

**- Grossissement « G »**

L'angle $\alpha$ sous lequel on voit l'objet *AB* <u>à travers un instrument</u> est le diamètre apparent de l'image *A'B'* de *AB* donnée par l'instrument.

Le grossissement d'un instrument est le rapport de l'angle $\alpha$ sous lequel on voit l'objet à travers l'instrument à l'angle $\beta$ sous lequel on le voit à l'œil nu. C'est donc le rapport du diamètre apparent de l'image *A'B'* de *AB* donné par l'instrument au diamètre apparent de l'objet.

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

Le grossissement est donc une grandeur qui caractérise l'instrument d'optique visuel : à travers l'instrument, on voit un objet « G fois plus gros » que sans l'instrument.

Quand l'objet est de petites dimensions et proche, on détermine le diamètre apparent de l'objet à la distance minimum de vision distincte égale par convention à 25 cm. On a donc tan $\beta$ = taille de l'objet/ 25 cm. Le grossissement obtenu s'appelle alors le **grossissement commercial**.

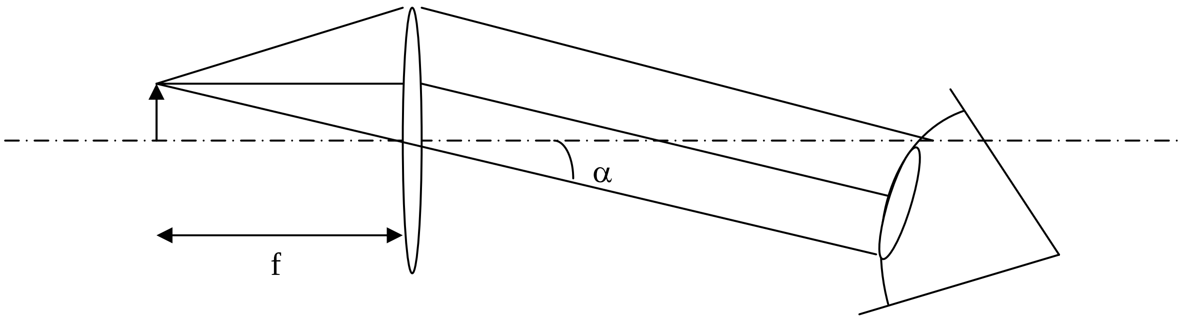
$$G_c = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha}{arctg\left(\frac{AB}{0{,}25}\right)}$$

<u>Exercice</u>
*Que devient l'expression précédente lorsque $\beta$ (en radian) est petit devant 1?*

<u>Remarque</u>
Un instrument destiné à l'observation d'objets éloignés (par exemple une lunette d'observation ou une paire de jumelles) ne peut être caractérisé que par son grossissement.

# III. Etude de la loupe

La loupe est le plus simple instrument visuel. C'est un système convergent permettant l'observation plus précise d'objets **rapprochés** de petite dimension. Soit $\beta$ le diamètre apparent de l'objet *AB* observé à l'œil nu, à 25 cm de distance.




Observons cet objet à travers une lentille de focale *f*. Pour que l'observation soit la plus confortable possible (pas d'accommodation, muscles au repos), il faut que les rayons entrant dans l'œil soient parallèles. Il faut pour cela placer l'objet à observer dans le plan focal objet de la loupe. L'image *A'B'* est alors à l'infini : c'est une image virtuelle droite et dont le diamètre apparent $\alpha$ est supérieur à $\beta$.

Exercice

*Montrer que pour $\alpha$ petit on a :*

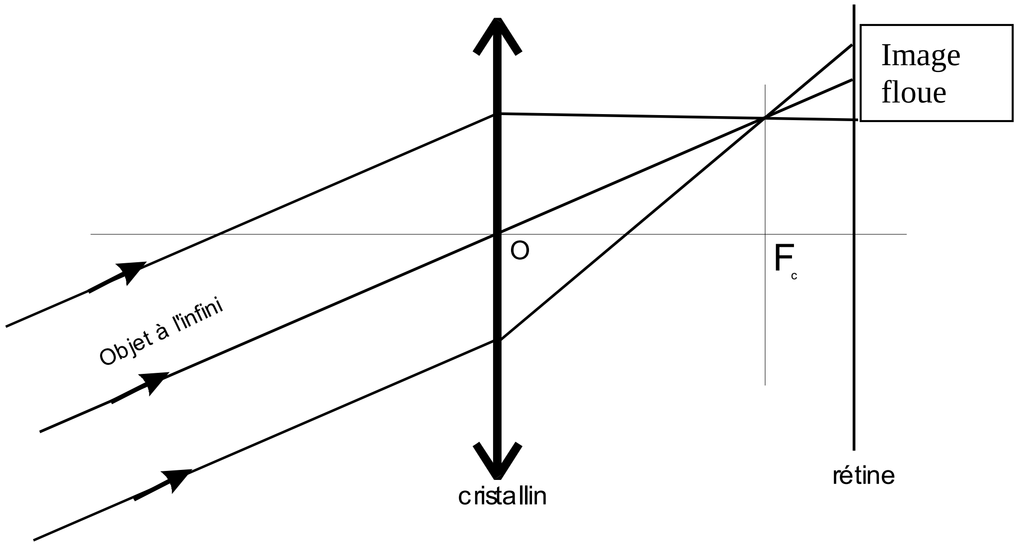
$$G_c = \frac{1}{4f}$$

Quand la loupe est utilisée pour observer l'image réelle d'un objet, elle prend le nom **d'oculaire**. Les instruments d'optique visuels sont équipés d'oculaires : microscope, lunette.

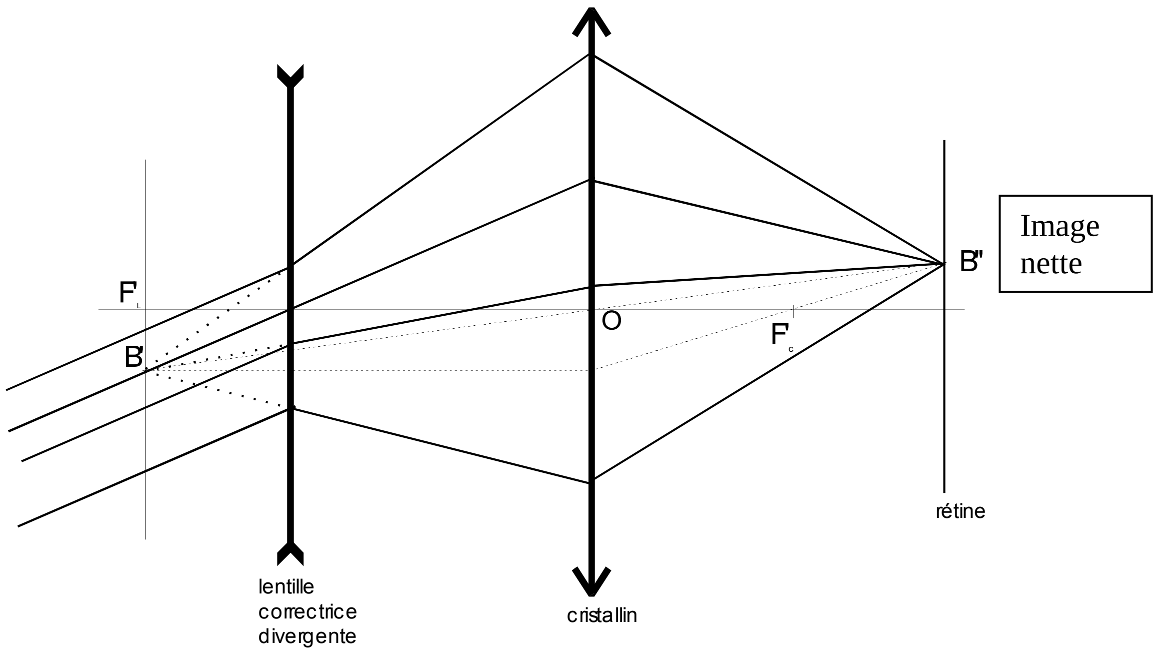
# IV. Exercice : Correction d'un œil myope

## IV.1. Principe

Comme on l'a vu un œil myope possède un cristallin trop convergent : l'image d'un objet très éloigné (ou à l'infini) va se former en avant de la rétine, et l'image sur la rétine sera donc floue :




Que faire pour ramener l'image sur la rétine? Et bien en plaçant une lentille divergente avant l'œil on va former une image intermédiaire (virtuelle) de l'objet, située dans son plan focal image (point B' sur le schéma suivant), et le cristallin pourra former de cet objet intermédiaire une image finale sur la rétine (point B'') :




## IV.2. Etude de cas : corrigeons un œil myope

On va considérer dans cet exercice que l'on peut modéliser l'œil humain de la façon suivante :

- La cornée sera représentée par une lentille mince convergente $L_1$ de Vergence fixe $V_{cornée}$= 35 dioptries
- Le cristallin sera représenté par une lentille mince convergente $L_2$ de Vergence variable $V_{cristallin}$.
- La distance entre la cornée et le cristallin est notée D = $\overline{O_1O_2}$ = 3.9 mm.
- La rétine est située à une distance fixe du cristallin, notée d = 18 mm.

*On rappelle que la relation reliant la vergence et la distance focale est la suivante* :

$$V(dioptries) = \frac{1}{f'(mètres)}$$

*Notations :*
*On notera $O_1$ et $O_2$ les centres des lentilles $L_1$ et $L_2$, et $f'_1$, $f'_2$ leur focales.*
*L'objet à observer sera noté AB, son image par $L_1$ sera A'B' et l'image finale sera A''B''*

1. **Faites un dessin** à l'échelle 2 (1mm = 2mm sur votre feuille) de tous les éléments en positionnant les foyers de $L_1$. On ne tracera pas de rayon ni d'image à ce stade.

2. **Œil normal au repos**
On souhaite connaître la vergence du cristallin lorsque l'œil est au repos (muscles cillaires détendus).

   a. Où doit se situer l'objet à observer dans ce cas ?

   b. Donnez, sans calcul, la position de l'image de cet objet formée par la cornée ($\overline{O_1A'}$)

   c. Où doit se situer nécessairement l'image finale A''B'' pour que l'objet soit vu net ?

   d. Déduire de c) la valeur de $f'_{cristallin}$ (soit $f'_2$) et de $V_{cristallin}$ (en dioptries).

   e. On sait que pour un système de deux lentilles accolées ou presque (comme c'est le cas ici pour $L_1$ et $L_2$) les vergences s'additionnent : V(système [$L_1$ + $L_2$]) = V($L_1$) + V($L_2$).

   En déduire la distance focale f' de l'ensemble [cornée + cristallin] au repos.
   Etant donné la taille d de l'œil donnée au début, le résultat obtenu vous parait-il cohérent (expliquez pourquoi) ?

   f. Que se passe-t'il qualitativement pour le cristallin, sa distance focale et sa vergence lorsque l'œil cherche à observer un objet proche (quelque dizaines de centimètres) ?

3. **Défaut d'un œil**
On considère maintenant que la distance focale du cristallin au repos vaut 4 cm (la cornée restant inchangée).

   a. Faites un dessin à l'échelle du système complet [cornée + cristallin], c'est-à-dire (L1 + L2). Ajoutez sur ce dessin le tracé du trajet réel à travers $L_1$ et $L_2$ d'un rayon parallèle à l'axe. En déduire la position de l'image finale dans le cas d'un objet à l'infini.

   b. Que pouvez vous dire de la netteté de l'image obtenue ? Comment appelle t'on ce défaut de la vision ?

   c. On désire corriger ce défaut. Pour cela, on utilise des lunettes correctrice, que l'on modélisera par une lentille divergente $L_0$, de distance focale $f'_0$. Cette lentille sera placée 2 cm devant la cornée (soit $\overline{O_1O_0} = -2\ cm$)
   Pour un objet à l'infini on a alors la séquence suivante :

*Objet à l'infini* $\xrightarrow{L_0}$ *AB* $\xrightarrow{L_1}$ *A'B'* $\xrightarrow{L_2}$ *A''B''*

En raisonnant « à partir de la fin », c'est-à-dire à partir de la position souhaitée de l'image A''B'', calculer la distance focale $f'_0$ nécessaire pour obtenir une bonne correction.

# Séances n° 5
# Association de lentilles minces : le microscope et la lunette astronomique

Le **but recherché dans l'emploi d'un instrument d'optique** est en général de former une image d'un objet qu'il est difficile d'observer directement, cette image étant la représentation la plus fidèle possible de l'objet, mais dont les caractéristiques seront adaptées au **récepteur** permettant de l'analyser. Le choix d'un instrument dépendra essentiellement de l'objet lui-même (objet rapproché ou éloigné, petit ou grand) et du récepteur.

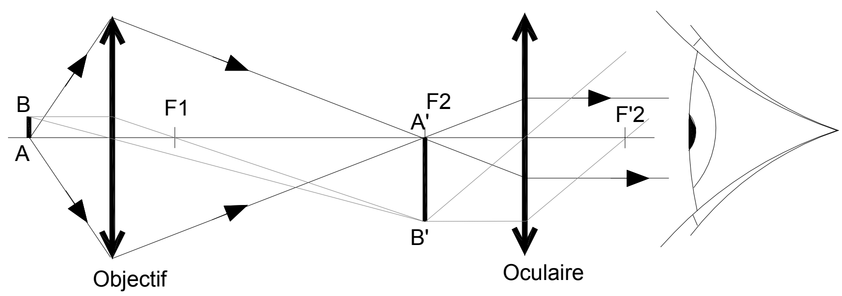
Dans le cas d'instruments visuels ce récepteur est **l'œil**. L'image formée par ces instruments est alors **virtuelle** (cas du microscope, de la loupe, d'une lunette astronomique). Dans les autres cas, on fait appel, soit à un écran, soit à une plaque photographique, soit à un récepteur capable de transformer l'énergie lumineuse reçue en une autre forme d'énergie (par exemple, les détecteurs photoélectriques permettent de faire correspondre à l'énergie lumineuse reçue un courant électrique d'intensité donnée).Cette fois l'image est formée sur le récepteur, elle est donc **réelle**.

Il faudra bien noter qu'avec ces instruments, c'est l'œil de l'observateur qui permet d'analyser l'image donnée par l'instrument. Il faudra donc chercher à faire cette observation dans les conditions optimales (luminosité, diamètre apparent,…) et à fatiguer l'œil le moins possible.

## I. Observation à distance finie : le microscope

### I.1. Principe

Le microscope permet d'observer de petits objets proches. C'est un instrument dans lequel on observe à la loupe (oculaire) l'image agrandie d'un objet, donnée par un objectif de courte distance focale.



### I.2. Calculs

1) Dessinez le schéma de principe d'un microscope à 2 lentilles, L1 et L2.

2) On place l'objet A à 6 cm avant la lentille L1, de focale 5 cm. Calculez la position de l'image A'B'.

3) Quelle doit être la distance entre A' et la lentille L2 pour que l'observateur qui place son œil derrière L2 puisse regarder sans fatigue (sans accommoder) ?

4) Faites le dessin complet, avec la position des images, et le trajet de 2 rayons réels.

5) Calculez le grandissement g(L1) de la lentille L1, et le grossissement commercial Gc(L2) de la lentille L2 (on donne f'2 = 3 cm).

6) Démontrez que le grossissement commercial du microscope complet, Gc(microscope), vaut g(L1) x Gc(L2). Donnez la valeur de Gc(microscope).

## II. Observation d'un objet éloigné : la lunette astronomique

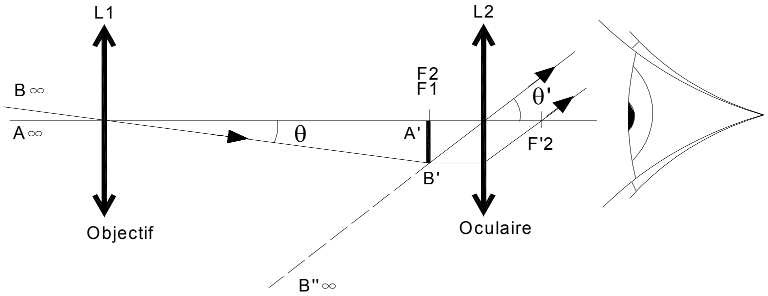
### II.1. Principe

La lunette astronomique est un instrument destiné à augmenter le diamètre apparent des objets situés à l'infini et à augmenter la clarté des objets sans diamètre apparent (étoile par exemple).

Elle est constituée :

- ❖ d'un objectif de grande distance focale qui donne d'un objet AB une image A'B' dont la taille est proportionnelle à la distance focale.
- ❖ D'un oculaire de courte distance focale qui permet d'observer cette image intermédiaire A'B'.

Le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire (système afocal).
L'image finale est inversée, vue sous un angle agrandi et rejetée à l'infini.




### II.2. Calculs

On considère une lunette formée dans un premier temps de 2 lentilles minces convergentes $L_1$ et $L_2$ de distances focales respectives $f'_1$ (=10 cm), $f'_2$ (=2 cm). $L_1$ est l'objectif et $L_2$ est l'oculaire.
On cherche à observer un objet très éloigné (situé à l'infini) sans accommoder (œil au repos).

## 1) Lunette à 2 lentilles

*a)* Où doit se former l'image pour que l'observation visuelle soit confortable (c'est-à-dire sans accommodation) ? Faire le dessin (sur votre copie) à l'échelle de la lunette ainsi formée et tracer les trajets de 2 rayons au moins. *(Pour le dessin de l'objet à l'infini, on considérera des rayons pas trop inclinés sur l'axe)*

b) Rappelez la définition du grossissement G ? Démontrez que IGI = $f'_1/f'_2$ et donnez sa valeur numérique

c) On veut observer les étoiles : vaut-il mieux utiliser cette lunette ou un télescope de même grossissement ? Pourquoi ?

d) On veut se servir de cette lunette pour l'observation terrestre (prise de vues animalières, surveillance…). Quel est, du point de vue pratique, l'inconvénient principal de cette lunette pour ce type d'observation ?

## 2) Lunette à 3 lentilles (/6)

On utilise en plus maintenant une lentille L (de focale f égale à celle de $L_2$), positionnée entre l'objectif et l'oculaire ($L_2$ n'est plus à la même place qu'au 1), à la distance d=13 cm de l'objectif.

*On notera AB l'image de l'objet (à l'infini) faite par $L_1$ et A'B' l'image de AB par L. On appellera O le centre optique de la lentille L, F son foyer objet et F' son foyer image.*

a) Calculez la position de l'image intermédiaire A'B'. A quelle distance de l'objectif doit-on placer l'oculaire pour que l'observateur puisse voir « à l'infini » (c'est-à-dire sans accomoder) ? Dessiner l'oculaire $L_2$ sur la feuille annexe jointe au sujet.

b) Dans ce cas (sur la feuille annexe jointe au sujet), faire le schéma complet avec les 3 lentilles (placer AB, A'B' et l'image finale par $L_2$ ) et tracer le parcours complet de deux rayons au moins.

c) Donner la définition du grandissement g pour la lentille L entre A'B' et AB. Combien vaut-il ? Quel est son signe ?

d) Exprimez le nouveau grossissement G' de la lunette à 3 lentilles en fonction du grossissement G de la lunette à 2 lentilles et du grandissement g de la lentille L.
Calculez-le. Quel est son signe ?

e) Quels sont les avantages (éventuels) et les inconvénients (éventuels) au fait d'avoir ajouté L ?

# Séance n° 6
# Etude d'un télescope à miroirs

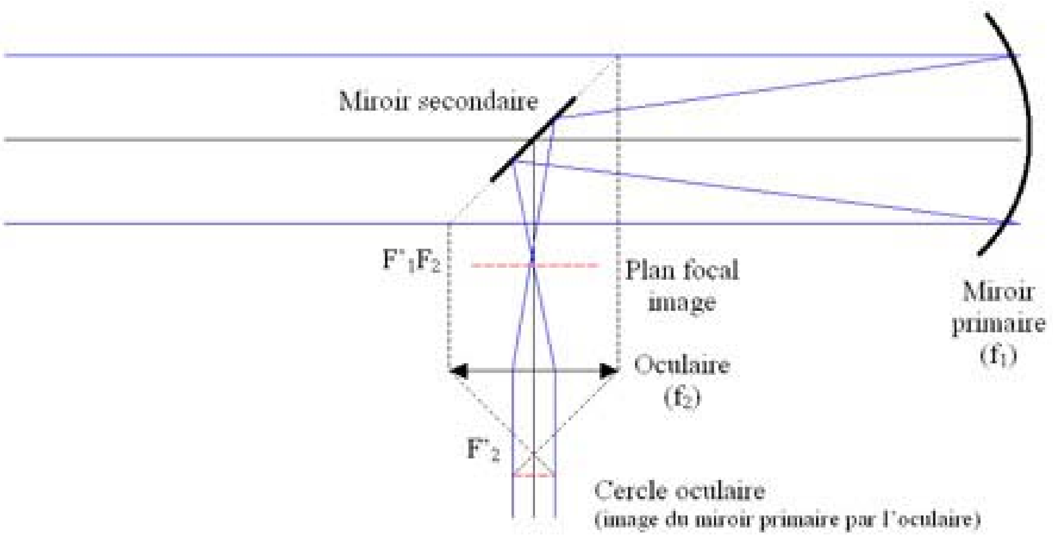
## I. Un peu d' Histoire

Précurseur du télescope, la lunette astronomique a été conçue en Hollande vers 1608. On en attribue l'invention à l'opticien hollandais Hans Lippershey. Mais c'est en 1609 que l'astronome italien Galilée présenta la première lunette astronomique. Son confrère allemand Johannes Kepler en perfectionna le principe, en proposant une formule optique à deux lentilles convexes. Dans un télescope, un miroir concave est utilisé pour former l'image. En 1663, le mathématicien écossais James Gregory fut le premier à proposer la formule du télescope. En se basant sur ses observations du chromatisme dans les lentilles, rendant celles-ci peu pratiques pour fiare des observations précise (voir page precedente), le mathématicien et physicien anglais Isaac Newton en construisit une première version en 1671.

Dans ce type d'instrument, la lumière réfléchie par le miroir primaire concave doit être amenée à une position d'observation, en dessous ou sur le côté de l'instrument. Le pionnier fut le télescope de 2,54 m de diamètre de l'observatoire du Mont Wilson, en Californie : demeuré célèbre pour avoir servi dans les années 1920 aux travaux de l'astronome américain Edwin Hubble, son utilisation cessa de 1985 à 1992 sous l'effet de pressions financières. La conception du télescope de Keck marque une innovation importante : la surface réfléchissante de l'instrument est composée d'une mosaïque de trente-six miroirs hexagonaux, tous orientables individuellement grâce à trois vérins. Elle équivaut à un miroir primaire de 10 m de diamètre, sans en avoir le poids. Des techniques dites d'optique active permettent de jouer en temps réel sur les vérins pour optimiser le profil de la surface réfléchissante totale. Autre instrument remarquable, le Very Large Telescope (VLT), possède quatre miroirs de 8.20 m, est situé au Chili, au sommet du Cerro Paranal, à 2600 m d'altitude. Il a été équipé en 2002 du système Naos lui permettant d'être 2 fois plus précis que le télescope spatial Hubble.

### I.1. Description d'un télescope

Les instruments d'observation astronomique sont généralement constitués de deux systèmes optiques complémentaires : l'objectif et l'oculaire.

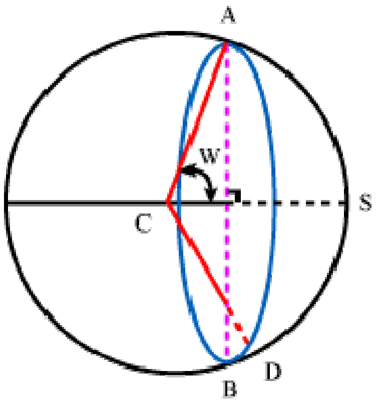


### I.2. L'objectif

Dans le cas d'un télescope, l'objectif est le miroir dit « primaire ». C'est celui que rencontre en premier la lumière provenant de l'objet observé. A la différence des glaces utilisées dans la vie courante, la face réfléchissante est située en avant, de sorte que la lumière ne traverse pas le verre qui sert uniquement de support à une pellicule d'aluminium de quelques micromètres. La lumière étant simplement réfléchie, contrairement à ce qui se passe dans une lunette astronomique, l'achromatisme des télescopes est total (voir séance 2, page 24 du poly).

La lumière est ensuite focalisée en un point appelé foyer-image (voir encadré). Le faisceau convergent peut être renvoyé vers un « oculaire » à l'aide d'un miroir secondaire. Ce petit miroir provoque inévitablement une obstruction, c'est-à-dire une perte de luminosité, mais elle est généralement faible.

**<u>Les Miroirs sphériques</u>**




*Un miroir sphérique est une portion de sphère réfléchissante. Il s'agit généralement d'une calotte sphérique limitée par une base circulaire dont le diamètre AB est appelé **diamètre d'ouverture** du miroir.*

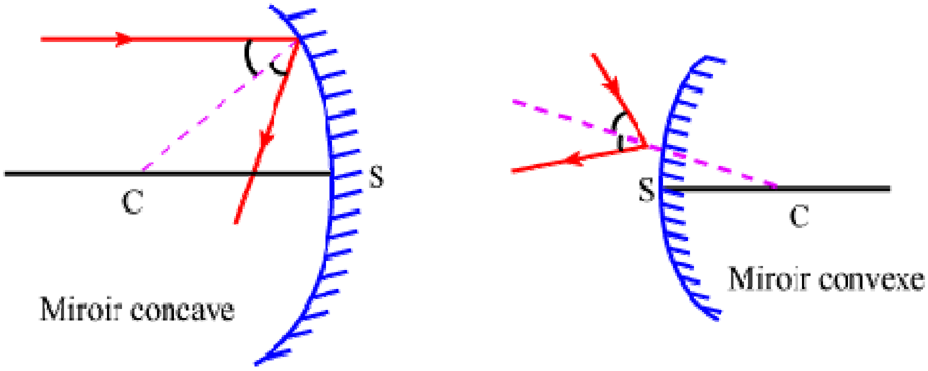
*Le centre C d'un miroir sphérique est évidemment le centre de la sphère sur laquelle il s'appuie; son sommet est le pôle de la calotte. L'axe CS qui contient le centre et le sommet du miroir est l'<u>axe principal</u> du miroir; les autres rayons, tels que CD, représentent ses axes secondaires. Comme CS constitue un axe de symétrie pour le miroir, tout plan qui le contient est dit plan de section principale du miroir sphérique. On appelle par ailleurs **angle d'ouverture** d'un miroir sphérique le demi angle au sommet w du cône de sommet C, ayant pour directrice le contour du miroir.*

*Un miroir sphérique peut être concave (à gauche) ou convexe (à droite). Ils sont les équivalents des lentilles convergentes et divergentes*
*Il existe plusieurs points particuliers dans un miroir (concave pour l'exemple) :*

- ***le point C**, qui est le centre de courbure du miroir : tout rayon passant par C est renvoyé sur lui-même (il frappe le miroir perpendiculairement à celui-ci).*
- ***Le sommet S** : tout rayon qui arrive en S avec un angle a par rapport à l'axe repart avec un angle –a (loi de Descartes pour la réflexion)*
- ***Le foyer F'**, situé en première approximation (conditions de Gauss) à CS/2 : tout rayon qui passe par F' ressort parallèle à l'axe.*

*On note de fortes ressemblances avec les lentilles minces, à la différence près que les rayons changent de direction après avoir frappé le miroir. De fait, on peut raisonner (et faire les constructions) avec les miroirs exactement de la même façon qu'avec les lentilles, en « dépliant » le système.*

### I.3. L'oculaire




L'oculaire est la partie de l'instrument qui permet d'agrandir l'image produite par l'objectif au niveau du foyer-image ; un oculaire n'est rien d'autre qu'une loupe perfectionnée. La mise au point se fait en réglant la distance entre l'objectif et l'oculaire. Un télescope est théoriquement un instrument afocal, c'est-à-dire qu'il est possible de faire coïncider le foyer-image du miroir primaire avec le foyer-objet de l'oculaire.

Les oculaires sont interchangeables, ce qui permet de modifier les caractéristiques de l'instrument. Ils sont constitués de lentilles qui introduisent des aberrations optiques plus ou moins bien corrigées selon les modèles

### I.4. La monture

La monture est la partie mobile, celle qui permet d'orienter l'instrument. Il existe trois types de monture :

- La monture azimutale.

C'est la monture basique, constituée d'un axe vertical et d'un axe horizontal. Elle est d'une prise en main facile mais n'est pas adaptée aux observations prolongées. Elle n'est généralement utilisée que sur les lunettes astronomiques de moins de 60 mm.

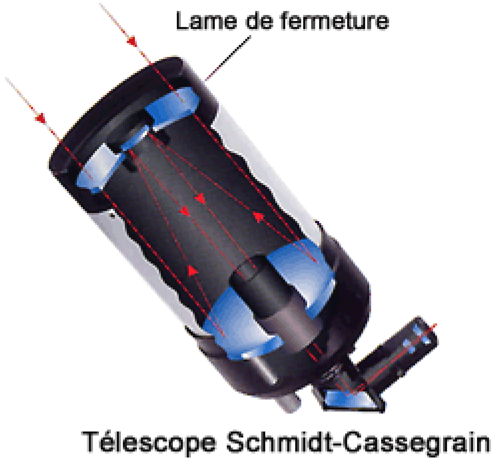
- La monture équatoriale.

L'usage de cette monture est rendue pratique en raison de la rotation de la sphère céleste. Elle permet de suivre le même astre en faisant pivoter l'instrument sur un seul axe. Pour cela, elle possède quatre axes dont deux permettent de régler, on dit mettre en station, la monture. Les deux autres servant à orienter l'instrument selon les coordonnées célestes données par la déclinaison et l'ascension droite. Cette monture requière de maîtriser les bases de l'astronomie mais elle offre finalement un meilleur confort d'utilisation (voir l'article détaillé monture équatoriale). C'est la monture généralement utilisée sur les télescopes.

- La monture altazimutale.

Comme la monture azimutale, elle est constituée d'un axe vertical et d'un axe horizontal. Mais, comme la monture équatoriale, elle permet le suivi d'un astre car elle est équipée d'un moteur sur chacun de ses axes. Elle est donc pilotée par un ordinateur intégré dans le télescope, ou extérieur, avec positionnement automatique sur un astre.

Il existe plusieurs types de télescopes. Le plus classique, que nous étudierons ici, est le télescope dit « de Newton » (voir schéma plus haut). Il existe d'autres géométries (par exemple le Scmidt-Cassegrain, voir ci-dessous).


**LES PRINCIPALES GRANDEURS DES INSTRUMENTS D'ASTRONOMIE (lunettes et télescopes)**

**Le diamètre :**

Il correspond à la dimension de l'objectif ou du miroir primaire. C'est lui qui conditionne la quantité de lumière qui va rentrer dans l'instrument et par conséquent dans notre oeil ou dans le capteur photographique.

**La distance focale :**

Il s'agit de la distance qui sépare le centre de la lentille ou de la surface du miroir et du point appelé Foyer Image. Celui-ci étant le point de convergence des rayons lumineux. On peut également appeler ce point, point de netteté. Cette grandeur est inhérente à toute lentille ou miroir. La distance focale entre pour partie dans la puissance de grossissement de l'instrument. Ce qu'il faut retenir, c'est que plus la distance focale est grande, plus les grossissements sont théoriquement grands. Bien sûr, il existe des limites à ces grossissements que nous aborderons un peu plus loin.

**Le rapport F/D :**

C'est le rapport de deux grandeurs, à savoir la focale et le diamètre. Ce rapport nous indique la luminosité de l'instrument. Autrement dit sa capacité à "voir" les faibles luminosités.
D'une manière générale, un rapport F/D faible indique un instrument adapté à l'observation du ciel profond, car très lumineux ; un rapport F/D important désigne les instruments adaptés aux observations planétaires.

**Le pouvoir séparateur :**

il s'agit de l'aptitude à discerner de fins détails sur une surface (Lune par exemple) ou à dissocier deux étoiles très proche l'une de l'autre.
Il s'exprime en secondes d'arc.

**Le grossissement :**

Le grossissement d'un instrument d'astronomie se détermine tout simplement par le rapport des distances focales de l'objectif et de l'oculaire. Prenons une lunette type de 60 mm de diamètre d'objectif et de 900 mm de longueur focale. Si on l'équipe d'un oculaire "fort", de 6 mm de focale par exemple, le grossissement obtenu sera de : 900/6, soit 150 fois. Par contre, un oculaire "faible" de 30 mm de focale on aura seulement : 900/30, soit 30 fois. On voit par conséquent que pour un objectif donné, le grossissement varie suivant l'oculaire choisi.

# II. Exercice sur le Téléscope

**2007 Antilles Guyane Exercice n°3 ETUDE DE LA NOTICE D'UN TELESCOPE**

Diamètre de l'objectif : $D_1$ = 114 mm
Distance focale de l'objectif $f'_1$ = 1000 mm
Rapport $f'_1/D_1$ : 8,8

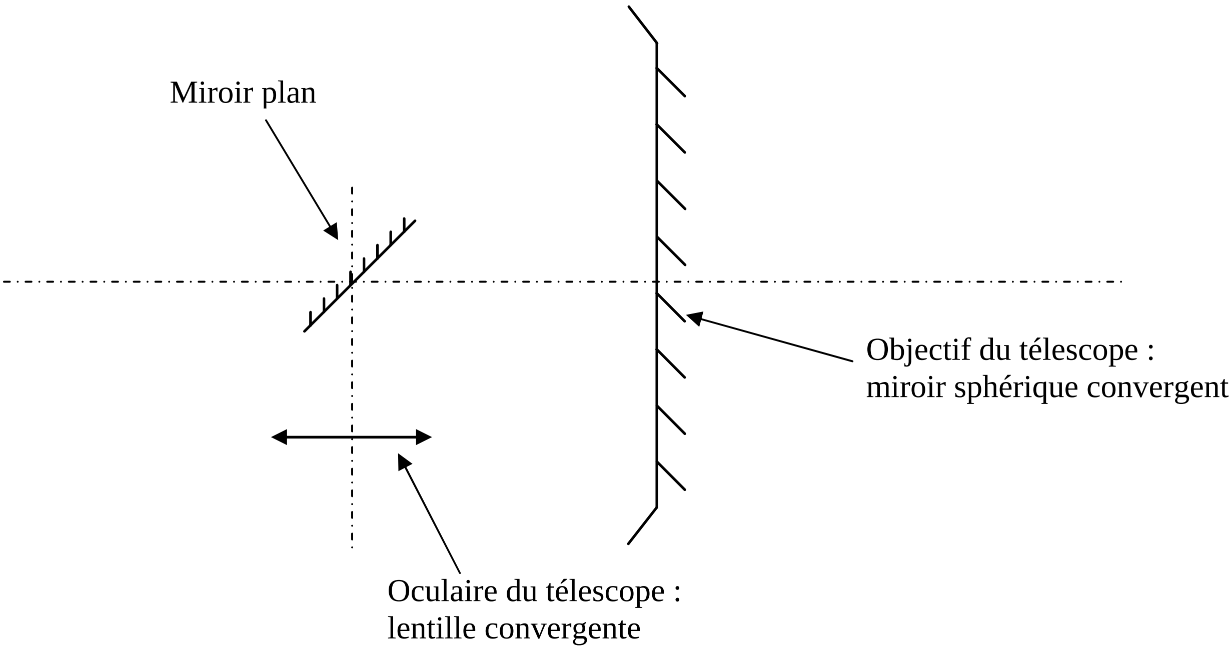
Accessoires fournis :
Oculaire MA 25 distance focale $f'_2$ = 25 mm (40 fois)
Oculaire MA 9 distance focale $f'_3$ = 9 mm (111 fois)
Diamètre des oculaires : $D_2$ = $D_3$ = 31,75 mm

Chercheur : 6x30
Trépied : Aluminium

Grossissement maximum utile : 228 fois

Plus petit détail visible sur la Lune : 2,1 km

On rappelle le schéma de principe du télescope.




**1. <u>CONSTITUTION DU TÉLESCOPE</u>**

1.1. L'objectif du télescope est un miroir sphérique convergent.

1.1.1. À l'aide des données et en utilisant les échelles, placer sur l'**ANNEXE 1** le sommet *S* du miroir sphérique convergent ainsi que son foyer principal *F*.

On appelle le centre du miroir C.

1.1.2. Quelle relation existe-t-il entre $\overline{CS}$ et $\overline{CF}$ ?

1.1.3. Où se forme l'image d'un objet placé à l'infini ?

1.1.4. Construire sur l'**ANNEXE 1** l'image d'un objet lumineux situé à l'infini (étoile). Un des rayons issu de l'objet est représenté sur le document.

1.2. Le miroir sphérique donne une image intermédiaire qui est réfléchie par le miroir plan. On obtient ainsi une deuxième image intermédiaire qui constitue un objet pour l'oculaire.

1.2.1. On veut obtenir une image finale à l'infini. Où cette deuxième image intermédiaire doit-elle se former par rapport à l'oculaire ?

1.2.2. Vérifier votre affirmation avec l'aide de la formule de conjugaison.

1.3. Étude du cercle oculaire.

*Définition : le cercle oculaire est l'image de la monture de l'objectif donnée par l'oculaire*. Toute la lumière issue du microscope passe par le cercle oculaire : en plaçant l'oeil à cet endroit, on observe une image très lumineuse.

1.3.2. Positionner le cercle oculaire sur l'**ANNEXE 2**

## 2. GROSSISSEMENT DU TÉLESCOPE.

2.1 Le grossissement du télescope peut s'écrire :

$$G = \frac{\text{diamètre apparent de l'objet à travers le télescope}}{\text{diamètre apparent de l'objet}} = \frac{\theta'}{\theta}$$

En représentant le télescope sous la forme de deux lentilles placées l'une derrière l'autre, démontrez que le grossissement G du télescope est donné par la relation :

$$G = \frac{\text{distance focale de l'objectif}}{\text{distance focale de l'oculaire}}$$

2.2. Lequel des deux oculaires fournis faut-il choisir pour avoir le plus grand grossissement ? Justifier la réponse.

On précise que le « grossissement maximum utile » donné dans la notice est le grossissement maximal possible compte tenu du diamètre de l'objectif. On peut obtenir ce grossissement maximal possible avec un oculaire non fourni (ni MA 25, ni MA 9).

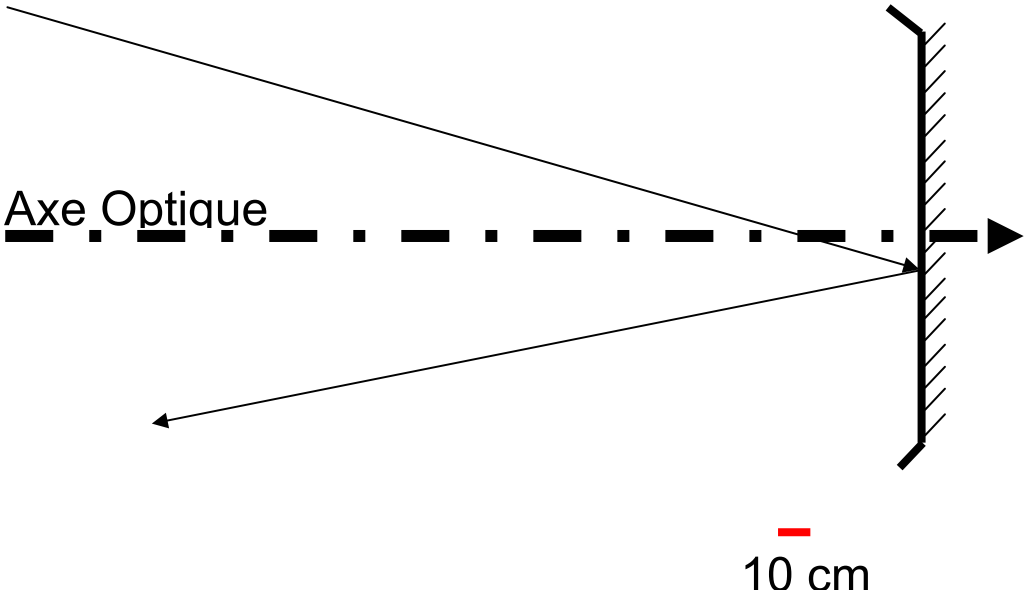
2.3. Calculer la distance focale de l'oculaire nécessaire pour obtenir le grossissement maximum utile de 228 fois.

2.4. Diamètre apparent

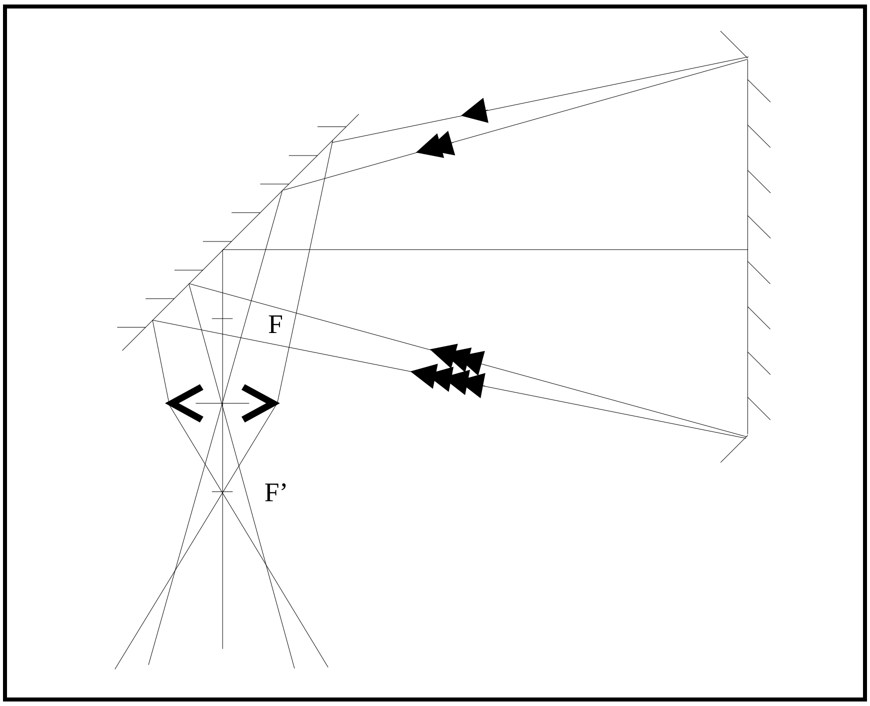
2.4.2. Calculer le diamètre apparent $\theta$ (en radian) du plus petit détail visible sur la Lune (2,1 km) sachant que la distance Terre-Lune sera estimée à $3{,}8.10^5$ km.

2.4.3. Calculer le diamètre apparent $\theta'$ de l'objet à travers le télescope si on utilise l'oculaire de distance focale $f'_3 = 9$ mm.

Annexe 1 :




**Annexe 2 :**



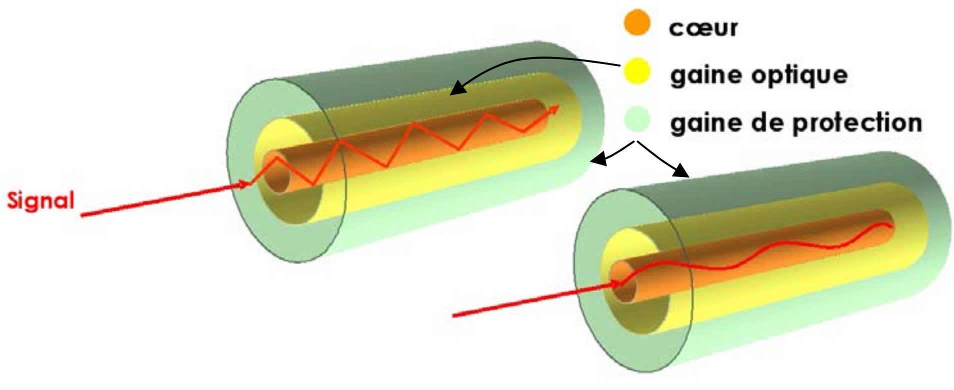
# Séance n° 7
# Les fibres optiques

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux fibres optiques et plus particulièrement à leurs propriétés pour le guidage de la lumière et la transmission d'information.

## I. Les lois de Descartes et la réflexion totale

Le principe de guidage de la lumière par fibre optique se comprend pleinement dans le cadre de l'optique géométrique. Il est basé sur le phénomène de **réflexion totale**. Comme vous l'avez vu dans le cours d'introduction, à l'interface de deux milieux transparents d'indices optiques différents, un rayon lumineux donne en général naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté. L'angle du rayon réfracté avec la normale est donné par la formule la loi de Snell-Descartes : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Une fibre optique est un guide d'onde optique constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre.




*A droite : fibre optique à saut d'indice / à gauche : fibre optique à gradient d'indice*

En pratique divers profils d'indice sont utilisés selon le type d'application. Le plus employé est le **profil à saut d'indice** dans lequel la fibre est constituée de deux zones concentriques homogènes avec un saut brutal d'indice à l'interface, la zone centrale est le coeur et la couche périphérique est appelée gaine optique. Le plus souvent une enveloppe protectrice assure une protection à la fois mécanique et surtout optique vis à vis de la lumière extérieure.

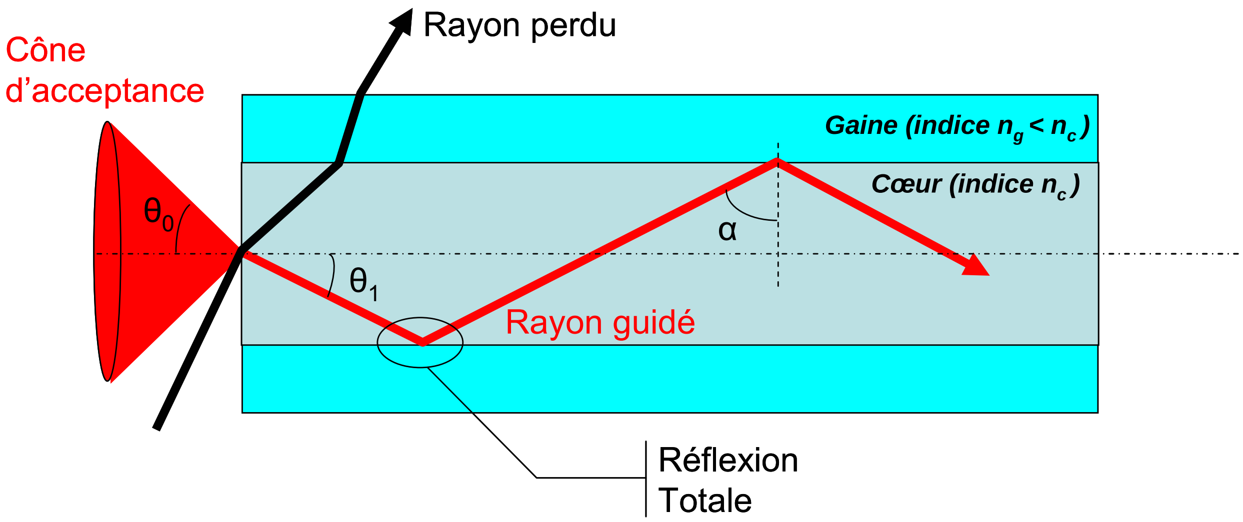
Il existe aussi des **fibres à gradient d'indice :** Les fibres à gradient d'indice ont été spécialement conçues pour les télécommunications. Leur coeur n'est plus homogène, l'indice de réfraction décroit depuis l'axe jusqu'à l'interface.

Dans une fibre optique la lumière est confinée dans la zone centrale et guidée grâce à la gaine optique. Le plus souvent le coeur et la gaine optique sont en silice ou en verre spécial tandis que la gaine de protection est plus généralement en plastique. Pour obtenir des indices de réfraction différents entre le cœur et la gaine on procédera le plus souvent à un dopage (on injetce des impuretés pour augmenter très légèrement l'indice dans le cœur). La différence d'indice entre le cœur et la gaine, notée Δ, est très faible (autour de $10^{-3}$)

La dimension du coeur joue un rôle très important : en effet s'il est de quelque microns la lumière va s'y propager selon un seul mode, on parle alors de fibre unimodale; si par contre il est de l'ordre de plusieurs dizaines de microns on parlera de fibre multimodale dans laquelle la propagation de la lumière sera plus complexe avec des phénomènes de dispersion plus importants. C'est pourquoi la fibre unimodale est préférée en télécommunications à longue distance. (Voir exercice Dispersion modale)

Pour mettre en équation le processus de guidage on utilisera soit la théorie de la propagation géométrique valable pour des coeurs de grande dimension (vis à vis de la longueur d'onde de la lumière considérée), mais aussi la théorie ondulatoire et les équations de Maxwell plus appropriée pour les faibles diamètres de coeur.

Dans le cadre de ce cours on se limitera à une approche géométrique :




- pour qu'un rayon soit effectivement guidé dans la fibre il faut que sa direction à l'entrée se situe dans un cône dit d'acceptance. Ce cône contient tous les angles qui vont conduire à un angle α à l'interface cœur/gaine permettant d'avoir une réflexion totale.
- un rayon guidé va subir cette réflexion totale à chaque fois qu'il va rencontrer l'interface cœur/gaine.
- un rayon hors du cône d'acceptance sera simplement réfracté à l'entrée dans la fibre puis à l'interface des deux couches, il passera alors dans la gaine et sera perdu.
- l'angle d'acceptance permet de définir ce qu'on appelle l'ouverture numérique de la fibre, ouverture qui dépend bien évidemment des indices respectifs des deux couches optiques.

$$O.N. = \sin\theta_0 = \sqrt{n_c^{\,2} - n_g^{\,2}} \cong \sqrt{2 n_g \Delta n}$$

- pour exploiter une fibre optique il faut donc faire converger la lumière à l'entrée à l'intérieur du cône avec une image qui soit inférieure au diamètre du coeur ce qui est relativement aisé à obtenir avec une source laser mais bien plus difficile avec une source classique.

## II. Guidage de la lumière par une fibre optique multimode

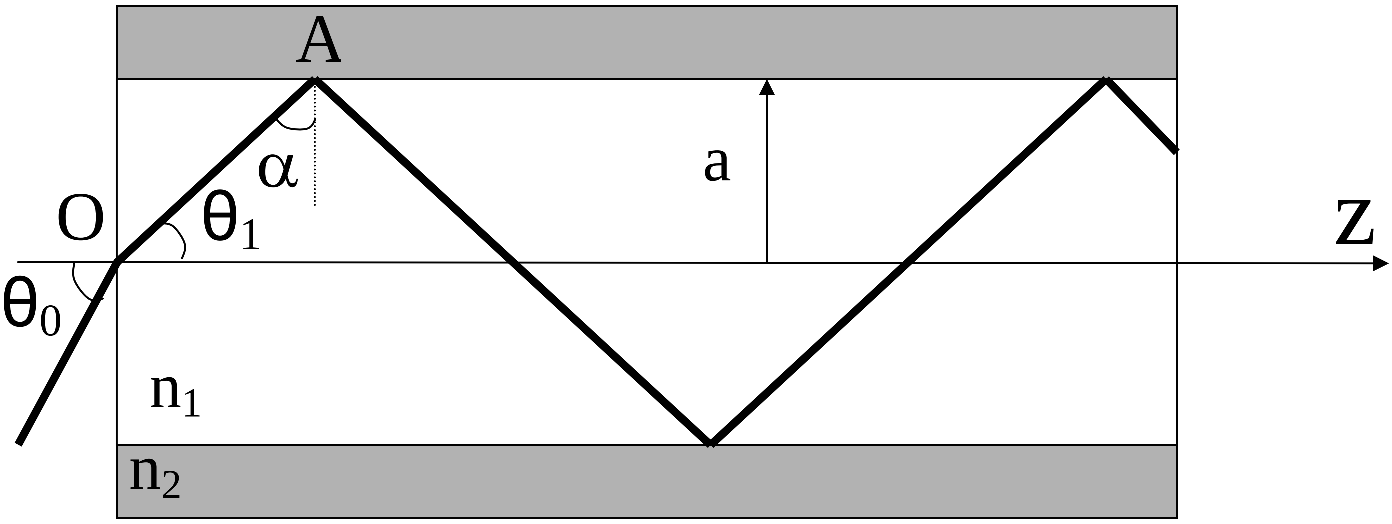
Une fibre optique cylindrique, d'axe Oz, est constituée d'un cœur transparent de rayon a, d'indice de réfraction $n_1$=1,5 entouré d'une gaine dont l'indice de réfraction est tel que $n_2/n_1$=0.99.

1) Calculer $\alpha_l$ l'angle limite au delà duquel il y a réflexion totale.

2) En déduire que l'angle $\theta_0$ à l'entrée de la fibre doit rester inférieur à une valeur $\theta_{max}$ pour qu'il y ait guidage dans la fibre.

3) Exprimer cet angle en fonction de $n_1$ et $n_2$ (on considérera que l'indice de l'air est égal à 1). Calculer numériquement $\theta_{max}$.

L'angle $\theta_{max}$ que vous venez de calculer définit le demi-angle au sommet d'un cône à l'intérieur duquel doit se trouver le faisceau lumineux pour qu'il y ait guidage, c'est **le cône d'acceptance** de la fibre.



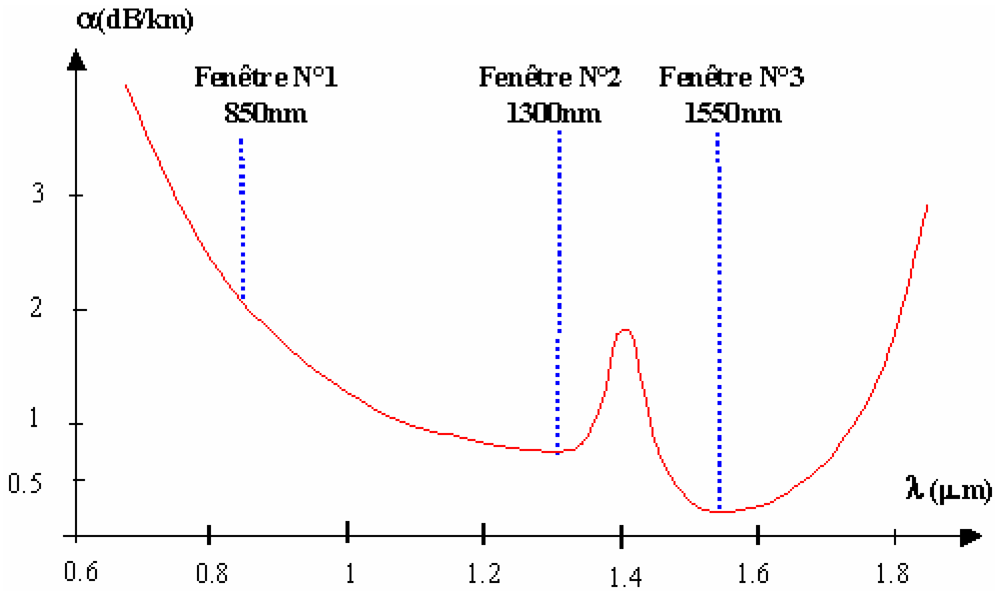

## III. Pertes dans les fibres optiques

Lorsqu'on injecte, à l'entrée d'une fibre optique, une puissance $P_e$ = P(L=0) sous forme d'une onde électromagnétique, cette puissance décroît avec la longueur L de la fibre optique en fonction de l'atténuation linéique $\alpha_{dB/km}$ , et à la sortie, on récupère la puissance Ps = P(L).
Soit : **$P(L) = P(0).e^{-\alpha.L}$**
α est le coefficient d'absorption et est exprimé en $m^{-1}$ ou en $cm^{-1}$ (attention à bien utiliser la bonne unité, c'est-à-dire la même que pour L !). Il dépend du matériau (plastique, silice,...) et de la longueur d'onde λ.

On utilise très souvent les décibels, ou dB pour mesurer des pertes :
On définit <u>l'atténuation en dB</u> par $A_{dB}$ = 10 log (η) = 10 log ($P_L$/ $P_0$)
*Rappel : attention à ne pas confondre log (en base 10) et ln (en base e) !!!*
*Log 1 = 0, donc si η =1 (pas de pertes, 100% de transmission) alors $A_{dB}$ = 0 dB.*
*Log (0.5) = -0.3 donc si on ne transmet que la moitié de la puissance (η =0.5) alors $A_{dB}$ = -3 dB*

*Le lien entre les deux définitions est donc : AdB = -4.343 x aL, où le facteur 4.343 vient de la conversion entre logarithme décimal et logarithme néperien.*

On montre expérimentalement que les fibres présentent une atténuation minimale (environ 0.2dB/km) pour une longueur d'onde optique de 1550nm (voir figure ci-dessus): c'est pour cela que les diodes lasers utilisées en télécommunications optiques émettent à la longueur d'onde de 1550 nm.




Les causes des pertes dans les fibres sont multiples. On distingue généralement :

- l'absorption par les impuretés, en effet une fibre de silice quoique très purifiée n'est pas parfaite et les atomes d'impuretés vont avoir plusieurs effets perturbateurs dont l'absorption purement et simplement du photon par un électron de l'atome avec transformation finale de l'énergie lumineuse du photon en chaleur. C'est cette absorption, qui dépend de la longueur d'onde, qui est représentée sur la figure ci-dessus.

- la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface coeur-gaine et la diffusion Rayleigh qui est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (la silice), due à des variations locales de l'indice de réfraction créées par des changements de densité ou de composition apparus au moment de la solidification du matériau.

- les courbures et les micro-courbures de la fibre, la fibre ne peut pas dans une application réelle être, sauf exception, exempte de courbures et dans ces zones le risque pour un rayon lumineux de ne plus satisfaire la condition de réflexion totale est inévitable ce qui se traduit par une perte dans la gaine par simple réfraction.

- la diffusion et la réflexion aux épissures.

*Exercice 1 :*

On sait faire pour les télécoms des fibres en silice présentant une atténuation très faible à une longueur d'onde donnée (1.55 µm) : l'atténuation vaut par exemple -0,2 dB/km. On injecte une puissance lumineuse P à l'entrée d'une telle fibre optique de 100 km de long. On considère qu'on n'a pas de pertes d'injection. Calculez le pourcentage de la puissance de départ sortant de la fibre.

*Exercice 2 :*

On utilise très souvent les décibels, ou dB pour mesurer des pertes. C'est très utile pour calculer des pertes « en série » (plusieurs fibres à la suite) car les dB étant des logarithmes, ils s'ajoutent : par exemple, si on raccorde une fibre ayant X dB d'atténuation avec une autre ayant Y dB d'atténuation, le total fera (X+Y) dB d'atténuation.
Prenons une fibre de 500 m ayant une atténuation de 0.6 dB/km et une deuxième fibre de 10 km ayant une atténuation de 0.2 dB/km. On rajoute qu'au moment de raccorder les 2 fibres on a en plus des pertes d'injection de 0.7 dB.

Fibre de 500m, pertes 0.6 dB/km → pertes 0.7 dB → Fibre de 10 km, pertes 0.2 dB/km

En raisonnant sur les dB, quelles sont les pertes totales (en dB) au cours de la propagation ?

On peut de façon équivalente donner maintenant les valeurs de α (en $m^{-1}$) et β : pour la première fibre α = $0.138.10^{-3}$ $m^{-1}$ et pour la deuxième fibre α = $0.046.10^{-3}$ $m^{-1}$. On ajoute les pertes d'injection au moment du raccordement : 15% de pertes, soit 85% de lumière qui passe de la fibre 1 à la fibre 2 au moment du raccordement.
Calculez les pertes totales (en %) sur l'ensemble du système. Vérifiez que vous trouvez bien la même chose qu'au a) : on doit avoir Pertes(dB) = 10 log (Pertes(%)/100), au signe près.
Est-ce plus simple avec la méthode a) ou avec la méthode b) ?

# Exercice : Propagation de la lumière dans une fibre multimode et débit de transmission

## *La dispersion modale*

Dans les fibres multimodes, la lumière peut suivre différents chemins optiques. L'existence de ces différents trajets à une conséquence très importante pour la transmission d'information. En effet si on injecte une impulsion lumineuse à l'entrée de la fibre, celle-ci va « s'élargir » tout au long de sa propagation dans la fibre.

Soit une fibre optique de longueur L, d'indice de cœur $n_1$ et d'indice de gaine $n_2$. Sur la figure précédente, lorsque $\theta_0 = \theta_{max}$ on pose $\theta_1 = \theta_{1\_max}$.

1) Quel est le chemin le plus court entre l'entrée et la sortie de la fibre. Pour le faisceau ayant suivi ce chemin calculez son temps de parcours $\tau_{min}$.

2) Exprimez en fonction de L et $\theta_{1\_max}$ la distance parcourue entre l'entrée et la sortie de la fibre par le faisceau qui parcourt le chemin le plus long. Exprimez $\tau_{max}$ le temps de parcours correspondant.

3) Exprimez $\tau_{max}$ puis $\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$ en fonction L, c, $n_1$et $n_2$. Que représente $\Delta\tau$ ?

4) Pour une fibre de 10 km de long et d'indices $n_1$=1,43 et $n_2$=1,42, calculer $\Delta\tau$ .

5) Pour une application à la télécommunication, en déduire **le débit** maximum d'information que l'on peut transmettre avec une telle fibre.

6) Expliquez pourquoi l'utilisation d'une fibre à gradient d'indice améliore les choses. Et avec une fibre monomode, qu'en est-il ?