Chapitre II : Optique et lumière

II.1. Optique et lumière :

II.1.1.Introduction :

L'optique est la branche de la physique qui traite de la lumière et ses propriétés, du rayonnement électromagnétique, de la vision ainsi que les systèmes utilisant ou émettant de la lumière. L'optique géométrique introduite par Alhazen s'est développée sur la base d'observations simples et repose sur deux principes et des lois empiriques :

✓ la propagation rectiligne dans un milieu homogène et isotrope.

✓ le principe du retour inverse qui exprime la réciprocité du trajet lumineux entre source et destination.

✓ les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et la réfraction.

La résolution des problèmes se fait à l'aide de constructions géométriques (tracés de droites matérialisant les rayons, calculs d'angles), d'où le nom d'optique géométrique. L'optique géométrique permet de retrouver la quasi-totalité des résultats concernant les miroirs, les dioptres et les lentilles ou leurs combinaisons en doublet et systèmes optiques constituant notamment les instruments d'optique.

Ce cours s'adresse plus particulièrement à des étudiants de premier cycle universitaire, domaine Science de la nature et de la vie (SNV). L'objectif de ce cours est avant tout la maîtrise des concepts de base : réfraction, réflexion, dispersion, image réelle et virtuelle, construction de rayons dans un système optique centré etc.

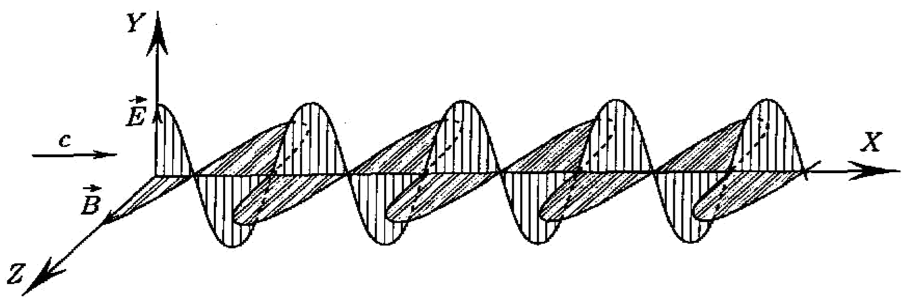
II.1.2.Nature de la lumière

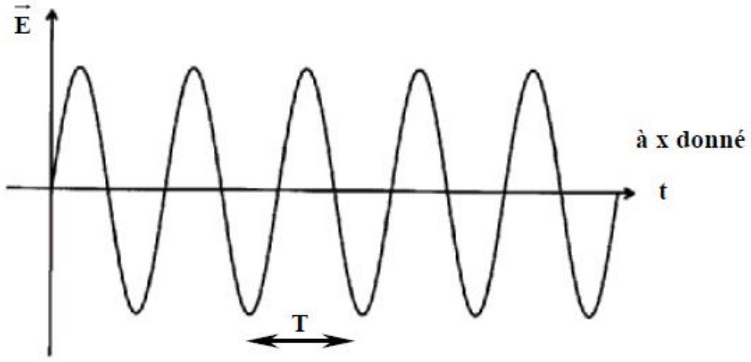
L'optique était initialement l'étude des phénomènes perçus par l'œil humain. Les termes 'optiques' et 'lumière' doivent être généralisés à d'autres récepteurs tels la plaque photographique, la peau, les radiotélescopes… qui détectent aussi des rayonnements non visibles par l'œil : Infrarouge, Ultraviolet, radio.

Au cours du 17ième siècle, deux théories s'affrontent pour expliquer les phénomènes observés :

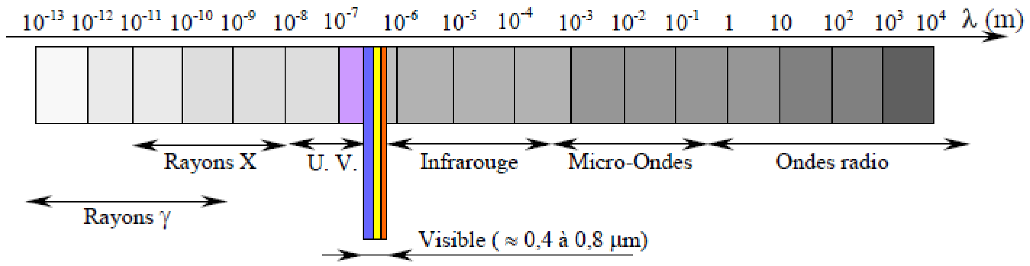
Théorie corpusculaire (Newton) : l'information est transportée par des grains de lumière, les photons (particules sans masse).

Théorie ondulatoire (Huyghens, Fresnel) : la lumière est une onde caractérisée par un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires entre eux. La figure ci-dessous représente la structure de l'onde pour un instant t donné, de plus les champs subissent une variation sinusoïdale en fonction du temps.





Ces théories ont été confirmées par la suite (Hertz, Maxwell, Einstein).
La lumière se propage sans support matériel nécessaire (à la différence du son).
Dans le vide, sa vitesse (célérité) est c = 300 000 km/s.
La lumière est caractérisée en tant qu'onde électromagnétique par :
sa fréquence ν (fixée par la source et donc indépendante du milieu de propagation) qui est le nombre d'oscillations par seconde de l'onde, ou sa période T qui est la durée d'une oscillation.
sa longueur d'onde λ qui est la distance parcourue pendant une période. Dans le vide,
Remarque: La couleur d'une radiation dépend de sa fréquence.
Le spectre des ondes électromagnétiques est présenté ci-dessous. Le domaine visible n'en couvre qu'une infime partie.



II.2 optique géometrique :

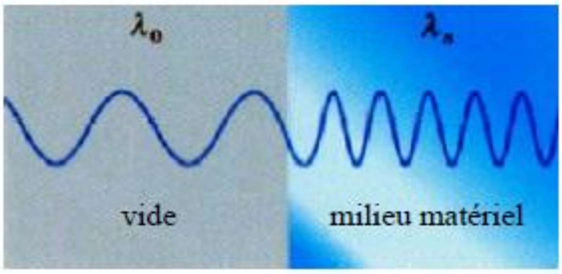
II.2.1. principe de l'optique geométrique et propagation de la lumiere :

a. La vitesse de la lumière ou célérité (c) :

La lumière se déplace dans le vide à une vitesse finie égale à 299 792 458 m/s. Rien ne peut se déplacer à une vitesse plus grande. c est une constante fondamentale de la physique.
Dans un milieu matériel (autre que le vide), la lumière se déplace à une vitesse inférieure à c. Le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide (c) à celle dans le milieu considéré (cm) s'appelle l'indice de réfraction du milieu (n).

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

Quelques exemples d'indices de réfraction : vide n = 1 air n = 1,00029 ; eau n = 1,333 ; verre n = 1,5 ; diamant n = 2,41 Lors d'un changement de milieu, la vitesse de la lumière change, et sa direction également, conformément au principe de Fermat (voir plus loin).



b. Le principe de Fermat :

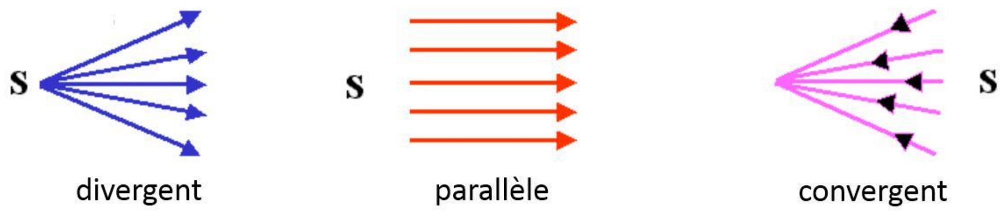
est à la base de ce modèle. Toute l'optique géométrique est bâtie autour de lui : Le trajet suivi par un rayon lumineux entre deux points A et B est tel que le temps de parcours entre ces deux points est minimum. De plus, le parcours de la lumière entre B et A est également une ligne droite. C'est le principe du retour inverse de la lumière.

1. Modèle géométrique :

Le modèle présumant l'existence de particules de lumière (nature corpusculaire de la lumière), encore appelé modèle du *rayon lumineux*, est issu des observations courantes. Il décrit simplement les lois de la réfraction et de la réflexion.

Les *faisceaux lumineux :* sont un ensemble de rayons lumineux. On trouve :

- Les faisceaux parallèles : tous les rayons sont parallèles
- Les faisceaux divergents : les rayons sont issus d'un même point
- Les faisceaux convergents : les rayons se dirigent vers un même point



c. Notions d'objet, d'image :

Un objet lumineux est un ensemble de points sources qui émettent de la lumière. Ils peuvent produire de la lumière par eux -mêmes (soleil, lampe, flamme), ce sont alors des sources primaires. Ils peuvent également la renvoyer (tout objet éclairé par le soleil), ce sont alors des sources secondaires.

Un appareil ou système optique : est un ensemble de milieux transparents séparés par des surfaces dioptriques ou réfléchissantes.

Soit un point objet A et un système optique (S). Si les rayons issus de A (ou se dirigeant vers A) traversent (S) et convergent vers A' (ou semblent issus de A'), A' est appelé image de A.

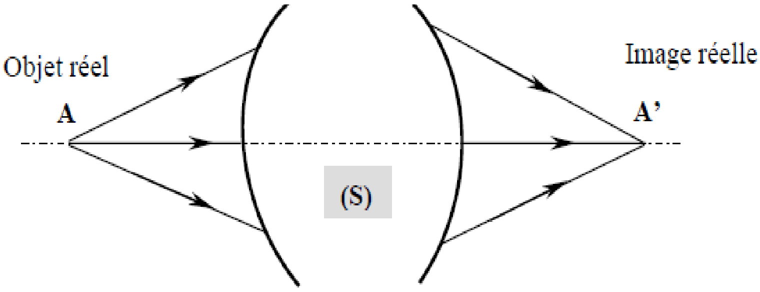
Un objet et une image peuvent être de nature réelle ou virtuelle:

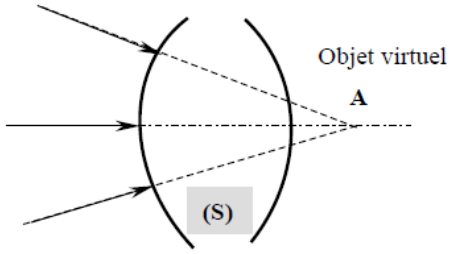
Objet réel : La lumière provient réellement de A (on peut toucher A).

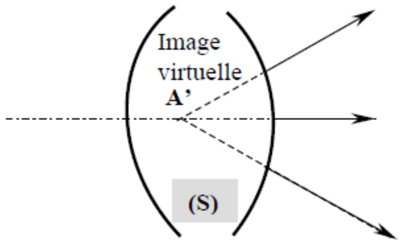
Image réelle : La lumière passe effectivement par A' (on peut visualiser A' sur un écran).

Objet virtuel : A est le point de rencontre d'un faisceau de rayons convergents coupé par le système optique.

Image virtuelle : A' est le point d'où semblent provenir les rayons émergeant du système optique.



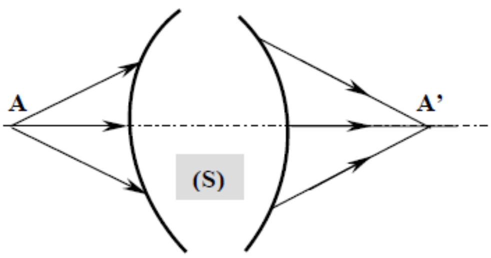




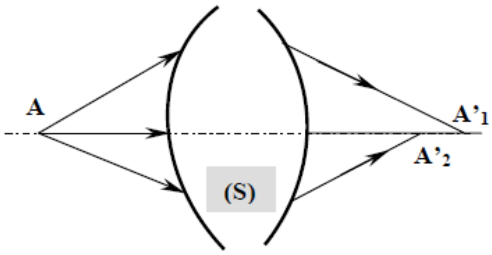
On parle également d'***espace objet réel,*** d'***espace objet virtuel,*** d'***espace image réelle,*** d'***espace image virtuelle.***

d. Stigmatisme :

Un système optique (S) est stigmatique lorsque à chaque point A d'un objet correspond un point **A'** de l'image. On dit que **A** et **A'** sont conjugués dans (S). Autrement dit, tous les rayons issus de A qui traversent (S) passent par **A'** : Il y a stigmatisme absolu. On parle de stigmatisme approché lorsque tous les rayons passent au voisinage de **A'**.



Stigmatisme absolu



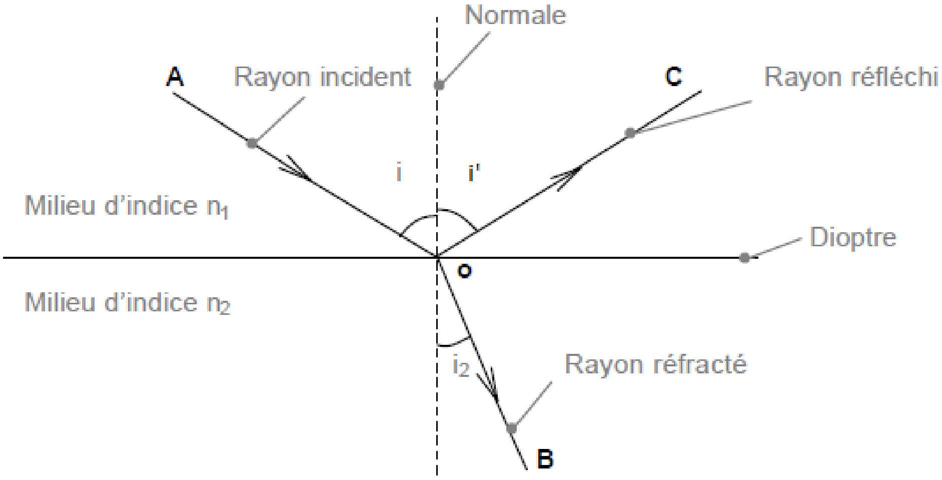
Stigmatisme approché

II.2.2. Réfraction et Lois de Snell-Descartes

a. Lois de Snell-Descartes

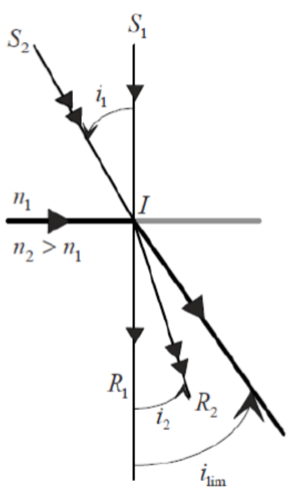
Enoncés

La lumière se propage donc en ligne droite dans un milieu homogène, lorsqu'elle rencontre un deuxième milieu homogène, elle change de direction et donne généralement lieu à une onde <u>réfléchie</u> et à une onde <u>réfractée</u>.
La surface de séparation entre deux milieux transparents est appelée <u>dioptre</u>.
L'angle d'incidence i et l'angle de réflexion i' sont respectivement les angles que forment le rayon incident et le rayon réfléchi avec la normale à l'interface ρ, orientée vers le milieu d'incidence.
1ère loi : Le rayon incident SI, le rayon réfléchi IR et la normale IN à la surface sont dans le même plan appelé plan d'incidence.
2ème loi : Les angles d'incidence i et de réflexion i' sont égaux. **i=i'**
3ième loi :Les directions des rayons incident et réfracté sont telles que
n1 sin i1 = n2sin i2 et sont situées de part et d'autre de la normale.



b. Angle limite

Cas où *n*1 < *n*2 : réfraction limite
Le rayon lumineux passe du milieu 1 moins réfringent au milieu 2 plus réfringent.
Nous avons alors :
n1 sin (i) = n2 sin (r) , avec n2 > n1

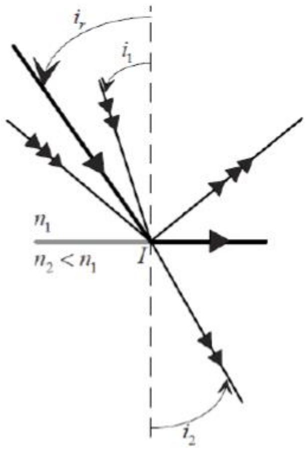


Il en résulte que *sin i2 < sin i1* ; les angles *i1* et *i*2 étant compris entre 0 et $\pi/2$, soit *i*2 < *i*1. Le rayon réfracté se rapproche donc de la normale.

Un rayon incident normal (*S1I*), pour lequel *i1=0*, entre sans déviation (*i2 = 0*). Lorsqu'i1 croît, *i*2 croît aussi tout en restant inférieur à *i*1.
A l'incidence rasante ($i1 = \pi/2$), l'angle de réfraction est maximal (angle de réfraction limite noté *ilim*) et vaut : sin $ilim$ = $n1$/ $n2$

c. Cas où n1 > n2 : réflexion totale

Le rayon lumineux passe maintenant du milieu 1 plus réfringent au milieu 2 moins réfringent. La troisième loi de Snell-Descartes implique alors que :
*i*1 < *i*2:



Le rayon réfracté s'écarte donc de la normale et l'angle de réfraction est maximal ($i2 = \pi/2$) pour un angle d'incidence limite *ir* tel que : $\sin ir = n2\ /n1$

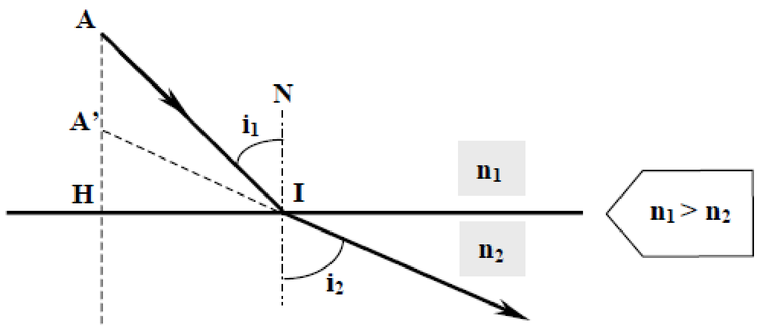
II.2.3. Dioptre plan :

a. Définition :

C'est une surface plane dioptrique séparant deux milieux transparents homogènes d'indices n_1 et n_2.

b. Construction d'image et fomule de congegaison :

Choisissons un premier rayon incident en **I**, si $\mathbf{n_1 > n_2}$, le réfracté s'éloigne de la normale et $\mathbf{i_2 > i_1}$. Comme deuxième rayon, on prendra un rayon perpendiculaire à la surface (incident en **H**), il n'est pas dévié et **A'** se trouve donc au-dessous de **A**. **A'** est virtuelle.



2. La formule de conjugaison du dioptre est :

$$A \xrightarrow{D_p(n1,n2,H)} A'$$

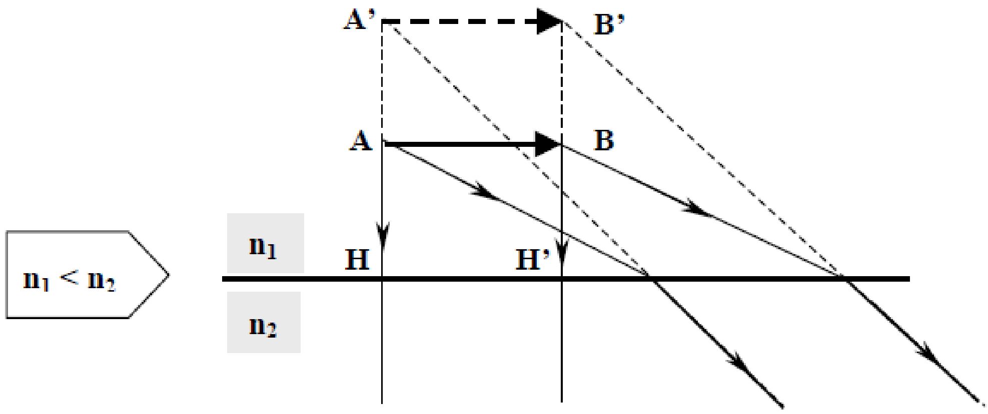
$$\boxed{\frac{\overline{HA}}{n1} = \frac{\overline{HA'}}{n2}}$$

Formule de conjugaison du dioptre

c. Construction d'image d'un objet non ponctuel :

L'image d'un objet AB parallèle à la surface du dioptre, est A'B' parallèle à la surface, car **AH = BH'** et **A'H = B'H'**). Le grandissement est :

$$\Gamma = \frac{A'B'}{AB} = 1$$



d. Association de dioptres plans :

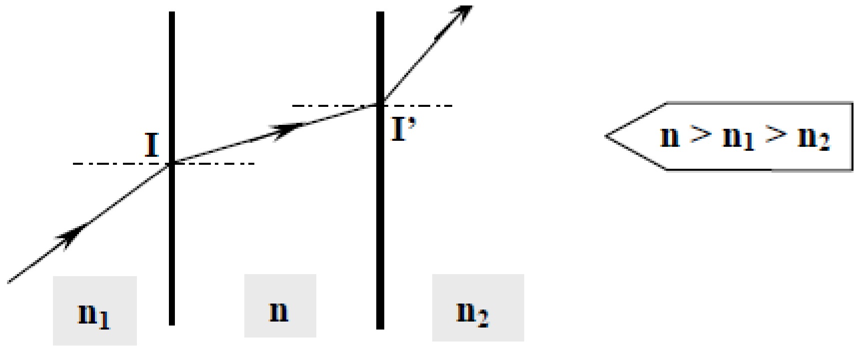
1. Lame à faces parallèles :

1.1. Définition :

Ce terme désigne un milieu transparent homogène limité par deux surfaces planes parallèles.

- Dans le cas où la lame, d'indice **n** sépare deux milieux d'indices différents $\mathbf{n_1}$ et $\mathbf{n_2}$, le rayon émergent est dévié.

1.2. Marche du rayon :

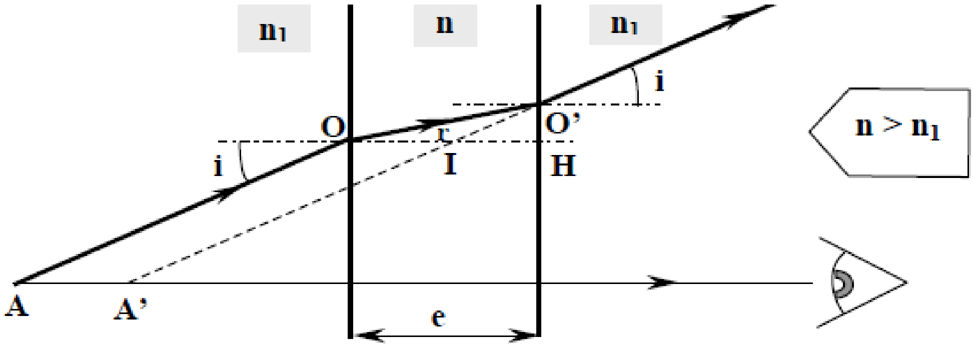


1.3. Construction d'image :

Dans le cas où la lame d'indice **n** est plongée dans un milieu d'indice $\mathbf{n_1}$, le rayon émergent est seulement translaté

L'image **A'** d'un point objet réel **A** est virtuelle et l'on a, pour une lame d'épaisseur **e**

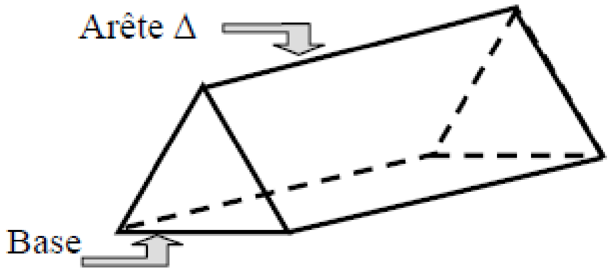
$$AA' = OI = OH - IH \approx e\left(1 - \frac{n_1}{n}\right).$$



2. Prisme :

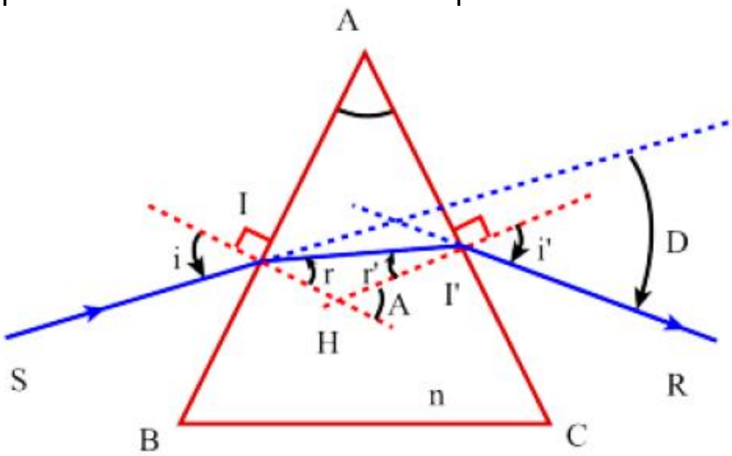
2.1. Définition :

On appelle prisme, en optique, un milieu transparent limité par deux faces planes non parallèles (dioptres). Il est constitué de verre, c'est un milieu homogène, transparent et isotrope. L'intersection des deux faces du prisme forme l'arête du prisme, caractérisée par un angle *A*. La base du prisme est la troisième face, dont les bords sont généralement parallèles à l'arête. Le plan d'incidence est le plan formé par le rayon incident et la normale à la surface d'entrée du prisme au point d'incidence.



2.2. Etude de la marche du rayon :

Soit SI un rayon incident quelconque qui frappe en I la face d'entrée AB du prisme ; provenant d'un milieu moins réfringent que celui du prisme, ce rayon subit en I le phénomène de réfraction en respectant les deux lois de Descartes.



Si *n* est l'indice du prisme, les lois de Snell-Descartes en *I* et *I'* imposent les deux relations suivantes :

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

Compte tenu de la définition du prisme, il est clair que le rayon émergent ne peut être dans le prolongement du rayon incident, pas plus qu'il ne peut lui être parallèle. Le prisme a donc bien le pouvoir de dévier la lumière, et cette déviation a pour effet dans le cas général, de rabattre vers la base BC du prisme le rayon lumineux.
L'angle de déviation D est par définition l'angle dont il faut faire tourner le rayon incident SI pour l'amener dans la direction du rayon émergent I'R. Cette déviation est donc la somme de deux déviations successives qui ont lieu dans le même sens, l'une à l'entrée, l'autre à la sortie du prisme, soit :

$$\mathbf{D = (i - r) + (i' - r')}$$

D'autre part, dans le triangle ***IHI'***, nous voyons que : $\pi - A + r + r' = \pi$
Soit : $A = r + r'$
Ce qui entraîne : Les formules du prisme se résument de la façon suivante :
Les formules du prisme se résument de la façon suivante :

$$\sin i = n \sin r;$$
$$\sin i' = n \sin r'$$
$$A = r + r'$$
$$D = i + i' - A$$

2.3. Le minimum de déviation et sa mise en évidence :
En utilisant les formules du prisme, on peut retrouver cette propriété : La déviation est minimum si dD / di1 = 0.

- dD = di1 + di2
- dr1 + dr2 = 0
- cos i1.di1 = N.cos r1.dr1
- cos i2.di2 = N.cos r2.dr2

En éliminant dr1, dr2 = − dr1 et di2, il vient :

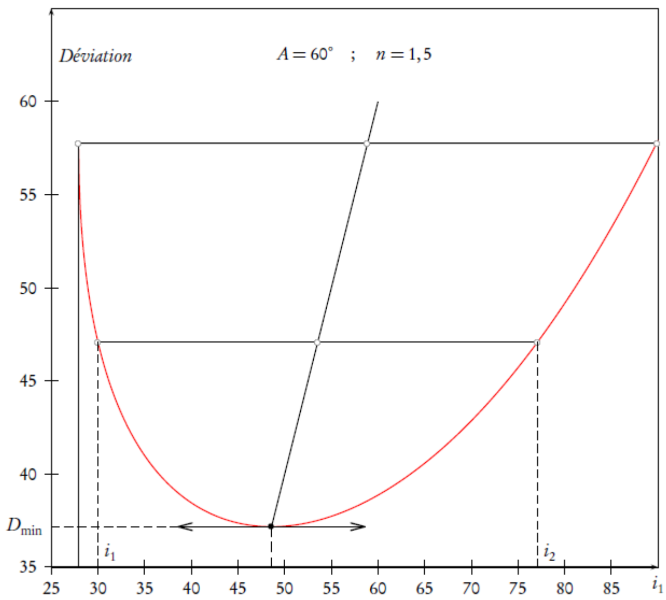
$$\frac{dD}{di_1} = \left(1 - \frac{\cos i_1 . \cos r_2}{\cos i_2 . \cos r_1}\right) di_1$$

Cette expression s'annule si cos i1.cos r2 = cos i2.cos r1.
En élevant au carré et en remplaçant cos² i par (1 − sin² i), on tire :

$$\left(1 - \frac{1}{N^2}\right)\left(\sin^2 i_1 - \sin^2 i_2\right) = 0$$

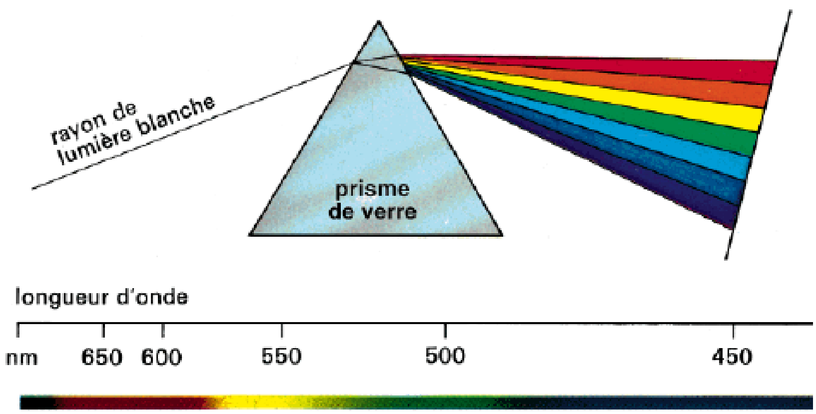
Comme N est supérieur à 1 le premier terme ne peut être nul. Il faut sin² i1 = sin² i2
Soit i2 = ± i1. La solution i2 = − i1 a été introduite par l'élévation au carré.
La déviation est minimum si i2 = i1 = i0 et donc r2 = r1 = r0. Le trajet du rayon est alors symétrique par rapport au plan médiateur du dièdre du prisme.

$$i_1 = i_2 \quad ; \quad r_1 = r_2 = \frac{A}{2}$$
$$D = 2i_1 - A \quad ; \quad i_1 = \frac{A+D}{2}$$
$$\Longrightarrow \quad \sin\frac{A+D}{2} = n \sin\frac{A}{2}$$



2.4. Dispersion de la lumière :

Nous avons vu que l'indice de réfraction dépendait de la longueur d'onde (couleur) de la lumière visible. C'est ce que l'on appelle la dispersion. A cause de ce phénomène, un prisme disperse (décompose) une lumière blanche en ses différentes composantes. L'ensemble de ces composantes constituent le spectre de la lumière blanche (on répertorie généralement sept couleurs dominantes : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet). Nous savons, d'une part, que la déviation croît avec l'indice de réfraction, et que, d'autre part, *n* augmente quand la longueur d'onde diminue (loi de Cauchy). Cela signifie que la déviation augmente quand la longueur d'onde diminue : les radiations de courte longueur d'onde sont donc les plus déviées par le prisme (le violet est plus dévié que le rouge).



II.2.4. Dioptre sphérique :

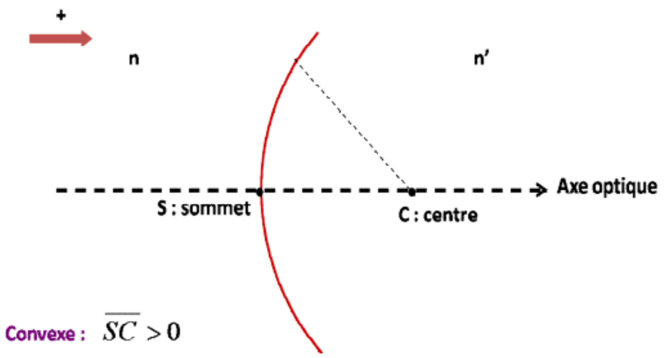
1. Définition :

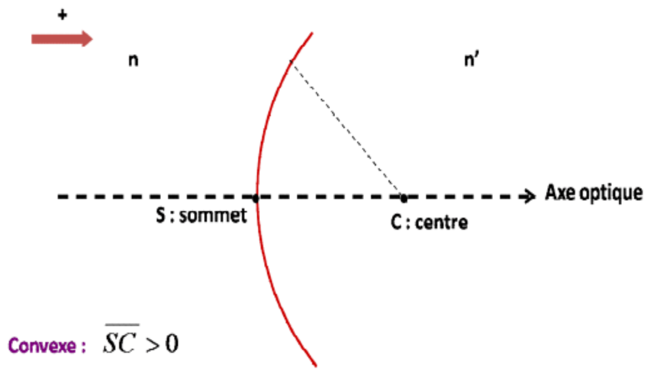
Un dioptre sphérique sépare deux milieux d'indice différents *n1* et *n2*, et possède un rayon de courbure *R* (Figure1aet Figure1b).

Il est caractérisépar :

C *:* centre du dioptre

***S* :** sommet du dioptre
***SC* :** rayon de courbure. Compte tenu de sa définition, il peut être positif ou négatif.





2. Construction de l'image donnée par un dioptre sphérique :

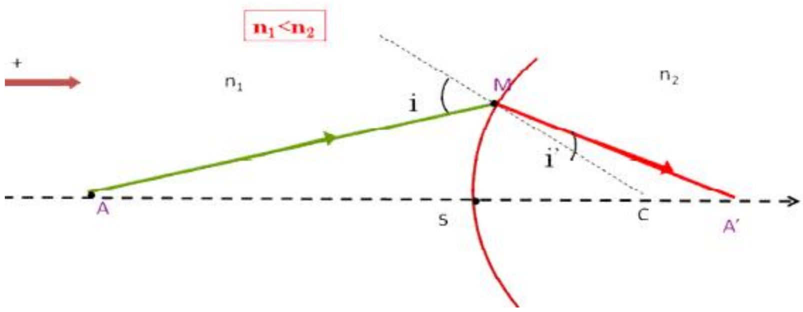
Soit un point *A* de l'axe principal. Pour construire l'image ***A'*** de A, prenons un rayon issu de ***A,*** frappant le dioptre en ***M***.

- **Dioptre sphérique convexe**

Cas *n1 < n2:*

$\boxed{\text{O.R.}}$ $\qquad\qquad$ $\boxed{\text{I.R}}$

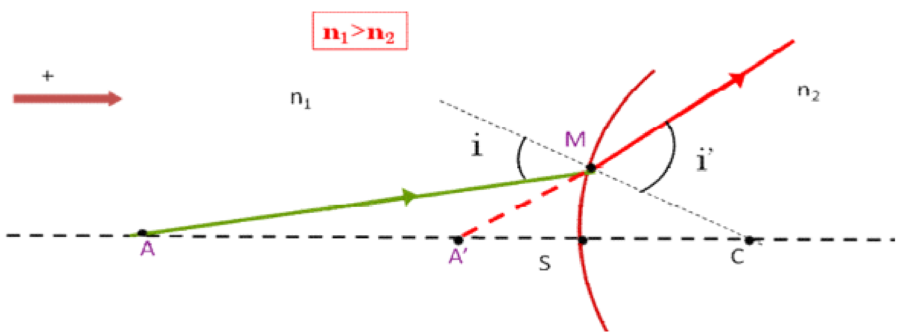
$$A \xrightarrow{\text{Dioptre } (n_1,n_2)} A'$$



Cas *n1 > n2:*

$\boxed{\text{O.R.}}$ $\qquad\qquad$ $\boxed{\text{I.V}}$

$$A \xrightarrow{\text{Dioptre } (n_1,n_2)} A'$$

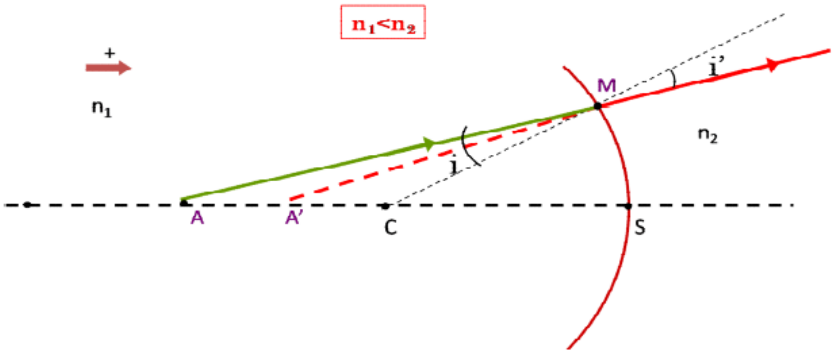


- **Dioptre sphérique concave**

Cas *n1 < n2:*

A' est plus proche de *S* que *A*.

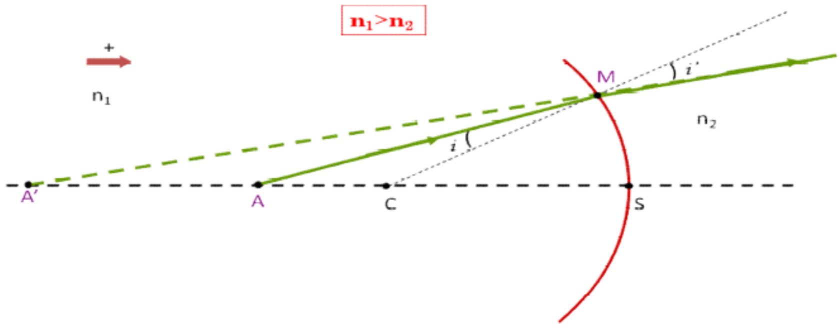
$$\underset{\text{O.R.}}{A} \xrightarrow{\text{Dioptre }(n_1,n_2)} \underset{\text{I.V}}{A'}$$



Cas *n1 > n2:*

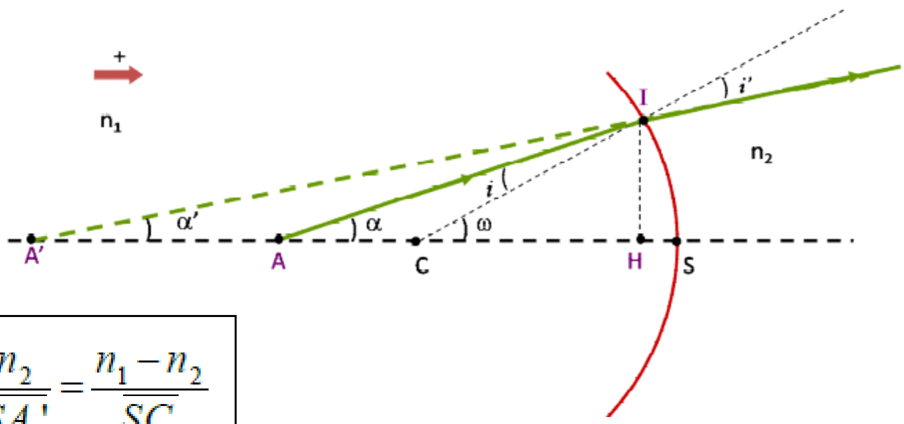
A' est plus éloignée de *S* que *A*.

$$\underset{\text{O.R.}}{A} \xrightarrow{\text{Dioptre }(n_1,n_2)} \underset{\text{I.V}}{A'}$$



3. **Relation de conjugaison avec origine au sommet :**

Appliquons la relation des sinus aux deux triangles *CAI* et *CA'I :*



$$\boxed{\frac{n_1}{\overline{SA}} - \frac{n_2}{\overline{SA'}} = \frac{n_1 - n_2}{\overline{SC}}}$$

Cette relation est appelée relation de conjugaison avec origine au sommet.

4. Association de dioptres sphériques – Lentilles minces :

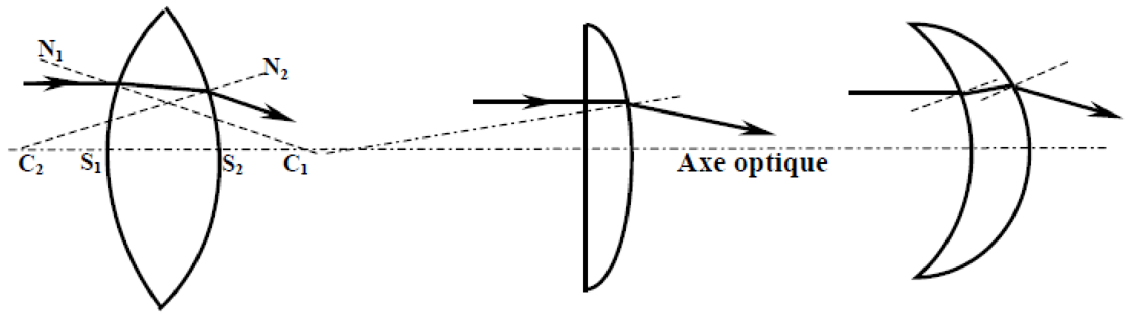
4.1. Définition :

Une lentille est un système optique où le milieu transparent et homogène est limité par deux surfaces dioptriques en général sphériques. La droite qui joint les centres de ces deux sphères est appelé <u>axe optique</u> de la lentille.
On se limitera au cas où les lentilles sont plongées dans deux milieux extrêmes identiques (en général de l'air).

4.2. Les différents types de lentilles

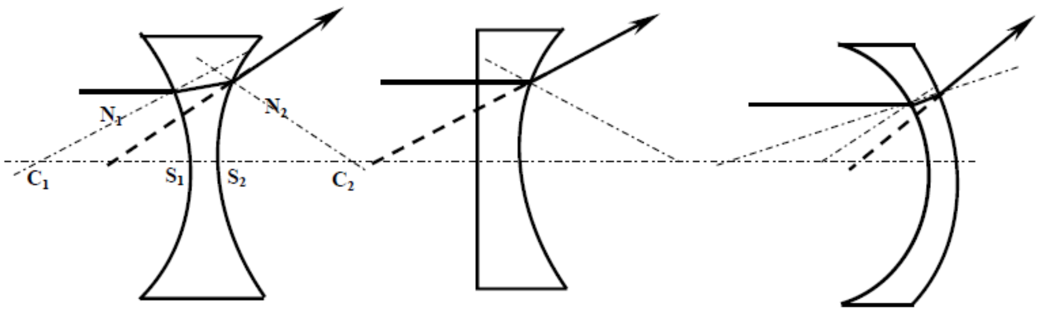
- **Lentille convergent :**

Ce sont les lentilles biconvexes, plan-convexes, les ménisques convergents.



- **Lentille divergent :**

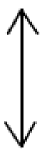
Ce sont les lentilles biconcaves, plan-concaves, les ménisques divergents.

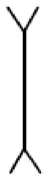


4.3. Les lentilles minces :

4.3.1. Définition :

Une lentille est mince si son épaisseur, distance entre les sommets des deux dioptres $\mathbf{S_1}$ et $\mathbf{S_2}$ est très petite devant les rayons de courbure $\mathbf{S_1C_1}$ et $\mathbf{S_2C_2}$ des deux dioptres.
Les sommets $\mathbf{S_1}$ et $\mathbf{S_2}$ sont pratiquement confondus, on les appelle **S**, sommet de la lentille.

Lentilles convergentes 

Lentilles divergentes 

4.3. 2. Centre optique :

Au voisinage de **S**, la lentille peut être assimilée à une lame à faces parallèles très mince, donc les rayons émergents dans ce voisinage sont parallèles aux rayons incidents, et la translation étant très petite (puisque l'épaisseur de la lame est très petite), on peut considérer que les rayons passant par **S** ne sont pas translatés.

Le sommet **S** est donc un centre optique, on le note souvent **O**.

4.3. 3. Foyers – Distances focales :

Etant donné qu'il n'y a pas en général stigmatisme rigoureux pour un dioptre plan, ni pour un dioptre sphérique (à admettre), il n'y a pas de stigmatisme rigoureux pour une lentille. On se placera donc dans les conditions de Gauss pour avoir un stigmatisme approché.

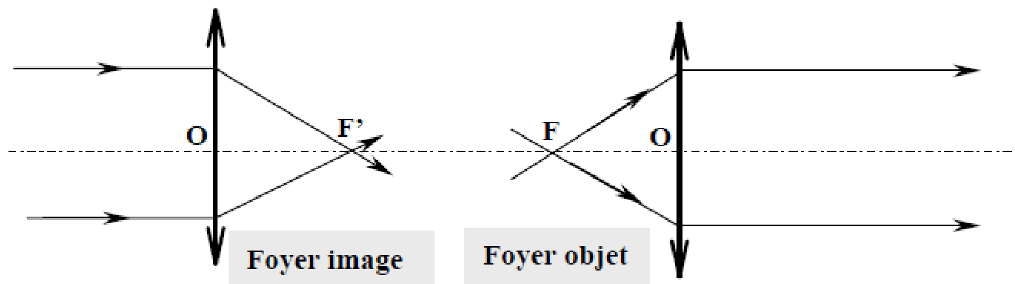
On remarquera qu'il y a stigmatisme rigoureux pour les points appartenant à la surface de la lentille.

- ✓ ***FOYER IMAGE – FOYER OBJET :***

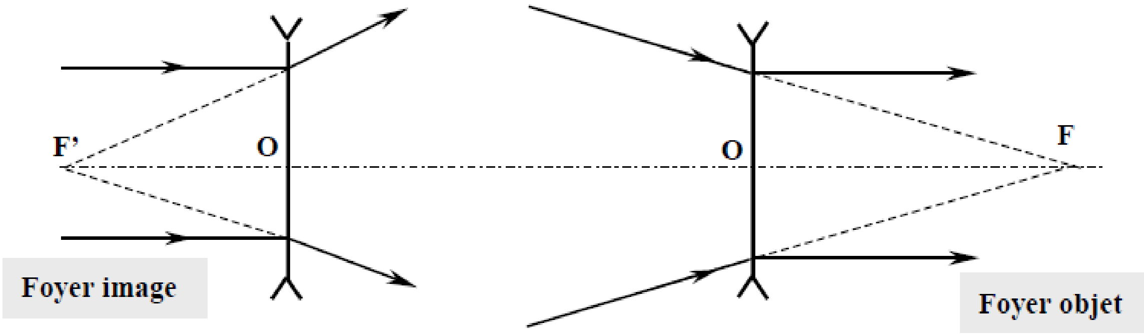
Un rayon incident parallèle à l'axe optique, après traversée de la lentille coupe l'axe optique au foyer image **F'**. (Ou semble provenir de **F'** si la lentille est divergente).

Un rayon émergent parallèle à l'axe optique provient d'un rayon qui coupe l'axe optique au foyer objet **F**. (Ou semble couper l'axe en **F** si la lentille est divergente).

Les foyers d'une lentille convergente **sont réels**.



Les foyers d'une lentille divergente **sont virtuels**.



✓ ***DISTANCES FOCALES***

- La distance focale image est $\mathbf{f' = \overline{OF'}}$
- La distance focale objet est $\mathbf{f = \overline{OF}}$

* On prendra un axe orienté dans le sens de propagation de la lumière incidente (souvent de la gauche vers la droite). Toutes les grandeurs seront repérées avec un signe, à partir d'une origine généralement prise en O.
* Pour repérer le sens des images par rapport à celui des objets, on oriente aussi l'axe vertical (souvent vers le haut), son origine étant sur l'axe optique.
* Pour une lentille convergente f' > 0 et f < 0
* Pour une lentille divergente f' < 0 et f > 0.

4.3. 4. Expression des distances focales :

On admet la relation suivante :

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{\overline{OC_1}} - \frac{1}{\overline{OC_2}}\right) = -\frac{1}{f} \qquad (\Rightarrow \overline{OF'} = -\overline{OF})$$

(On prendra garde à la convention de signe pour $\mathbf{OC_1}$ et $\mathbf{OC_2}$)

On appelle souvent 'distance focale' d'une lentille, sa distance focale image **f '**.

- On appelle 'vergence' d'une lentille, la grandeur **' C =1/f' '**

f' La distance focale s'exprimant en mètres, **C** s'exprime en $\mathbf{m^{-1}}$ ou en dioptries (abréviation : δ).

- **F** et **F'** sont les conjugués de points situés à l'infini, ils ne sont pas conjugués entre eux.

4.3. 5. Image d'un objet étendu perpendiculaire à l'axe optique :

On admettra que la lentille est aplanétique : c'est à dire qu'il y a stigmatisme pour **A** et **A'** situés sur l'axe et aussi pour **B** et **B'** situés respectivement près de **A** et **A'** dans les plans de front passant par **A** et **A'**.

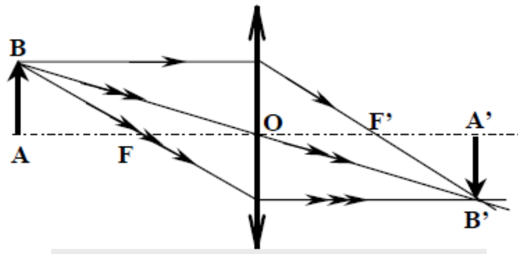
CONSTRUCTIONS :

On utilise les propriétés données dans le paragraphe précédent :

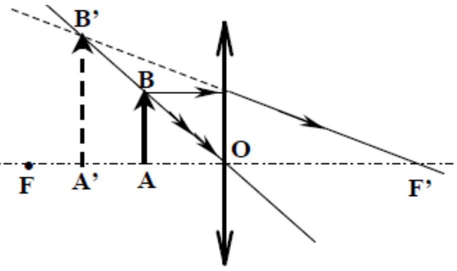
- ❖ Un rayon incident parallèle à l'axe sort en passant par F'.
- ❖ Un rayon incident passant par F sort parallèlement à l'axe.
- ❖ Un rayon passant par O n'est pas dévié.

- Deux des trois rayons suffisent pour déterminer B'
- A' s'obtient en abaissant la perpendiculaire passant par B'

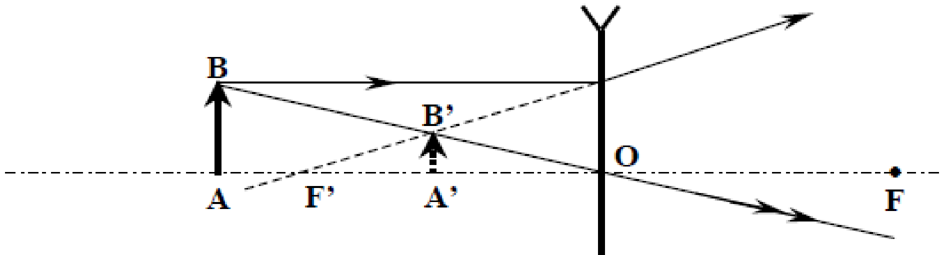
Différents cas peuvent se présenter : Objet réel, objet virtuel, image réelle, image virtuelle. Image droite, renversée



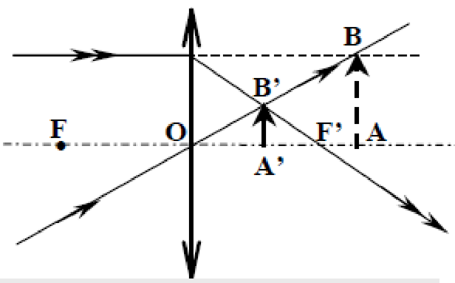
Objet réel - Image réelle renversée



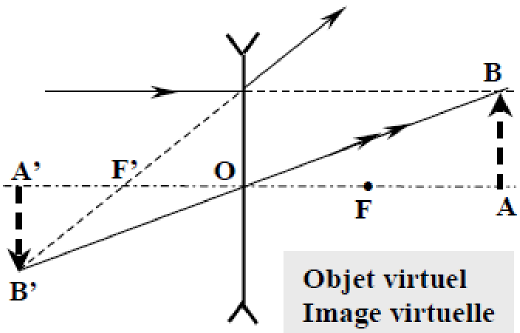
Objet réel - Image virtuelle droite



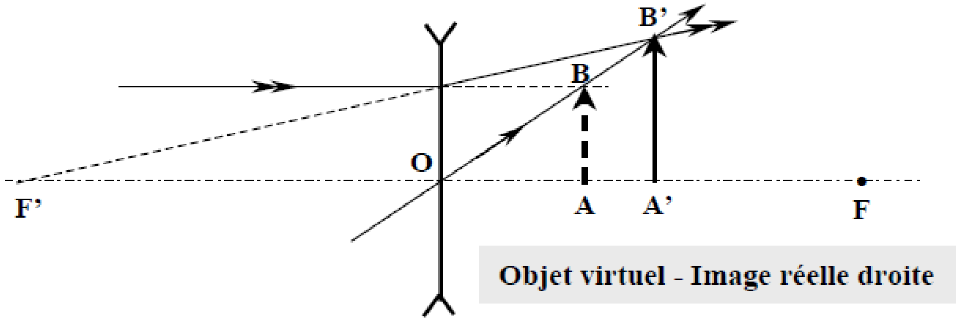
Objet réel - Image virtuelle droite



Objet virtuel - Image réelle droite

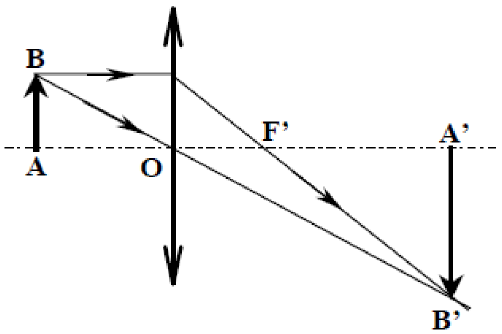


Objet virtuel
Image virtuelle
renversée



4.3. 6. Formule de conjugaison Relient la position de l'objet à celle de l'image :

Les points principaux étant confondus avec le centre optique, on retrouve très vite les formules des lentilles minces avec origine au centre optique telles qu'elles ont été admises dans le secondaire :



$$\begin{cases} \dfrac{-1}{OA} + \dfrac{1}{OA'} = \dfrac{1}{f} \quad pour \quad une\ L.Conv \\ \dfrac{-1}{OA} + \dfrac{1}{OA'} = \dfrac{1}{-f} \quad pour\ une\ L.Div \end{cases}$$

RELATIONS DE GRANDISSEMENT :

$$\Gamma = \frac{\overrightarrow{\mathrm{OA'}}}{\overrightarrow{\mathrm{OA}}} = \frac{\mathrm{A'B'}}{\mathrm{AB}}$$

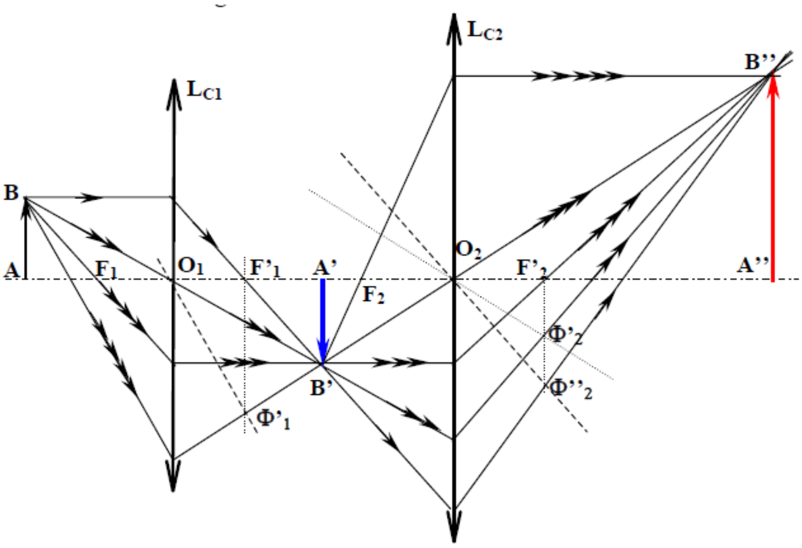
4.3. 7. Association de lentilles minces :

1. SYSTEME DE DEUX LENTILLES NON ACCOLEES :

De nombreuses combinaisons sont possibles. Deux cas sont présentés :

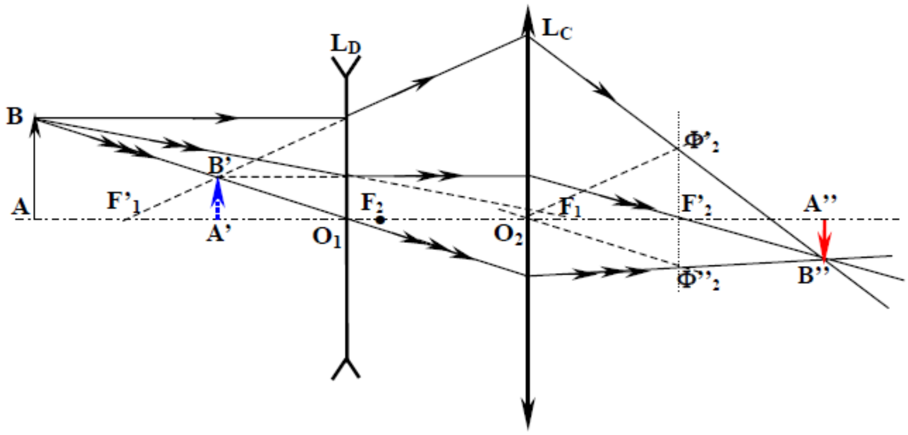
- **Deux lentilles convergentes :**

L'image intermédiaire A'B' formée par la première lentille convergente est réelle et est reprise comme objet réel par la seconde lentille. Si la distance $\mathbf{O_1O_2}$ entre les deux lentilles est supérieure à $\mathbf{f'_1}$ + $\mathbf{f'_2}$, l'image finale est réelle et droite.



- **Une lentille divergente et une lentille convergente :**

L'image intermédiaire virtuelle **A'B'** est reprise comme objet réel par la lentille convergente pour donner l'image réelle renversée **A''B''**.



2. LENTILLES ACCOLEES :

Lorsque l'on associe plusieurs lentilles, tant que l'épaisseur totale est faible, on a :

$$\left.\begin{aligned}
&\text{Pour la } 1^{\text{ère}} \text{ lentille : } && -\frac{1}{p}+\frac{1}{p_1}=\frac{1}{f'_1} \\
&\text{pour la } 2^{\text{ième}} \text{ lentille : } && -\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p_2}=\frac{1}{f'_2} \\
&\text{pour la } n^{\text{ième}} \text{ lentille : } && -\frac{1}{p_{n-1}}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f'_n}
\end{aligned}\right\}$$

La somme membre à membre donne :

$$-\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{f'_i}$$

On a donc, pour une association de **n** lentilles accolées: $\mathbf{C}=\sum_{i=1}^{n}\mathbf{C_i}$

II.2.5. Réflexion et Miroir :

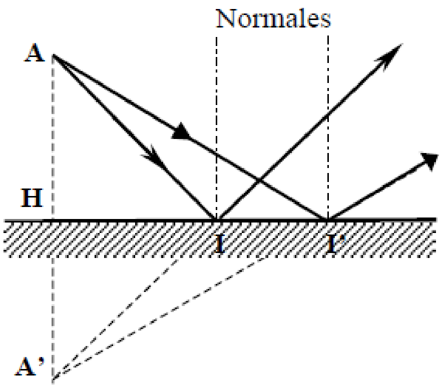
1. **Miroir plan :**

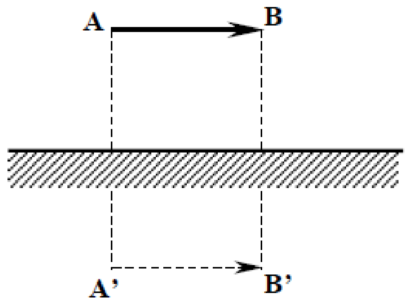
a. **Définition**

Soit une surface plane parfaitement réfléchissante ou un dioptre plan pour lequel on ne s'intéressera qu'au rayon réfléchi.

Tous les rayons issus de la source réelle **A** se réfléchissent en suivant la 2$^{\text{ième}}$ loi de Snell-Descartes et semblent provenir de **A'**, symétrique de **A** par rapport au miroir. (Le triangle **AIA'** est isocèle, car les angles en **A** et en **A'** sont égaux, donc **HI** est la médiatrice de **AA**'). **A'** est situé derrière le miroir, c'est une image virtuelle.

b. **Construction d'image et formule de conjugaison :**





Formule de conjugaison : **AH = HA'.**

Le grandissement est : $\Gamma = \frac{A'B'}{AB} = 1$

Remarques :

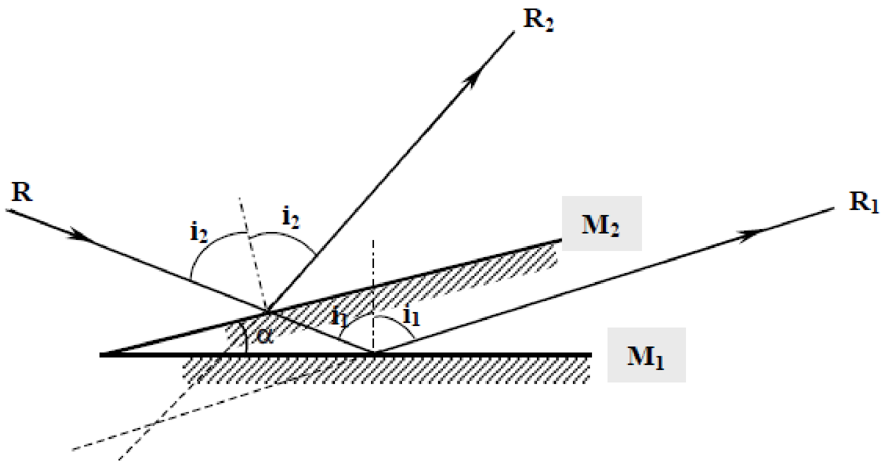
- Si **A** était virtuelle, l'image **A'** serait réelle. (⇔ **A** et **A'** sont de nature différente).
- **A'** est symétrique de **A** par rapport au miroir quel que soit **I** ⇒ le miroir plan est rigoureusement stigmatique.
- Si l'objet non ponctuel **AB** est parallèle au miroir, **A'** et **B'** sont respectivement symétriques de **A** et de **B** par rapport au miroir. ⇒ **A'B'** = **AB** et l'image est 'droite' (même sens que l'objet).

c. **APPLICATION : Rotation d'un miroir**

Le miroir dans sa position initiale $\mathbf{M_1}$ réfléchit le rayon incident **R** dans la direction $\mathbf{R_1}$.

Après rotation du miroir d'un angle α, le miroir dans la position $\mathbf{M_2}$ réfléchit le même rayon incident dans la direction $\mathbf{R_2}$.

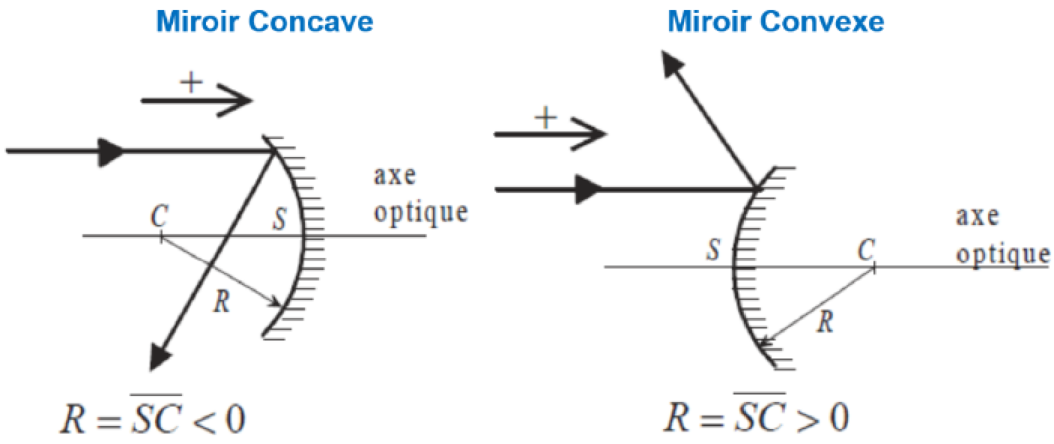
L'angle entre $\mathbf{R_2}$ et $\mathbf{R_1}$ est $\mathbf{2i_1 - 2i_2 = 2(i_1 - i_2)}$. $\mathbf{i_1 - i_2}$ est l'angle entre les deux normales aux miroirs, donc $\mathbf{i_1 - i_2 =}$ α et le rayon réfléchi a tourné dans le même sens que le miroir d'un angle égal à **2**α



2. Miroir sphérique :

2.1. Définition :

On appel miroir sphérique S une surface sphérique rendue réfléchissante par un dépôt métallique. On distingue deux types de miroirs sphériques : si la réflexion se produit vers l'intérieur de la sphère, le miroir est dit concave ; si la lumière se réfléchit vers l'extérieur de la sphère, le miroir est dit convexe.

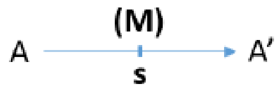


Un miroir sphérique est caractérisé par :
– Le centre *C* de la sphère appelé centre du miroir.
– Le point *S* appelé sommet du miroir.
– L'axe optique, qui est l'axe de symétrie de révolution du miroir, passant par les points *C* et *S*.
– Le rayon de la sphère *R* = *SC*, appelé rayon de courbure du miroir, quantité algébrique qui est négative pour un miroir concave et positive pour un miroir Convexe.

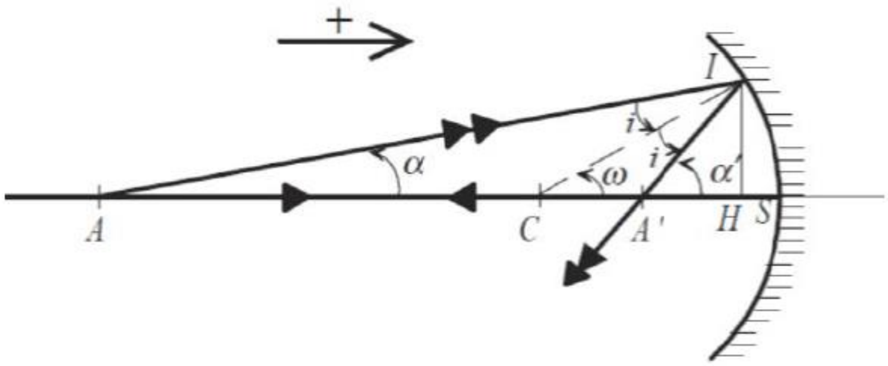
Remarque : en optique géométrique, la mesure des distances est algébrisée. Le long de l'axe optique, on choisit comme sens positif le sens de propagation de la lumière (en général de la gauche vers la droite).

2.2. Construction d'image et formule de conjugaison :

Il existe alors une relation entre les positions d'un objet ***A*** et de son image ***A'*** appelée relation de conjugaison.



Considérons un point objet réel ***A*** situé sur l'axe optique d'un miroir concave. L'image ***A'*** de ***A*** est située au point d'intersection de deux rayons lumineux quelconques issus de *A*. Soit un rayon confondu avec l'axe optique, il se réfléchit sur lui-même : ***A'*** est donc sur l'axe optique.
Considérons le rayon émis depuis ***A*** et qui se réfléchit au point *I* en accord avec les lois de la réflexion. ***A'*** se trouve au point d'intersection du rayon réfléchi et de l'axe.



Dans les triangles *AIC* et *A'IC* la somme des angles intérieurs doit être égale à π, soit :
$i + \alpha + (\pi - \omega) = \pi$ *et donc :* $i = \omega - \alpha$
$i + \omega + (\pi - \alpha') = \pi$ *et donc :* $i = \alpha' - \omega$

D'où la relation suivante entre α, ω et α' :
$2\,\omega = \alpha + \alpha'$
Dans les conditions de Gauss, les points *H* et *S* sont pratiquement confondus, et les angles α, ω et α' peuvent être assimilés à leurs tangentes selon :

$$\alpha = \frac{\overline{IS}}{\overline{SA}}$$

$$\alpha' = \frac{\overline{IS}}{\overline{SA'}}$$

$$\omega = \frac{\overline{IS}}{\overline{SC}}$$

On obtient finalement la relation de conjugaison du miroir sphérique avec origine au sommet S :

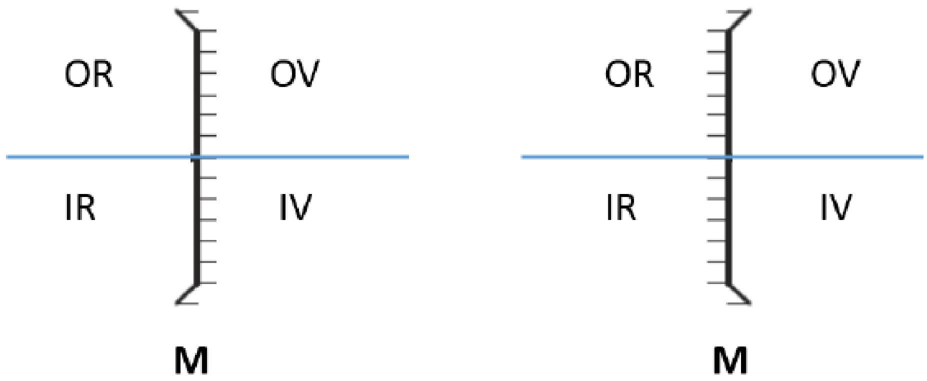
$$\frac{1}{\overline{SA}}+\frac{1}{\overline{SA'}}=\frac{2}{\overline{SC}}$$

Foyer Image F' :
C'est le conjugué d'un objet A à l'infini.
A (∞) → A' ≡ F'
On trouve finalement : SF'=SC/2
Foyer Objet F :
C'est le conjugué d'une image A' à l'infini.
A ≡ F → A' (∞)
On trouve finalement : SF=SC/2
Grandissement :
Si *AB* a pour image *A'B'*, le grandissement γ est le rapport algébrique de la taille de l'image à celle de l'objet :

$$\boldsymbol{\Gamma}=\frac{\mathbf{A'B'}}{\mathbf{AB}}=\frac{\mathbf{SA'}}{\mathbf{SA}}$$

2.3. Les Caractéristiques de l'image :

- La position : SA
- La nature : → Dire si elle est réelle ou virtuelle :



→ Dire si elle est droite ou renversée :
- Si $\boldsymbol{\Gamma}$>0: Image droite
- Si $\boldsymbol{\Gamma}$ <0: Image renversée
→ Comparer la taille de l'image par rapport à la taille de l'objet :
- Si | $\boldsymbol{\Gamma}$ |>1: Image agrandie
- Si | $\boldsymbol{\Gamma}$ |<1: Image réduite
- Si | $\boldsymbol{\Gamma}$ |=1: La taille de l'image égale la taille de l'objet

II.2.6. Les instruments optique

1. Introduction :

Il existe deux familles d'instruments :

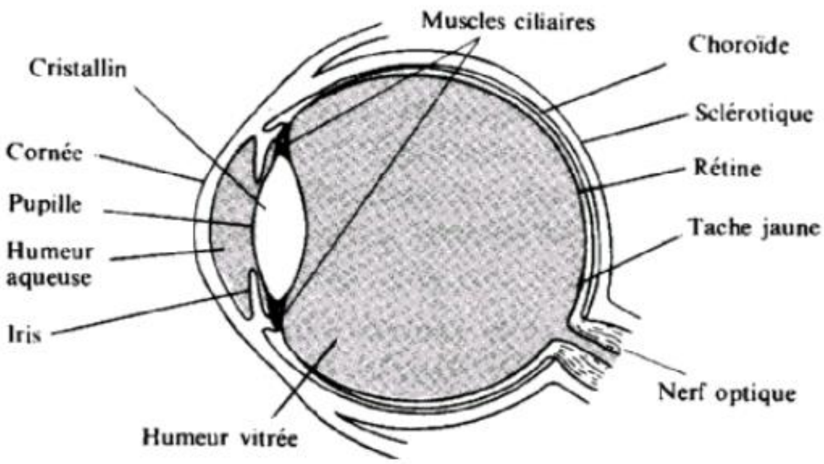
- Les appareils <u>projectifs</u> : Ils donnent d'un objet réel ou virtuel, une image réelle que l'on recueille sur un écran. Par exemple l'appareil photographique, l'oeil,..
- Les appareils <u>oculaires</u> : Ils donnent une image virtuelle que l'on observe à l'oeil. Par exemple la loupe, le microscope, la lunette astronomique, le télescope,…

2. L'œil :

a. Description :

L'oeil comprend principalement :
- La cornée, qui est une membrane transparente.
- L'iris, coloré, qui fait office de diaphragme de diamètre variable.
- La pupille, qui apparaît noire, est l'ouverture du diaphragme. Son diamètre varie entre 2 et 8 mm suivant l'intensité de la lumière.
- Le cristallin, qui est une lentille biconvexe d'indice moyen dans le visible n = 1,406.
- La rétine, qui contient les cellules photosensibles (cônes et bâtonnets).
- L'humeur aqueuse et l'humeur vitrée, qui sont des milieux transparents d'indices moyens n = 1,336.

Pour qu'un objet soit vu nettement, il faut que l'image se forme sur la tache jaune.

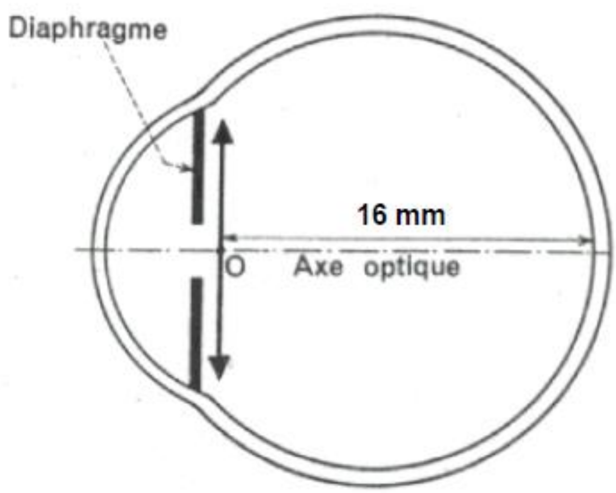


b. L'œil réduit :

L'œil est donc un système complexe, pour l'étudier on peut le représenter par un système équivalent plus simple qui rend compte de ses propriétés optiques : c'est <u>l'œil réduit</u>.

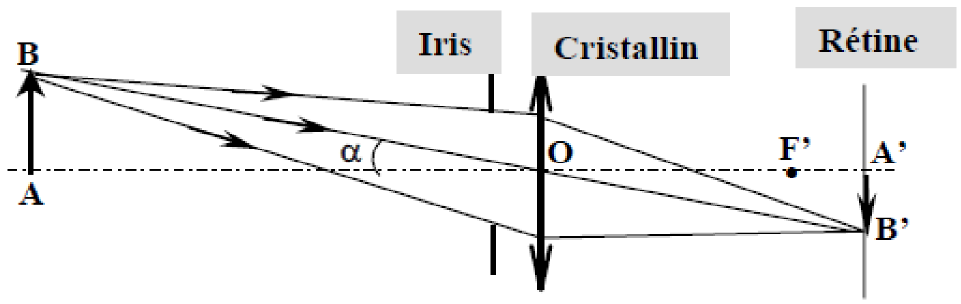
Il est constitué d'une lentille convergente de distance focale variable, plus ou moins diaphragmée, et dont la distance au fond de l'œil est d'environ **16 mm**.

Pour un œil normal au repos, la vergence de cette lentille est **c = 62,5** δ.

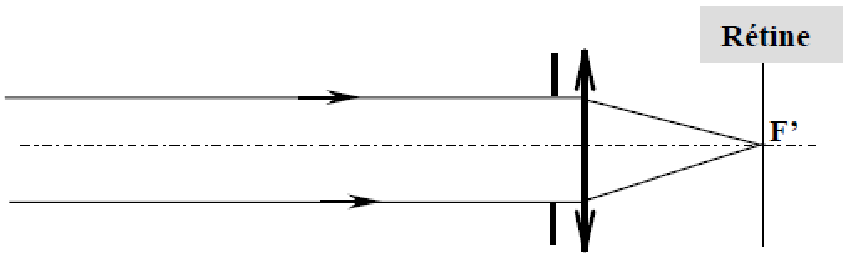


Remarques :

- Pour qu'un objet soit vu nettement, il faut que l'image se forme sur la tache jaune, il faut donc que l'objet se situe au voisinage de l'axe optique et possède un faible diamètre apparent α.
- L'image est réelle, puisque située sur la rétine, renversée si l'objet est réel (elle serait droite si l'objet était virtuel



Quelle que soit la distance **OA**, la distance **OA'** est constante, donc la distance focale de l'oeil réduit doit varier avec la position de l'objet (voir la relation de conjugaison
- Pour un oeil <u>normal au repos</u>, l'image d'un objet situé à l'infini est <u>nette</u>, car le plan focal image de l'oeil coïncide avec la rétine.



c. Accommodation :

Lorsque l'objet vient à distance finie, le cristallin se bombe sous l'action des muscles ciliaires et la distance focale de l'oeil diminue (le cristallin devient plus convergent) de façon que l'image puisse se former sur la rétine. C'est le phénomène d'accommodation.

Cette accommodation a des limites car le cristallin ne peut pas augmenter trop sa vergence : La plus petite distance à laquelle l'oeil peut voir un objet net est la distance minimum de vision distincte.

L'objet est alors situé au **Punctum proximum P_P**
Pour un adulte jeune, le P_P est à environ 25 cm, pour un enfant, il est à ≈ 8 à 10 cm, pour une personne plus âgée (≈ 40 ans), il est situé à ≈ 35 à 40 cm.
On appellera $d = \overline{OP_P}$

Le point de l'axe optique le plus éloigné possible que l'œil au repos voit nettement est le ***Punctum remotum*** P_R. On appellera $D = \overline{OP_R}$.
Pour un œil normal, on a vu que $D \to -\infty$.

On appelle pouvoir d'accommodation $A = C_{P_P} - C_{P_R}$ (en dioptries) où C_{P_P} et C_{P_R} sont les vergences du cristallin quand il met au point respectivement sur P_P et sur P_R.

Puisque $C_{P_P} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{\overline{OP_P}} + \frac{1}{\overline{OR}}$ et $C_{P_R} = \frac{1}{f''} = -\frac{1}{\overline{OP_R}} + \frac{1}{\overline{OR}}$ où $\overline{OR}$ est la distance du centre optique du cristallin à la rétine, on obtient immédiatement :

$$C_{P_P} - C_{P_R} = -\frac{1}{\overline{OP_P}} + \frac{1}{\overline{OP_R}} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{D} = A .$$

On appelle aussi **A** l'amplitude dioptrique d'accommodation.

$A = -\frac{1}{d}$ si le P_R est à l'infini.

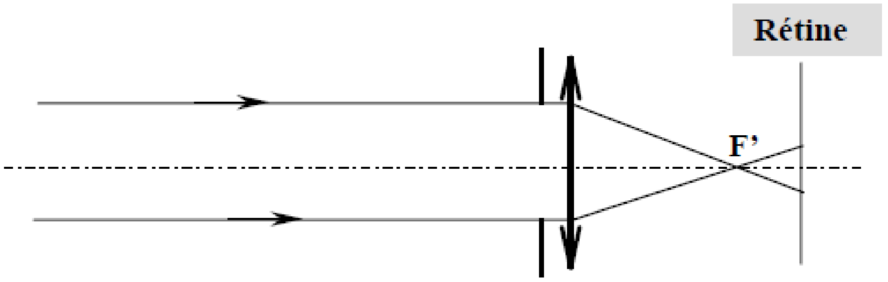
En général, **A** diminue avec l'âge, mais est la même quelque soit le type d'œil (normal, myope,…).

d. Profondeur de champ :
L'oeil est capable de voir nettement simultanément des objets situés à des distances différentes. L'explication est la même que pour l'appareil photographique :
• Le rôle de la pellicule est joué ici par la rétine et le grain de la pellicule est remplacé par les cellules sensibles que sont les cônes et bâtonnets. Si l'image d'un point est une tâche qui ne couvre qu'une seule cellule, l'image est perçue comme étant ponctuelle. Deux points d'un objet peuvent être distingués si leurs images se forment sur deux cellules distinctes (en fait, il faut même une cellule entre deux).
• Le diaphragme est ici l'iris : plus il est fermé, plus la profondeur de champ est grande. Etant donné que le diamètre de l'iris dépend de la quantité de lumière incidente, on voit plus nettement en pleine lumière.

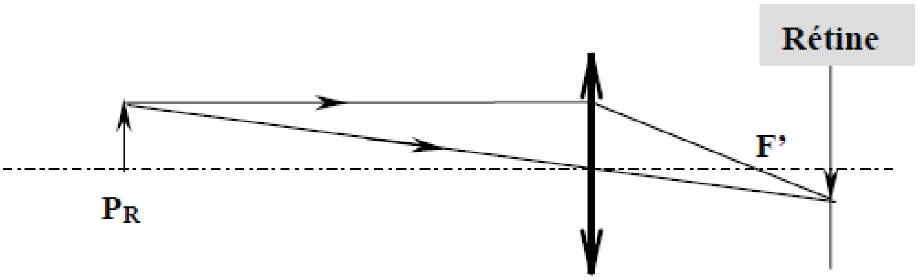
e. Défauts de vision :

1. LA MYOPIE

Un oeil myope est trop convergent : Au repos, pour la vision à l'infini, son foyer image est en avant de la rétine. L'oeil est trop long.

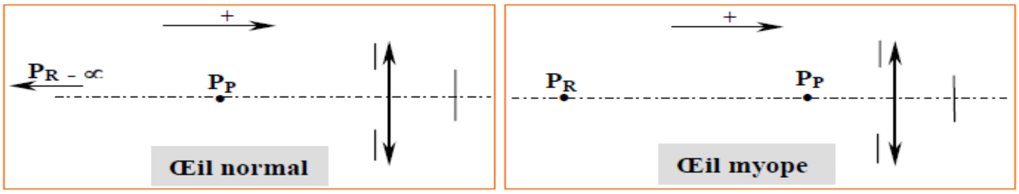


Il ne peut voir nettement qu'en rapprochant l'objet. Son **Punctum remotum P_R** est à distance finie.

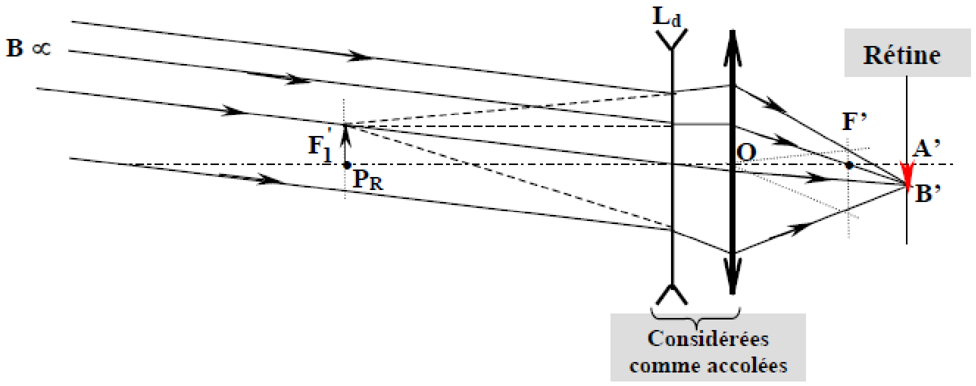


L'amplitude dioptrique d'accommodation $\mathbf{A_m}$ pour l'œil myope étant à peu près la même que $\mathbf{A_n}$, celle d'un œil normal, on a :

$-\frac{1}{d_n}+\frac{1}{D_n}=-\frac{1}{d_m}+\frac{1}{D_m}$, ou encore $\frac{1}{d_m}-\frac{1}{d_n}\approx\frac{1}{D_m}$ (<0) (puisque $D_n\approx-\infty$). Ceci entraîne $d_m>d_n$. Le *Punctum proximum* P_P est donc plus près (puisque d_m et d_n sont négatifs).

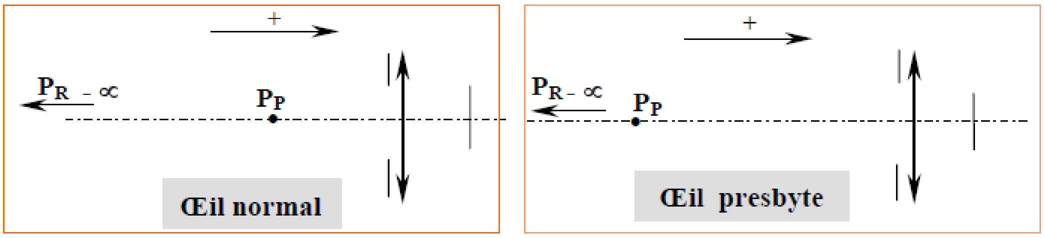


On corrige la myopie en plaçant devant l'œil une lentille divergente L_d dont le foyer image F'_1 est placé en P_R. L'image à travers le verre correcteur d'un objet situé à l'infini est virtuelle et située en $P_R \Rightarrow f'_1 = D\,(<0)$.

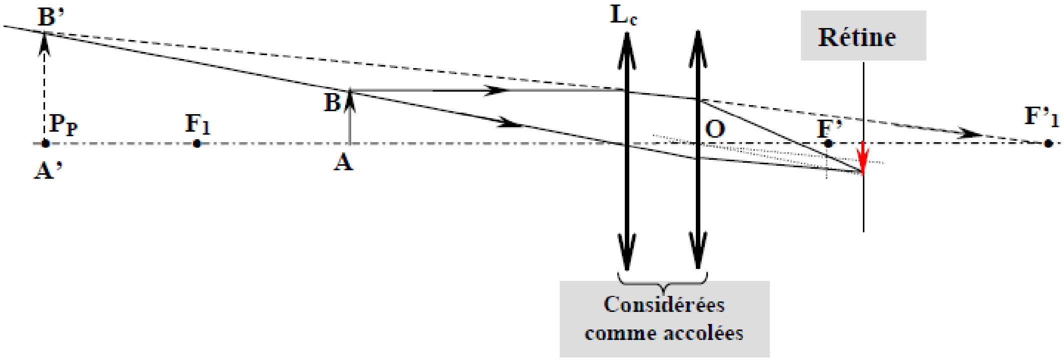


2. LA PRESBYTIE :

Avec l'âge, l'oeil perd ses capacités d'accommodation ($A_p \neq A_n$). Le **Punctum remotum** ne bouge pas, mais le **Punctum proximum** s'est éloigné car la distance focale minimum du cristallin a augmenté (le cristallin ne peut plus se bomber suffisamment).



Si l'on souhaite observer un objet **AB** situé plus près que **P**, il faut rajouter une lentille correctrice convergente L_c. La lentille doit être telle que l'image **A'B'** de l'objet **AB** soit au **P** de l'oeil non corrigé. **PP**

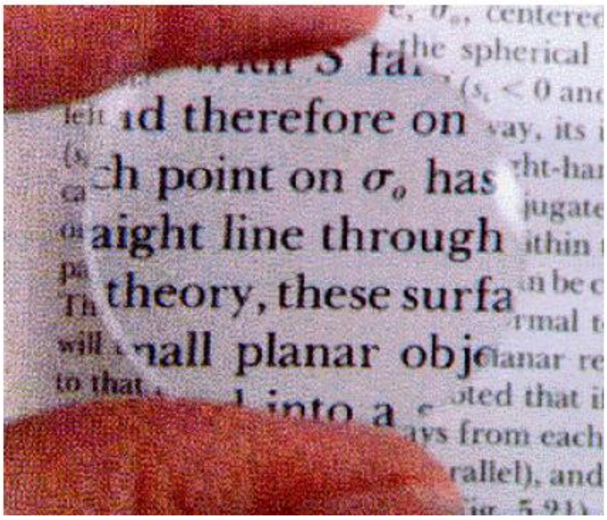


Puisque le pouvoir d'accommodation de l'oeil corrigé reste inchangé, le $\mathbf{P_R}$ de l'oeil corrigé se rapproche. Les lunettes correctrices sont alors souvent des demi-verres : l'utilisateur regarde au travers ou non selon qu'il désire voir de près ou de loin.

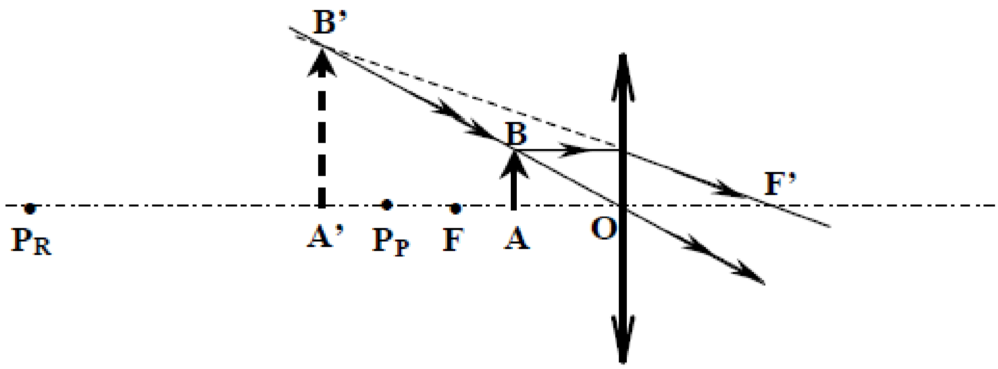
3. La loupe :

a. Définition :

Nous venons de voir que pour observer un objet très petit, il faut le placer au P, l'oeil doit donc accommoder, il se fatigue . P
La loupe est un instrument qui permet :
- de supprimer l'effort d'accommodation (en général)
- d'observer l'objet sous un plus grand angle (en observant une image plus grande).



La loupe est une lentille convergente de faible distance focale (quelques cm). On place l'objet **AB** entre le plan focal objet et la lentille, de façon à en former une image virtuelle droite **A'B'**, agrandie et située entre le **P**et le $\mathbf{P_R}$ de l'oeil nu. **P**



b. Mise au point

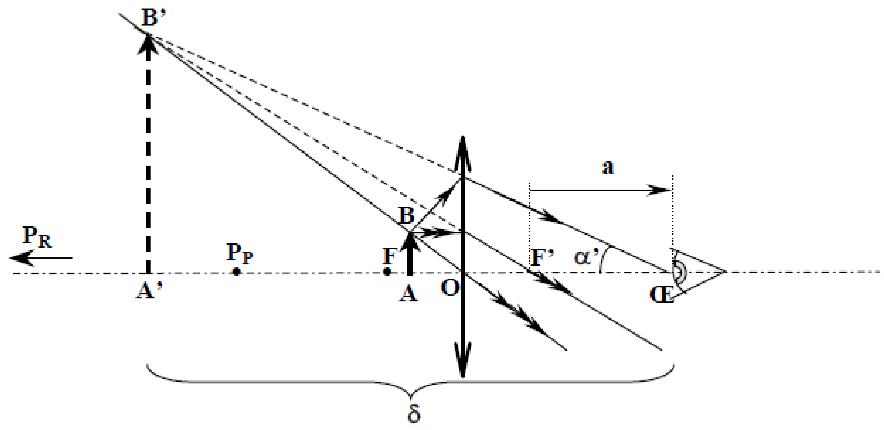
Si on souhaite observer <u>sans accommoder</u>, il faut placer l'objet **AB** de façon telle que son image soit au $\mathbf{P_R}$.
- Pour un oeil normal, $\mathbf{P_R}$ est à l'infini, l'objet doit donc être placé au foyer objet de la loupe.

- Pour un oeil qui possède un défaut, l'objet doit être placé au point conjugué du **P_R** dans la loupe.
Si on souhaite observer <u>en accommodant</u>, il faut placer l'objet pour qu'il soit conjugué du **P**dans la loupe. **P**
La latitude de mise au point du système oeil-loupe (on l'appelle aussi parfois profondeur de champ) est la distance entre les positions extrêmes entre lesquelles doit se trouver l'objet pour que l'image soit vue nettement. C'est à dire que cette image doit être située respectivement en **P_R** et en **P**. Cette distance est généralement faible. **P**

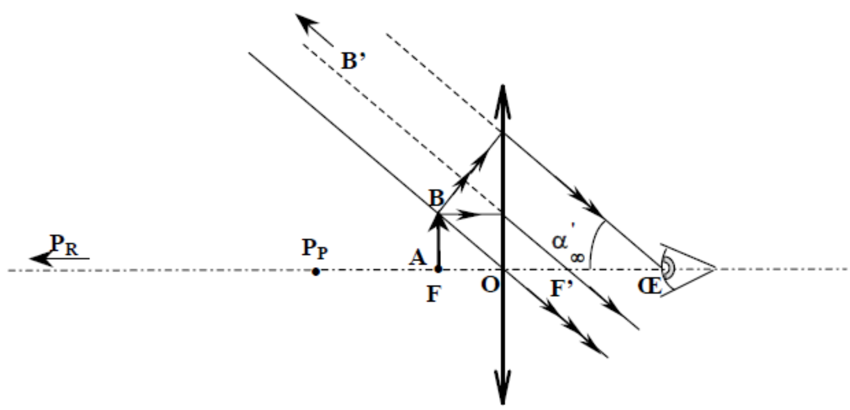
c. Constructions :

Dans le cas général, l'angle α**'** sous lequel l'observateur voit l'image de l'objet dépend de la position de son oeil :

$$\alpha' = \frac{A'B'}{\delta} \text{ avec } \delta = A'Œ .$$



Si l'objet est en **F**, les rayons émergents sont parallèles entre eux. L'image est vue sous un angle constant $\alpha'_\infty = \frac{AB}{f'}$ quelle que soit la position de l'œil.



a. Puissance et grandissement :

La puissance de la loupe est définie par $\mathbf{P} = \frac{\alpha'}{\mathbf{AB}}$ (en dioptries). On l'écrit encore $\mathbf{P} = \frac{\mathbf{A'B'}}{\mathbf{AB}}\frac{\mathbf{1}}{\delta} = \frac{|\gamma|}{\delta}$. Le grandissement ne dépend pas de l'objet examiné, mais seulement de sa position, donc la puissance de la loupe ne dépend que de la position de l'objet et de celle de l'œil.

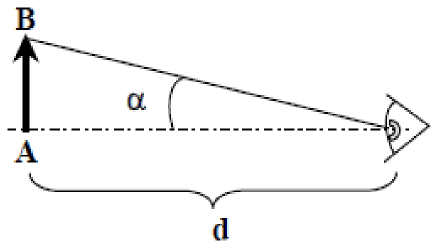
Le grandissement s'écrivant encore $|\gamma| = \frac{\mathbf{F'A'}}{\mathbf{f'}}$, on obtient en introduisant $\mathbf{a} = \overline{\mathbf{F'Œ}}$:

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{f'}}\frac{\mathbf{F'A'}}{\delta} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{f'}}\frac{\delta - \mathbf{a}}{\delta} \quad \Rightarrow \mathbf{P} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{f'}}\left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{a}}{\delta}\right).$$

Si $\mathbf{a} > \mathbf{0}$ la puissance est inférieure à **1/f'** et elle est d'autant plus grande que δ est grande c'est à dire pour une image en $\mathbf{P_R}$, si $\mathbf{a} < \mathbf{0}$ la puissance est supérieure à **1/f'** et elle est d'autant plus grande que δ est petite c'est à dire pour une image en $\mathbf{P_P}$, l'œil accommode alors au maximum.

L'emploi d'une loupe est d'autant plus intéressant que l'angle **α'** sous lequel on voit l'image, est grand comparé à l'angle **α** sous lequel on voit l'objet à l'œil nu, lorsqu'on regarde celui-ci dans les meilleures conditions possibles, c'est à dire lorsqu'on le place au ***Punctum proximum*** $\mathbf{P_P}$ (situé à distance **d**) de l'œil.

$$\mathbf{G} = \frac{\alpha'}{\alpha} \approx \frac{\mathbf{P.\,AB}}{\mathbf{AB/d}} = \mathbf{d.P}\text{ , ou encore } \mathbf{G} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{f'}}\left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{a}}{\delta}\right).$$



Cas particuliers intéressants :

$$\left.\begin{array}{l}\mathbf{a} = \mathbf{0}\text{ (œil en }\mathbf{F'}\text{) ou} \\[2ex] \delta \to \infty\text{ (}\mathbf{A'B'}\text{ à l'infini, pas d'accommodation)}\end{array}\right\} \Rightarrow \mathbf{G} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{f'}}$$

4. Le microscope :

a. Description :

C'est un instrument qui est très grossissant pour permettre d'observer des objets réels trop petits pour que l'oeil puisse les voir, même à la loupe. Il donne une image virtuelle que l'on voit sous un **angle beaucoup plus grand que l'objet**.

Il est constitué de deux systèmes optiques :

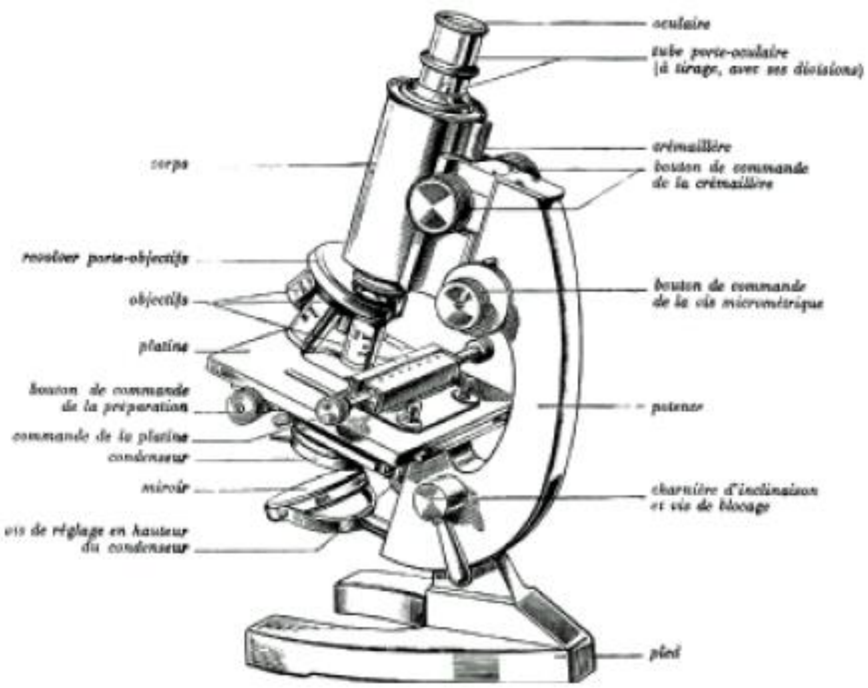
- <u>L’objectif</u>, placé près de l’objet, possède un faible diamètre d’ouverture et une grande ouverture angulaire. Il donne de l’objet un image <u>réelle</u> très agrandie, renversée. Il est composé de plusieurs lentilles afin de donner une image de bonne qualité (correction des aberrations).

- <u>L’oculaire</u>, derrière lequel se place l’oeil. Il joue le rôle de loupe dans l’observation de l’image objective. L’oculaire est composé de plusieurs lentilles (au moins deux) afin de donner une image de bonne qualité.

L’image définitive sera donc <u>virtuelle</u>, renversée par rapport à l’objet.

L’objectif et l’oculaire sont maintenus, à l’aide d’un support, à distance constante l’un de l’autre.

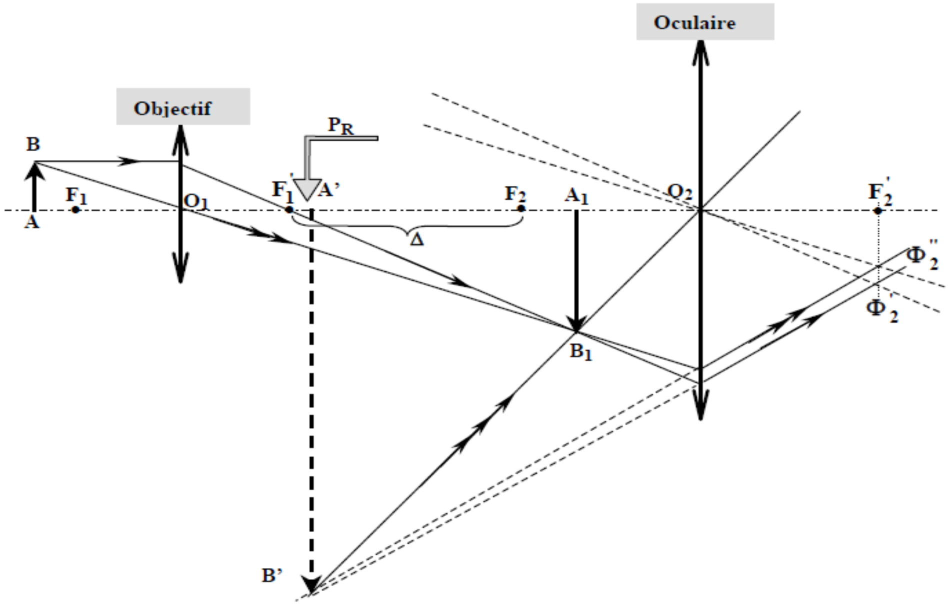
Pour la construction des images, on peut assimiler le microscope à un microscope réduit où l’objectif est considéré comme une lentille de très petite distance focale, convergente, et où l’oculaire est considéré comme une seule lentille convergente de quelques cm de distance focale. Les axes optiques des deux lentilles sont confondus. La distance Δ entre **F** et $\mathbf{F'1_2}$ est fixée égale à environ 16 cm et est appelée longueur (ou intervalle optique) du microscope



b.Construction de l’image :

A/ Cas d’un oeil dont le $\mathbf{P_R}$ est à distance finie

L'image intermédiaire doit être entre $\mathbf{F_2}$ et $\mathbf{O_2}$, Cette image intermédiaire devant être réelle et déjà bien agrandie, on place l'objet en avant du foyer objet $\mathbf{F_1}$ de l'objectif et très près de $\mathbf{F_1}$.



C. Puissance et grossissement :

Comme pour la loupe, on définit la puissance du microscope $\mathbf{P_{mic}} = \dfrac{\alpha'}{\mathbf{AB}}$ où α' est l'angle sous lequel l'œil voit l'image finale **A'B'**.

On peut écrire : $\mathbf{P_{mic}} = \dfrac{\alpha'}{\mathbf{A_1B_1}}\dfrac{\mathbf{A_1B_1}}{\mathbf{AB}} = \mathbf{P_{oc}} \times |\gamma_{\mathbf{obj}}|$

L'intérêt du microscope par rapport à l'oculaire – loupe est que sa puissance est celle de l'oculaire multiplié par le grandissement de l'objectif.

La puissance d'une loupe s'écrit : $\mathbf{P_{oc}} = \dfrac{\mathbf{1}}{\mathbf{f'_{oc}}}\left(\mathbf{1} - \dfrac{\mathbf{a}}{\delta}\right)$ (où $\mathbf{a} = \overline{\mathbf{F'_2\,Œ}}$ et $\delta = \mathbf{A'Œ}$), on aura donc pour les cas particuliers :

- Si on se place dans le cas de la vision à l'infini ou bien si l'œil est en $\mathbf{F'_2}$, on a $\mathbf{P_{oc}} = \mathbf{P^i_{oc}}$, ce qui donne la ***puissance intrinsèque*** du microscope :

$$P^i_{mic} = \frac{1}{f'_{oc}} \times |\gamma_{obj}|$$

- Si on se place plus particulièrement dans le cas où l'image est à l'infini, $|\gamma_{\mathbf{obj}}|$ prend une forme simple : $|\gamma_{obj}| = \dfrac{A_1B_1}{AB} = \dfrac{F'_1A_1}{f'_{obj}} = \dfrac{F'_1F_2}{f'_{obj}} = \dfrac{\Delta}{f'_{obj}}$ (**A₁** est en **F₂** pour avoir **A'** à l'∞).

$$\Rightarrow \mathbf{P^i_{mic}} = \frac{\Delta}{\mathbf{f'_{oc}} \times \mathbf{f'_{obj}}}$$

On définit le grossissement du microscope par $G_{mic} = \frac{\alpha'}{\alpha}$ avec, comme on l'a vu pour la loupe, $\alpha = \frac{AB}{d}$ où **d** est la distance minimum de vision distincte.

$\Rightarrow$ $G_{mic} = P_{mic} \times d = P_{oc} \times |\gamma_{obj}| \times d$, ce qui s'écrit encore $G_{mic} = G_{oc} \times |\gamma_{obj}|$

- Pour une image à l'∞, on définit le ***grossissement nominal*** (correspondant à la puissance intrinsèque de l'oculaire) $G^i_{mic} = \frac{d}{f'_{oc}} \times |\gamma_{obj}|$, qui s'écrit encore $G^i_{mic} = \frac{d\,\Delta}{f'_{oc}\, f'_{obj}}$.

Le ***grossissement commercial***, comme pour la loupe, est la valeur de G^i définie pour une valeur de **d** = 25 cm : $G^c_{mic} = \frac{P^i_{mic}}{4}$

Ordres de grandeur : $f'_{obj} = 3$mm ; $f'_{oc} = 30$ mm ; $\Delta = 160$ mm. $\Rightarrow$ $P^i = 1880\ \delta$, $G^c_{mic} = 445$.

Puissances usuelles : 1000 à 5000 δ. Grossissements usuels : 250 à 1250.

d. Pouvoir séparateur

Même définition que pour l'œil ou la loupe.
A et **B** seront vus distinctement si **A'** et **B'** sont vus sous un angle supérieur au pouvoir séparateur de l'œil, soit $3\ 10^{-4}$ rd.

$$G_{mic} = \frac{\alpha'}{\alpha} \Rightarrow \alpha_{min} = \frac{3\,10^{-4}}{G} = \frac{AB}{d} \text{ donc } AB_{min} = \frac{3\,10^{-4}}{G} d$$

Par exemple, pour le microscope précédent $AB_{min} = \frac{3\,10^{-4}}{445} 0{,}25 \approx 0{,}17\ \mu m$.

En réalité, il existe au niveau de l'objectif des phénomènes de diffraction qui limitent la résolution, ce qui fait que pour un microscope très puissant ($G^c \approx 1200$ à 1500), on ne pourra pas descendre en deçà de 0,2 µm.