

Optique Géométrique

Partie 1 : Propagation de la lumière

1. Conditions de visibilité d'un objet
2. Modèle du rayon lumineux en optique géométrique
3. Le miroir plan et lois de la réflexion
4. Dioptre plan et lois de la réfraction
 - a) lois de la réfraction
 - b) réfringence
 - c) réflexion totale
 - d) mirages
 - e) lame à faces parallèles
 - f) prisme

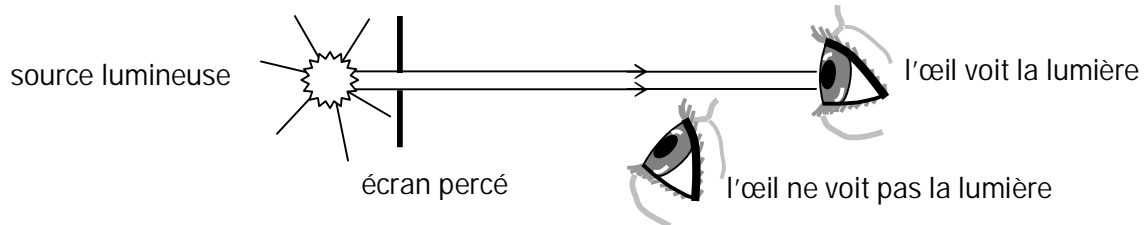
Partie 2 : Lentilles / Miroirs et instruments d'optique

1. Conditions de Gauss
2. Les lentilles minces - Construction d'une image donnée par une lentille mince
 - a) caractéristiques d'une lentille mince convergente
 - b) construction d'une image donnée par une lentille mince convergente
 - c) tracé du faisceau lumineux traversant la lentille
 - d) caractéristiques d'une lentille mince divergente
 - e) construction d'une image donnée par une lentille mince convergente
3. Relations de conjugaison et de grandissement :
 - a) relations de conjugaison
 - b) formules de grandissement
4. L'œil et la vision :
 - a) description anatomique
 - b) accommodation
 - c) le pouvoir séparateur de l'œil
 - d) défauts de l'œil : myopie, hypermétrope, presbytie, astigmatisme
5. Miroir sphérique :
6. Instruments d'optique :
 - a) diamètre apparent
 - b) grossissement d'un instrument optique
 - c) la loupe
 - d) l'appareil photographique
 - e) le microscope
 - f) la lunette astronomique

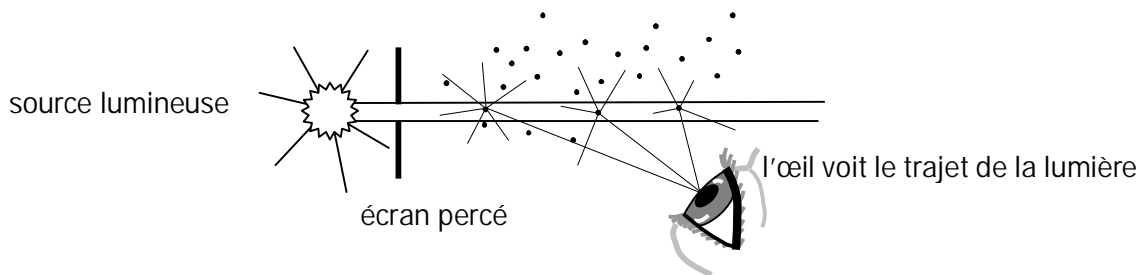
Partie 1 : Propagation de la lumière

1. Conditions de visibilité d'un objet :

Un objet ne peut être vu que s'il émet de la lumière (ou s'il est éclairé) et que celle-ci pénètre dans l'œil.



Parfois, l'œil situé hors du trajet de la lumière aperçoit ce trajet grâce aux fines particules en suspension dans l'air ; ces particules éclairées diffusent la lumière qu'elles reçoivent, devenant autant de points lumineux.



2. Modèle du rayon lumineux en optique géométrique :

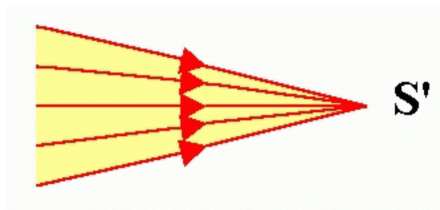
Nous avons vu que la lumière présentait une double nature : ondulatoire et corpusculaire ; l'optique géométrique s'affranchit de cette dualité et considère la lumière uniquement en termes de rayons lumineux : sous cette approximation théorique (géométrique), on suppose donc que, dans les milieux transparents et homogènes, la lumière se propage suivant des lignes droites issues de la source. Ces lignes droites sont alors appelées : rayons lumineux

Remarques :

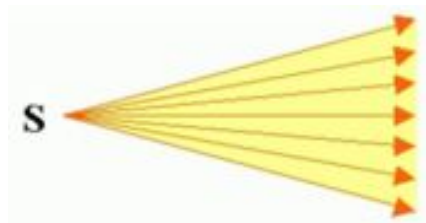
- les rayons lumineux sont les directions de propagation de la lumière, ils n'ont pas de réalité physique (en particulier, ce ne sont pas les trajectoires des photons)
- limite du modèle : lorsque la lumière rencontre des obstacles de petites dimensions, il y a diffraction, les rayons lumineux ne se propagent plus en ligne droite
- limite du modèle : lorsque le milieu n'est pas homogène (traversée de milieux d'indice de réfraction différents par exemple), des autres phénomènes (tels les mirages) apparaissent
- lorsque deux rayons lumineux se rencontrent, ils n'interagissent pas

Un **faisceau lumineux** peut être considéré comme étant constitué d'un ensemble de rayons lumineux ; un pinceau lumineux est un faisceau lumineux étroit

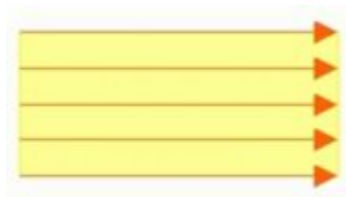
- faisceau conique convergent si la lumière se dirige vers un point



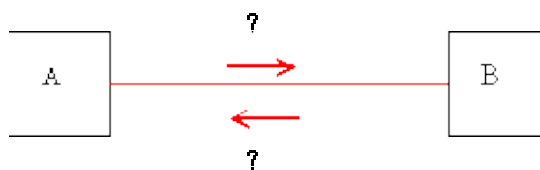
- faisceau conique divergent si la lumière provient d'un point



- faisceau cylindrique (ou parallèle) si les rayons sont parallèles ; le point est alors à l'infini



Principe du retour inverse de la lumière : le trajet suivi par la lumière est indépendant de son sens de propagation ; autrement dit : si un rayon lumineux part d'un point A pour aller vers un point A' en suivant un certain trajet, un autre rayon lumineux peut partir de A' et suivre le même trajet pour aller vers A.



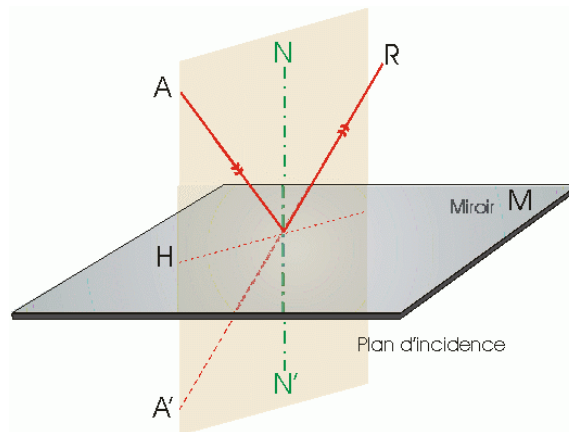
A et B sont deux boîtes noires percées d'un trou. Dans laquelle a-t-on placé la source ?

3. Le miroir plan et lois de la réflexion :

Un miroir plan est une surface parfaitement réfléchissante.

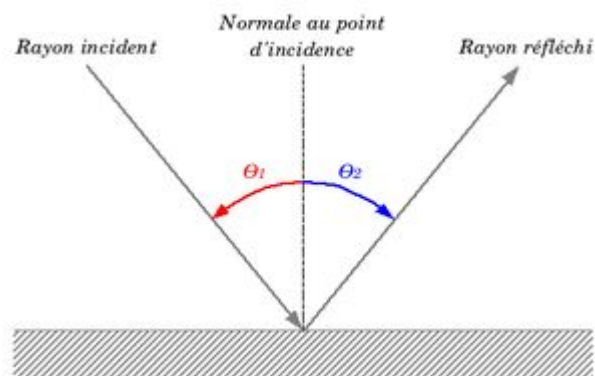
- 1^{ère} Loi de Descartes relative à la réflexion :

***Rayon incident et rayon réfléchi sont dans le même plan,
appelé : plan d'incidence***



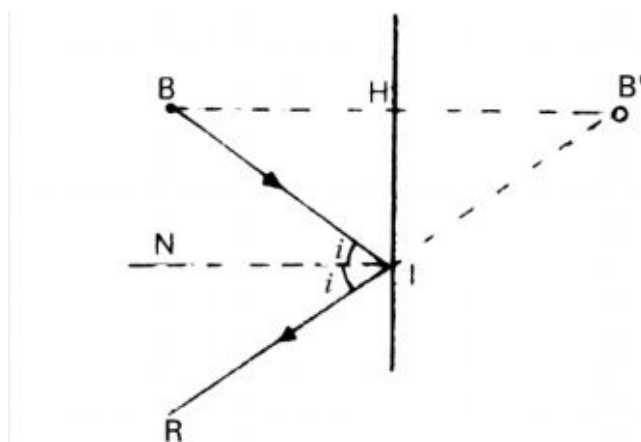
- 2^{ème} Loi de Descartes relative à la réflexion :

L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion : $\hat{i} = \hat{r}$



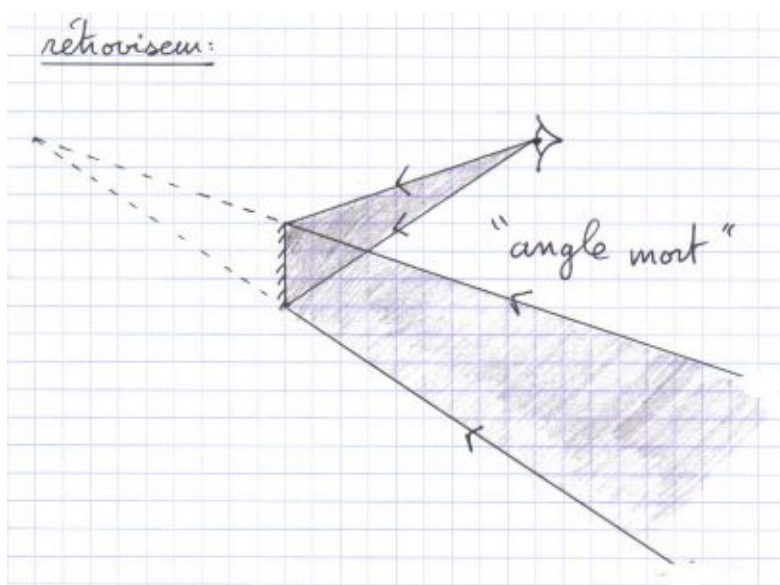
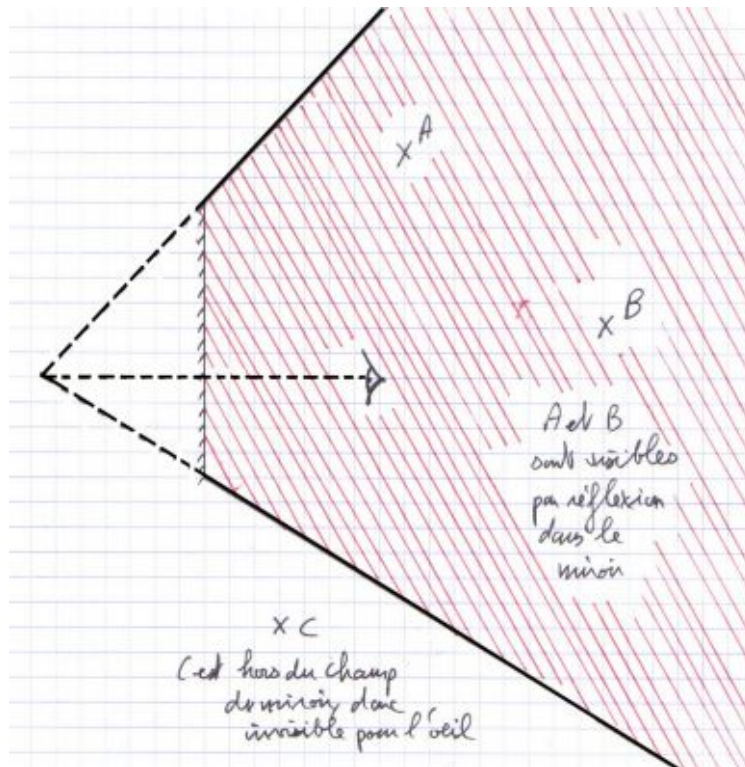
Méthode de construction du rayon réfléchi :

Construire B', le symétrique de B par rapport au miroir ; le rayon incident issu de B vient frapper le miroir en I, on trace alors la droite issue de B' passant par I : la portion réelle IR correspond au rayon réfléchi



Champ du miroir :

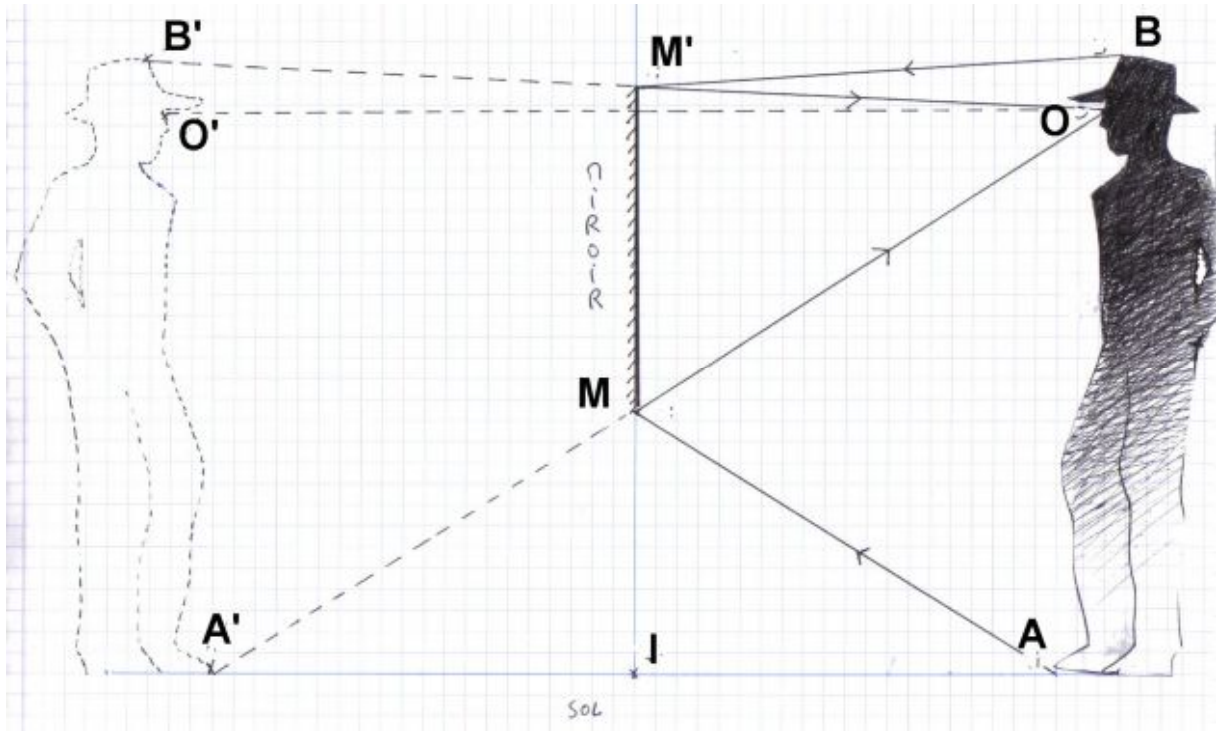
- **Point-objet :** point d'où partent les rayons lumineux qui arrivent sur le miroir
- **Point-image :** point symétrique du point-objet par rapport au plan du miroir ; c'est un point fictif, virtuel, qui se trouve derrière le miroir
- **Champ du miroir :** portion de l'espace visible par réflexion dans le miroir ; il dépend de la taille du miroir et de la position de l'œil.
Pour tracer le champ d'un miroir il faut construire l'image de l'œil dans le miroir, puis tracer les rayons qui arrivent à cette image en s'appuyant sur les contours du miroir



Exercice-type : « se regarder dans le miroir »

Un homme de hauteur AB se regarde dans un miroir placé à la distance AI ; son œil est à la distance AO du sol.

Quelle est la hauteur MM' du miroir et à quelle distance du sol IM doit-on le placer pour se voir en entier ?



➤ Propriété de Thalès dans $A'O'B'$: $\frac{OM}{OA'} = \frac{OM'}{OB'} = \frac{MM'}{A'B'} \Rightarrow MM' = \frac{OM'}{OB'} \times A'B'$ (1)

➤ Propriété de Thalès dans $O'O'B'$: $\frac{OH}{OO'} = \frac{OM'}{OB'}$

Or O' est le symétrique de O par rapport à H , donc : $\frac{OH}{OO'} = \frac{1}{2}$ donc $\frac{OM'}{OB'} = \frac{1}{2}$ (2)

➤ D'où, en reportant dans (1) et (2) : $\frac{MM'}{A'B'} = \frac{1}{2} \Rightarrow MM' = \frac{A'B'}{2}$

➤ Propriété de Thalès dans $A'O'B'$: $\frac{A'M}{A'O} = \frac{A'I}{A'A} = \frac{MI}{OA} \Rightarrow IM = \frac{A'I}{A'A} \times OA$

Or A' est le symétrique de A par rapport à I , donc : $\frac{A'I}{A'A} = \frac{1}{2}$ donc $IM = \frac{OA}{2}$

Taille minimale du miroir = $\frac{\text{taille individu}}{2}$

Hauteur minimale du miroir par rapport au sol = $\frac{\text{distance oeil-pied}}{2}$

(ces résultats ne dépendent pas de la distance de l'homme au miroir)

Exercice-type : « miroir tournant »



Quand le miroir tourne de α , le rayon i (qui n'a pas bougé), arrive sur la surface avec un angle par rapport à la nouvelle normale de : $i + \alpha$

Donc le rayon réfracté repartira également avec un angle de : $i + \alpha$

L'angle entre rayon incident et rayon réfracté vaut donc : $2(i + \alpha) = 2i + 2\alpha$

Or, avant que le miroir ne tourne, ils avaient un angle de $2i$ d'écart.

Donc quand le miroir tourne de α , le rayon réfléchi tourne de 2α

Quand un miroir tourne de α , le rayon réfléchi tourne de 2α

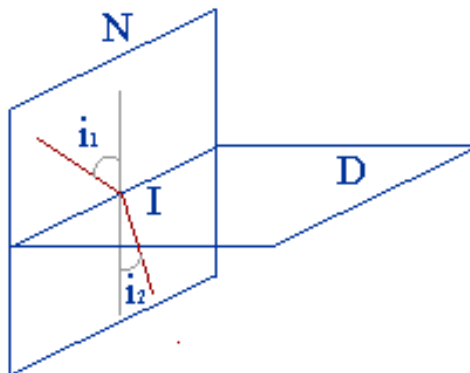
4. Dioptré plan et lois de la réfraction :

Un dioptré plan est une surface plane délimitant 2 milieux transparents d'indice de réfraction n_1 et n_2

a) Lois de la réfraction :

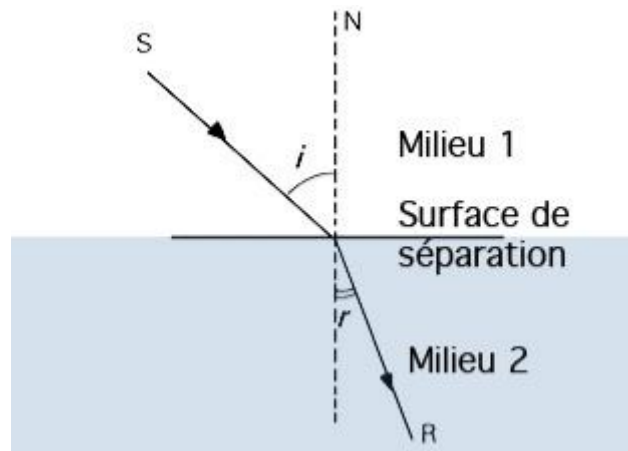
- 1^{ère} Loi de Snell-Descartes :

Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence



- 2^{ème} Loi de Snell-Descartes :

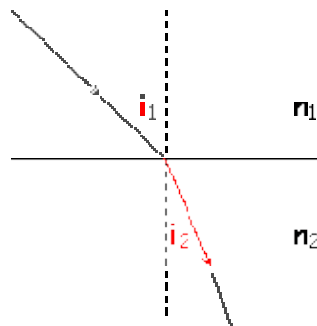
$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$



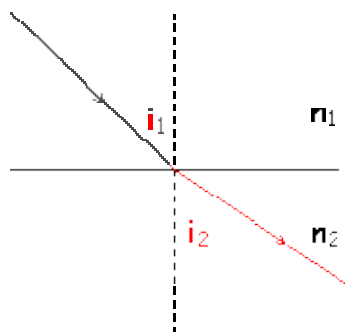
exemple : Un rayon lumineux arrive avec un angle d'incidence $i_1 = 27^\circ$ sur un dioptre séparant deux milieux $n_1 = 1,2$ et $n_2 = 1,4$. Quel est l'angle de réfraction ? (réponse : $i_2 = 22,9^\circ$)

b) réfringence :

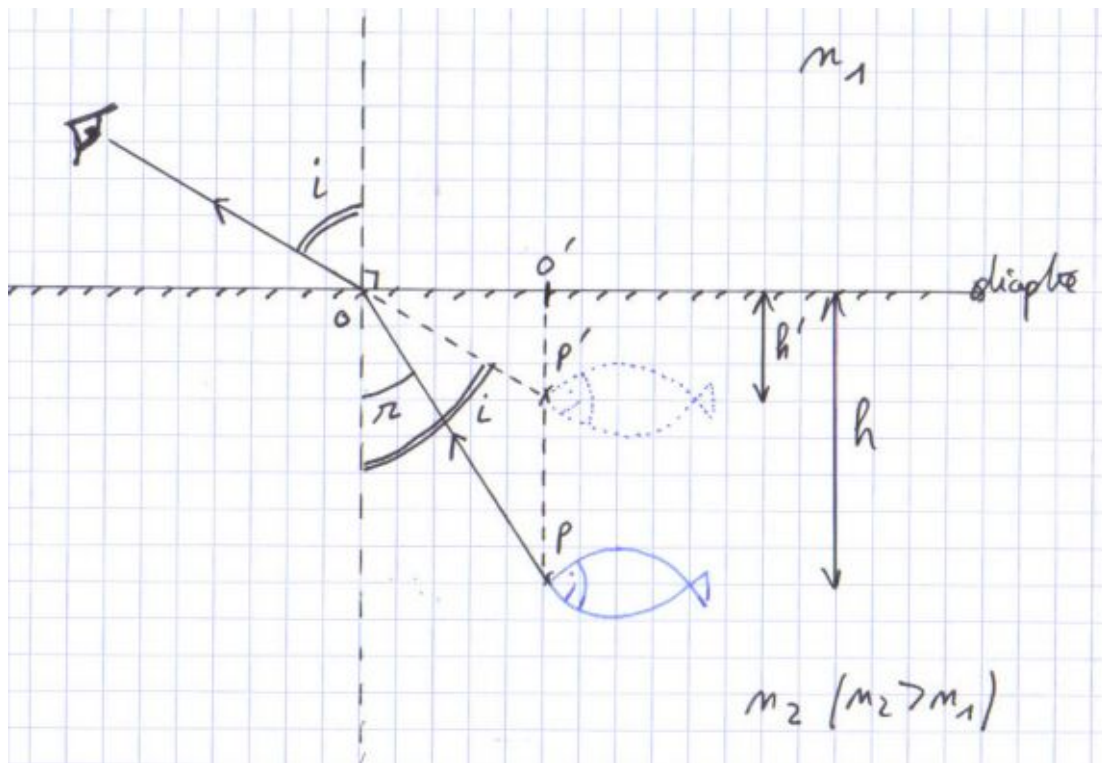
- si $n_1 < n_2$, le milieu 1 est dit moins réfringent que le milieu 2, et on a : $i_1 > i_2$



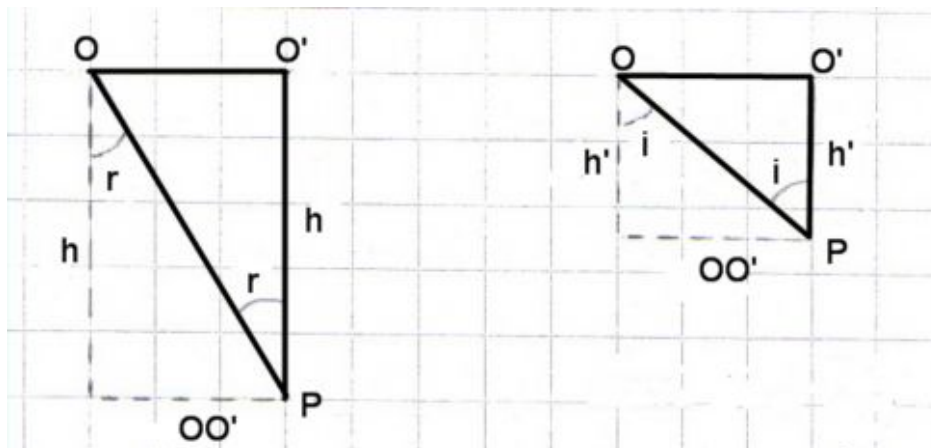
- si $n_1 > n_2$, le milieu 2 est dit moins réfringent que le milieu 1, et on a : $i_1 > i_2$



Exercice-type : illusion d'optique « vision d'un objet immergé »



n_2 étant plus réfringent que n_1 , les rayons émergeant de l'eau s'éloignent de la normale ; le cerveau suppose néanmoins que les rayons se sont propagés en ligne droite.



$$OO' = h \tan r$$

$$\text{donc } h \cdot \tan r = h' \cdot \tan i \quad \text{et : } \frac{\tan r}{\tan i} = \frac{h'}{h}$$

Si OO' faible devant h (faible distance horizontale par rapport à la profondeur), on peut approximer :

$$\tan i \sim i \quad \text{et} \quad \sin i \sim i$$

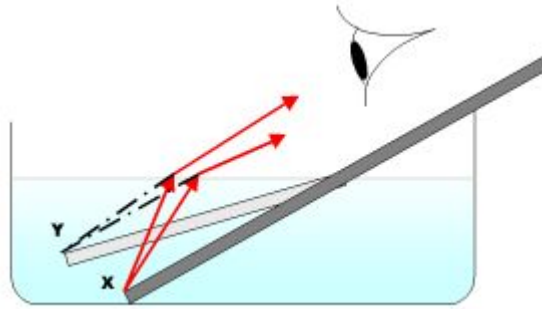
$$\tan r \sim r \quad \text{et} \quad \sin r \sim r$$

(Remarque : les rayons sont donc peu inclinés par rapport à la normale au diophte, on dit qu'ils sont paraxiaux, c'est un stigmatisme approché. Voir plus loin dans le cours)

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r \quad d'où : \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin r}{\sin i} \quad ; \quad \text{ainsi : } \frac{n_1}{n_2} = \frac{\tan r}{\tan i}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{h'}{h}$$

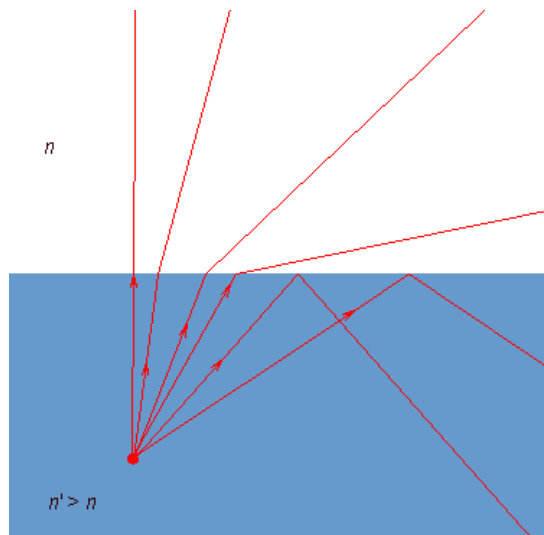
Autre exemple : l'expérience du « bâton brisé »



c) Réflexion totale :

Lorsque la lumière passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent (de l'eau vers l'air par exemple), l'angle réfracté s'écarte de la normale.

Plus l'angle incident augmente, plus l'angle réfracté augmente, et moins le faisceau transmis (réfracté) est intense : il perd de l'énergie alors que le rayon réfléchi en gagne.



Réflexion totale : il existe un **angle limite** d'incidence pour lequel tous les rayons sont réfléchis et plus aucune lumière n'est réfractée.

Cet angle limite correspond à l'angle d'incidence pour lequel l'angle de réfraction \hat{r} vaut 90° .

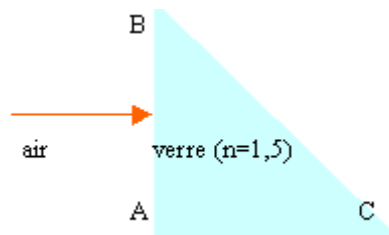
D'après la 2nde Loi de Descartes on a : $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$

Comme $\hat{r} = 90^\circ$, on a : $\sin r = \sin 90 = 1$, d'où : $n_1 \cdot \sin i = n_2$

Soit : $\sin i = \frac{n_2}{n_1}$, et l'angle limite :

$$i = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

exemple : quel est l'angle critique (limite) de la lumière qui se propage dans du verre ($n_{\text{verre}} = 1,5$) ?

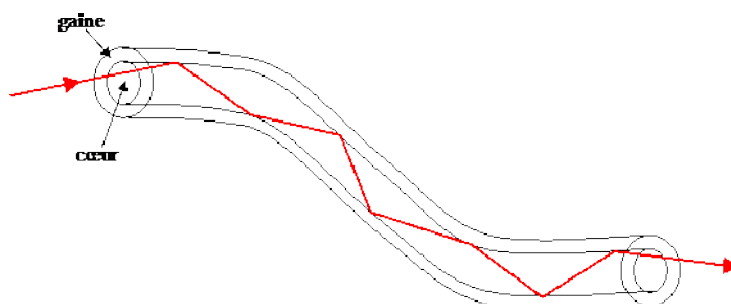


$$n_1 = n_{\text{verre}} = 1,5 \text{ et } n_2 = n_{\text{air}} = 1 \Rightarrow i = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} \frac{1}{1,5} = 41,8^\circ$$

Remarques :

- Pour tout angle d'incidence supérieur à l'angle limite, la réflexion totale a lieu : 100% de l'énergie incidente est réfléchie
- Application :
 - éclat d'un diamant : l'indice d'un diamant étant élevé, la lumière est piégée à l'intérieur par réflexion totale
 - périscope, jumelles
 - fibre optique : la fibre optique se compose d'un cœur en verre optique d'indice de réfraction élevé et d'une enveloppe en verre d'indice de réfraction faible. Les rayons lumineux qui entrent par une extrémité dans la fibre sont guidés dans le cœur par réflexion totale tout au long de la fibre malgré les courbures infligées, et ressortent à l'autre extrémité.

La fibre optique est utile dans le transport d'informations, de lumière. Ce dernier cas est fort utile à de nombreuses personnes : les archéologues : observation d'un tumulus sans y accéder ; les médecins : endoscopies



- A l'inverse, la lumière passant d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent (par exemple de l'air dans l'eau) peut pénétrer sous n'importe quel angle d'incidence : il n'existe alors pas d'angle critique

d) **Mirages :**

Le mirage un phénomène de réflexion de la lumière venant d'une région où l'air est frais et pénétrant dans une région où l'air est plus chaud (ex : au voisinage du revêtement de la route, apparition de « flaques de ciel »)

→ *mirage chaud :*

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 pour les rayons lumineux une courbure qui déforme l'image des objets situés au ras du sol. Si le sol est chaud, la courbure est dirigée vers le haut et les objets se doublent d'une image renversée laissant croire à un reflet sur un plan d'eau alors qu'en fait c'est le ciel qui donne cet effet.



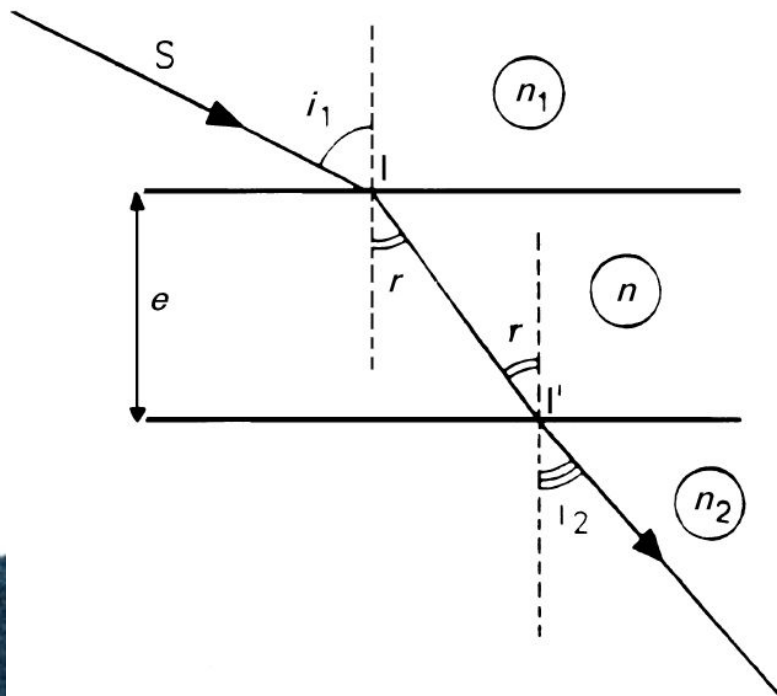
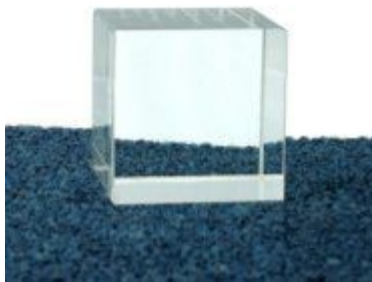
→ *mirage froid :*

Dans les régions polaires, où le sol est très froid, les rayons lumineux sont courbés vers le bas, ce qui fait qu'un objet situé au sol semble flotter en l'air. Ce phénomène rend possible la vision d'objets situés au-delà de l'horizon.



e) **Lame à faces parallèles :**

Une lame à faces parallèles est constituée de deux dioptries plans parallèles entre eux. On note e : l'épaisseur de la lame.



Les relations entre les angles d'incidence et d'émergence sont les mêmes que si la lame n'existait pas : $n_1 \sin i_1 = n \sin r$ (à l'entrée), $n \sin r = n_2 \sin i_2$ (à la sortie), $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$; soit :

$$\begin{array}{l} \text{angle d'entrée} = \text{angle de sortie} \\ i_1 = i_2 \end{array}$$

La direction du rayon incident et celle du rayon émergent sont donc les mêmes ; une lame à faces parallèles ne modifie pas la direction des rayons lumineux mais introduit un déplacement latéral d proportionnel à l'épaisseur de la lame.

$$d = e \left(1 - \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{milieu}}} \right)$$

Application : couches anti-reflet des lunettes de Soleil ou des instruments optiques comme l'appareil-photo ou les jumelles

exemple :

Une lame de verre d'indice $n = 1,5$ est disposée sur le trajet d'un rayon lumineux de manière à former un angle d'incidence de 30° .

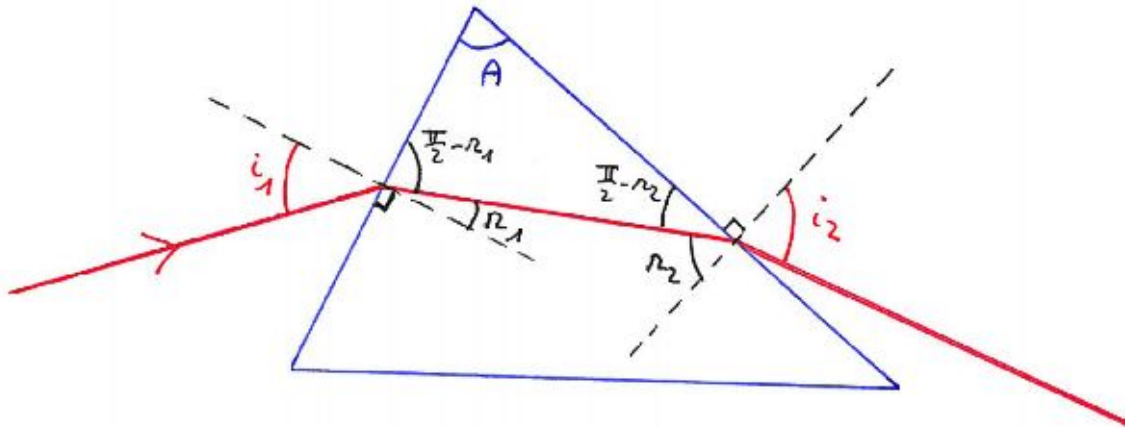
Sur quelle distance le faisceau est-il déplacé latéralement si la lame a une épaisseur de 2 cm ?

(réponse : $d = 6,67 \text{ mm}$)

f) Prisme :

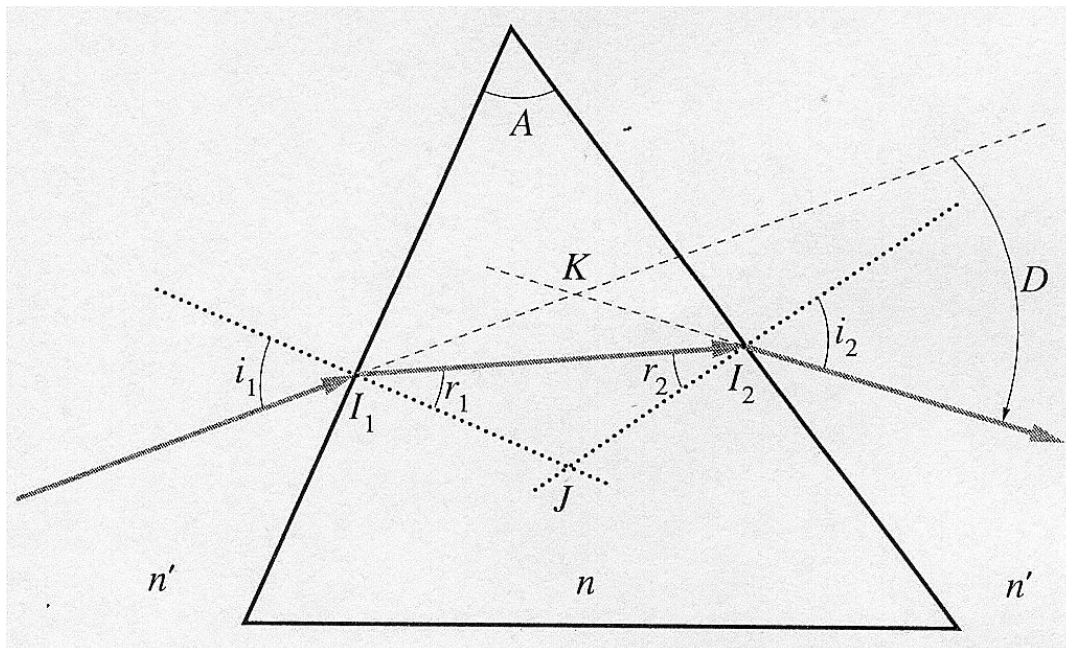
Soit un prisme d'indice n et d'angle au sommet : \hat{A}

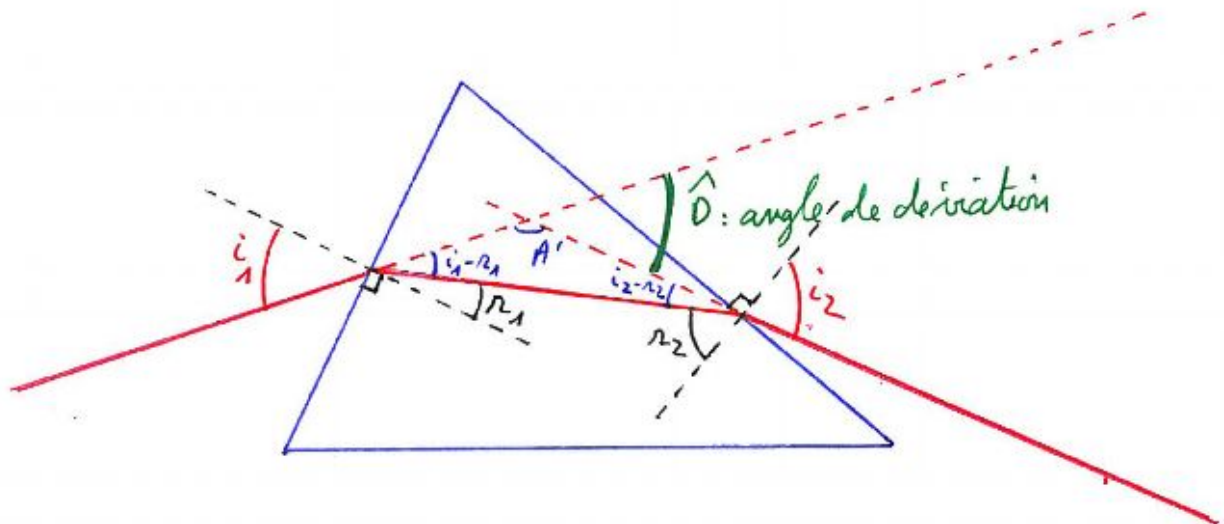
Angle de déviation \hat{D} :



On a dans le 'triangle du dessus' : $\hat{A} + \left(\frac{\pi}{2} - r_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - r_2\right) = \pi$

$$\hat{A} + \pi - r_1 - r_2 = \pi \quad \text{donc} \quad \hat{A} = r_1 + r_2$$





$$A' + i_1 - r_1 + i_2 - r_2 = \pi \quad \text{et} \quad \pi = D + A'$$

$$A' = \pi - i_1 + r_1 - i_2 + r_2$$

$$d'où : \quad \pi = D + (\pi - i_1 + r_1 - i_2 + r_2)$$

$$D = i_1 + i_2 - (r_1 + r_2)$$

$$\Rightarrow \text{angle de déviation : } \hat{D} = i_1 + i_2 - \hat{A}$$

Remarque :

- Plus l'indice n du prisme est élevé, plus la déviation \hat{D} est importante
- Minimum de déviation \hat{D}_m : lorsqu'on fait varier l'angle d'incidence i , la déviation \hat{D} d'un rayon monochromatique par le prisme passe par un minimum ; ce minimum est atteint lorsque $i_1 = i_2$, ce qui impose une condition sur l'indice n :

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\hat{D}_m + \hat{A}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\hat{A}}{2}\right)}$$

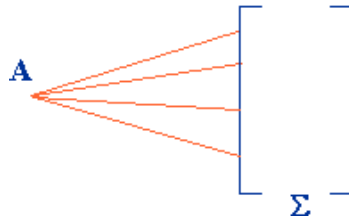
Partie 2 : Lentilles et instruments d'optique

1. Conditions de Gauss :

système optique : il est défini par la présence de surfaces polies qui s'interposent sur les trajets lumineux se propageant dans des milieux transparents et homogènes..

point objet (ou objet ponctuel) : ensemble de rayons lumineux entrant dans le système optique Σ ; il joue le rôle de source de lumière pour le système optique

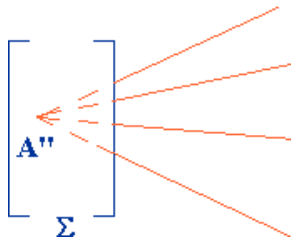
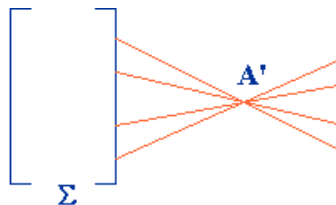
- le point objet est réel *si la lumière passe réellement* par ce point de concours
- le point objet est virtuel sinon (ce sont les *prolongements* des rayons lumineux qui y passent par le point de concours)



(remarque : les rayons issus d'un point objet à l'infini sont parallèles)

point image (ou image ponctuelle) : il se trouve au point de concours des rayons lumineux émergents

- le point image est réel si les rayons lumineux émergents passent réellement par ce point de concours
- le point image est virtuel sinon (ce sont les *prolongements* des rayons lumineux qui passent par le point de concours)

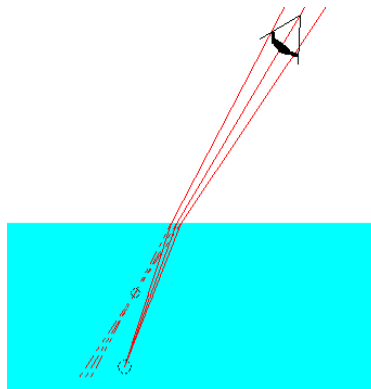


remarques :

- l'œil ne voit que les objets réels et les images virtuelles
- seule une image réelle peut être vue sur un écran ou une pellicule photo (pas les images virtuelles)
- au point de vue des constructions, tout ce qui est réel apparaîtra en *trait continu plein*, tout ce qui est virtuel apparaîtra en *pointillés*

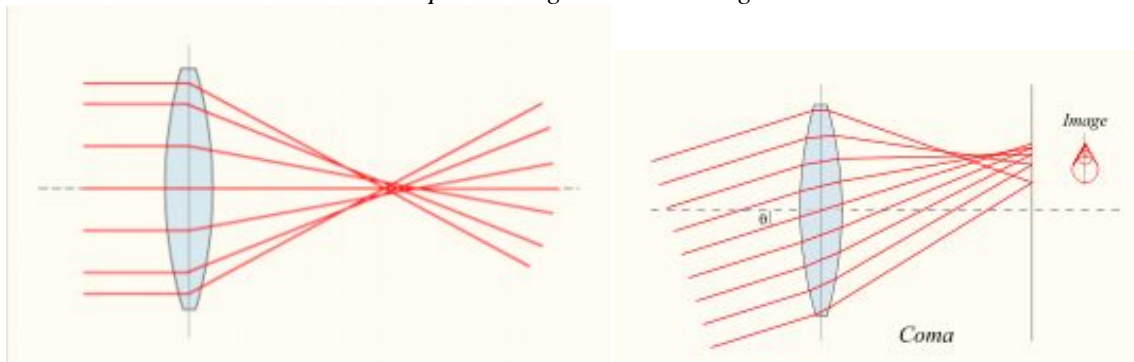
stigmatisme rigoureux : lorsque tout rayon passant par un point objet A, passe, après avoir traversé un système optique, par un unique point image A'

- le miroir plan est rigoureusement stigmatique (bien que l'image soit virtuelle)
- le dioptre plan n'est en général pas stigmatique, il n'y a pas de point image unique, sauf pour un faisceau limité comme le montre l'illustration ci-dessous :



stigmatisme approché : à l'exception du miroir plan, les systèmes optiques usuels ne sont pas rigoureusement stigmatiques, ils ne donnent pas une image nette pour n'importe quelle position de l'objet

exemples de stigmatisme non rigoureux :



Conditions de Gauss : la plupart des systèmes optiques présentent des défauts (aberrations), ils ne sont pas rigoureusement stigmatiques ; des images de bonne qualité (c-à-d rigoureusement stigmatiques, nettes), sont obtenues pour des rayons lumineux vérifiant les conditions de Gauss :

- les rayons sont peu inclinés par rapport à l'axe optique ($\leq 1^\circ$) : dans ces conditions, on a :
 $\tan \alpha \approx \alpha$ et $\sin \alpha \approx \alpha$
- les rayons sont proches de l'axe optique (par comparaison à la taille des instruments d'optique)

Les rayons sont alors dits *paraxiaux* (voisins de l'axe et peu inclinés sur celui-ci)

Pour réaliser ces conditions, il faut :

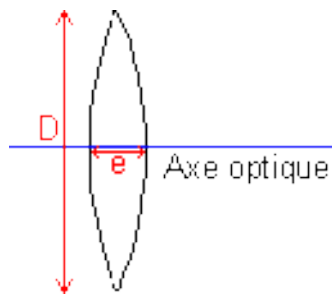
- Diaphragmer le système optique
- Observer des objets de petite dimension au voisinage du centre optique.

Note : avec un angle $\leq 1^\circ$, les figures seraient quasi illisibles ; on agrandit donc toujours les figures pour schématiser plus clairement la situation

2. Les lentilles minces - Construction d'une image donnée par une lentille mince :

Une lentille est un système optique formé de deux ou plusieurs dioptries, dont l'un au moins est sphérique (le ou les autres peuvent être plans).

Une lentille est dite mince si son épaisseur e est négligeable devant son diamètre D : $e \ll D$



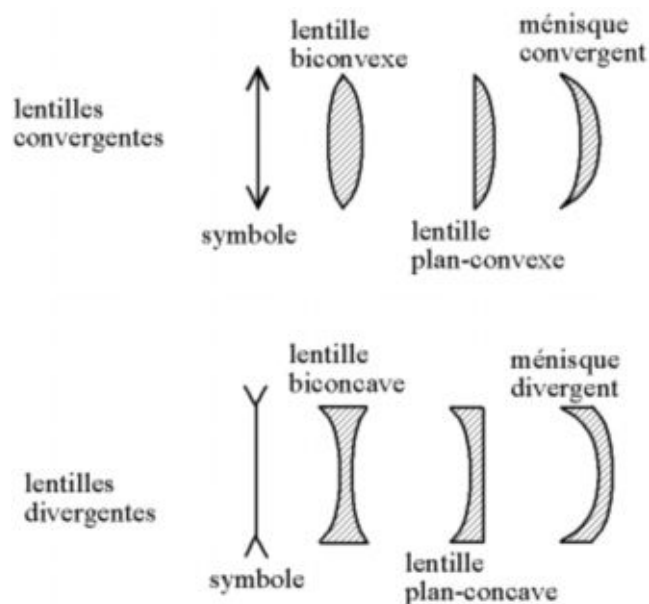
On distingue six types de lentilles :

a) les lentilles convergentes :

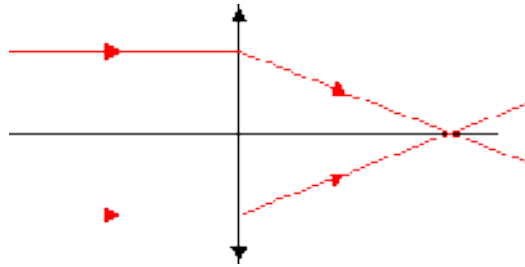
- lentille biconvexe : les deux dioptries sont sphériques
- lentille plan-convexe : un des dioptries est sphérique, l'autre est plan
- ménisque convergent : les deux dioptries sont sphériques

b) les lentilles divergentes :

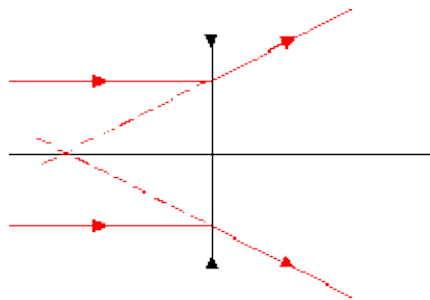
- lentille biconcave : les deux dioptries sont sphériques
- lentille plan-concave : un des dioptries est sphérique, l'autre est plan
- ménisque divergent : les deux dioptries sont sphériques



- Une lentille mince convergente transforme un faisceau de rayons parallèles en un faisceau convergent :



- Une lentille mince divergente transforme un faisceau de rayons parallèles en un faisceau divergent :



a) Caractéristiques d'une lentille mince convergente :

Un système optique centré possède une symétrie de révolution autour d'un axe appelé **axe optique Δ** . Une lentille possède un tel axe. On appelle **centre optique O** (ou sommet S) le point de cet axe situé au milieu de la lentille

F' : foyer-image, c'est le point de convergence d'un faisceau parallèle à l'axe optique
 \Rightarrow **distance focale image : $f' = \overline{OF'} \geq 0$ (pour lentille convergente)**

plan focal-image : plan perpendiculaire à l'axe optique Δ et passant par F' ; les points du plan focal-objet sont appelés foyers secondaires

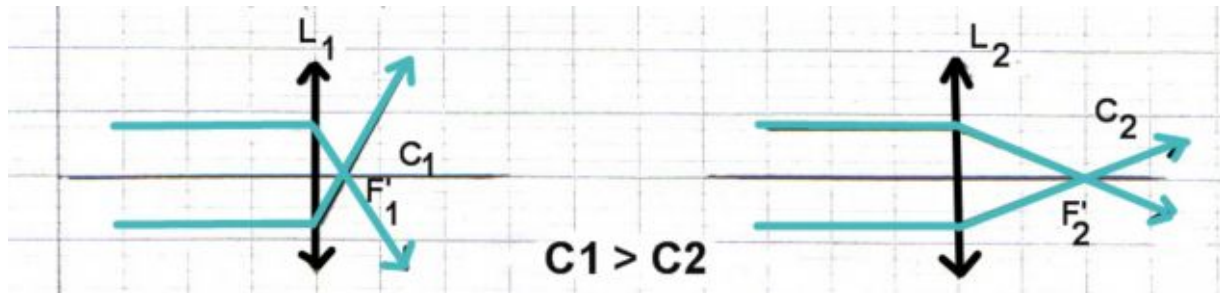
F : foyer-objet ; en vertu du principe de retour inverse de la lumière, le foyer principal objet (F) a pour image un point placé à l'infini sur l'axe optique ; autrement dit, un rayon passant par le foyer principal objet F émerge du système parallèlement à l'axe optique
 \Rightarrow **distance focale objet $f = \overline{OF} \leq 0$ (pour lentille convergente)**

plan focal-objet : plan perpendiculaire à l'axe optique Δ et passant par F

Vergence C : grandeur qui sert à caractériser les capacités de focalisation d'un système.

On a : $C = \frac{1}{f'}$
C en dioptries δ , f' est en m

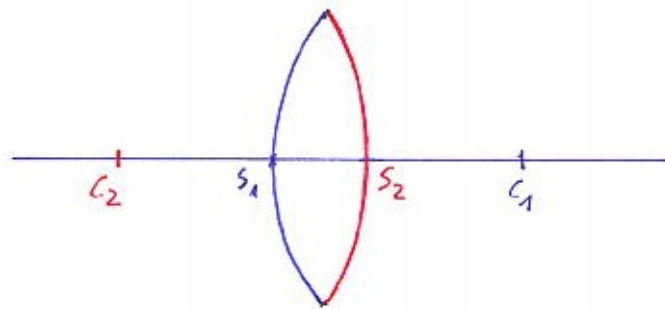
- Plus C est grande, plus la lentille est convergente
- Plus f' est faible, plus la lentille est convergente



⇒ La vergence d'une lentille mince peut se calculer par la **formule des Opticiens** :

$$C = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{S_1 C_1} - \frac{1}{S_2 C_2} \right)$$

- avec n : indice de réfraction du milieu transparent constituant la lentille
- $S_1 C_1$: rayon de courbure du dioptré sphérique de centre optique S_1
- $S_2 C_2$: rayon de courbure du dioptré sphérique de centre optique S_2



(Remarque : si l'un des dioptrés est un miroir plan, son rayon de courbure est considéré comme infini et l'on a : $\frac{1}{S_1 C_1} = 0 \Rightarrow C = \left(\frac{n-1}{S_2 C_2} \right)$)

Lentilles accolées :

La vergence équivalente C_{eq} de deux lentilles accolées C_1 et C_2 est :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 \quad (C_{eq} \text{ augmente})$$

La distance focale équivalente est alors : $\frac{1}{f'_{eq}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$ (f'_{eq} diminue)

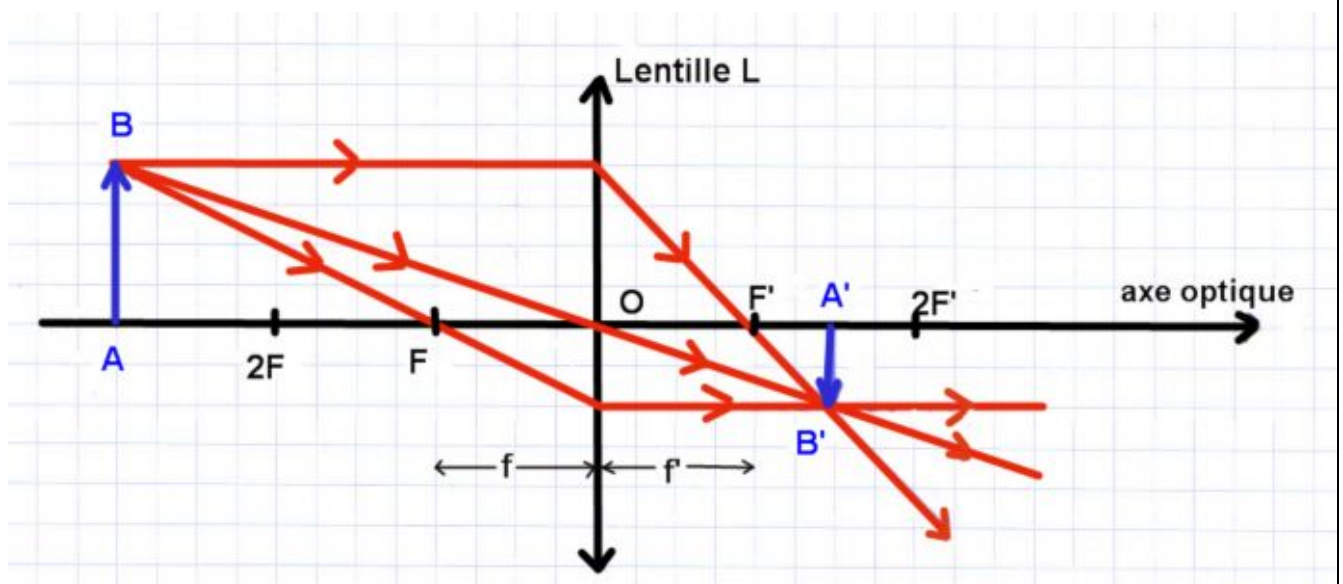
La vergence de n lentilles accolées est : $C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$ (C_{eq} augmente)

La distance focale équivalente est alors : $\frac{1}{f'_{eq}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} + \dots + \frac{1}{f'_n}$ (f'_{eq} diminue)

marche des rayons :

- *tout rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié*
- *tout rayon passant par F émerge parallèlement à l'axe optique Δ*
- *tout rayon parallèle à l'axe optique Δ passe par F'*

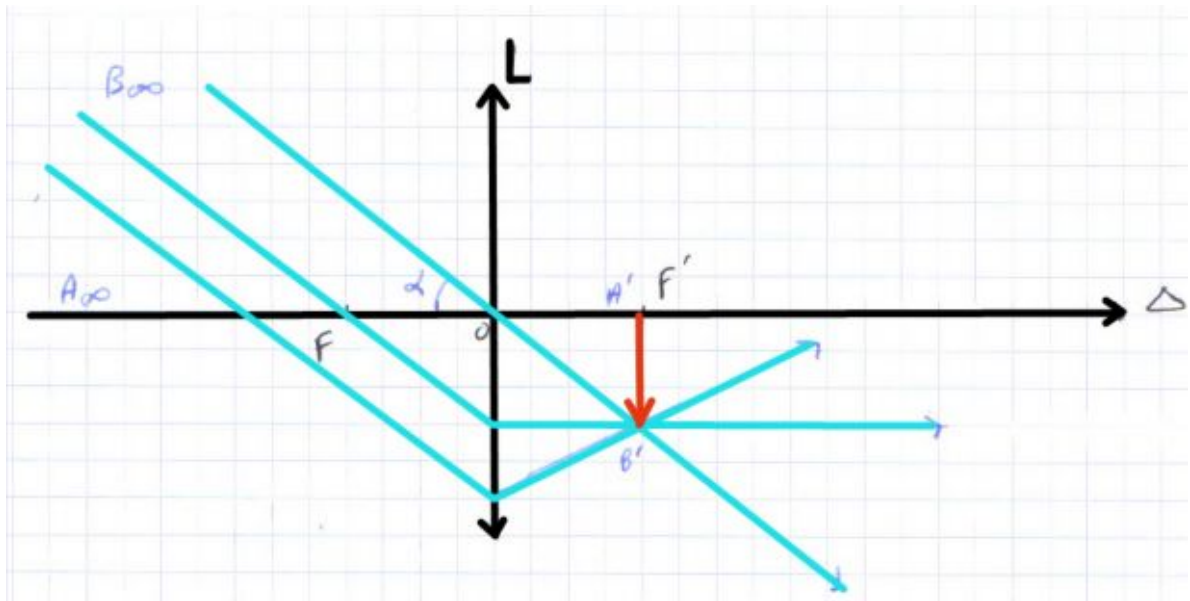
remarque : deux rayons suffisent pour les tracés



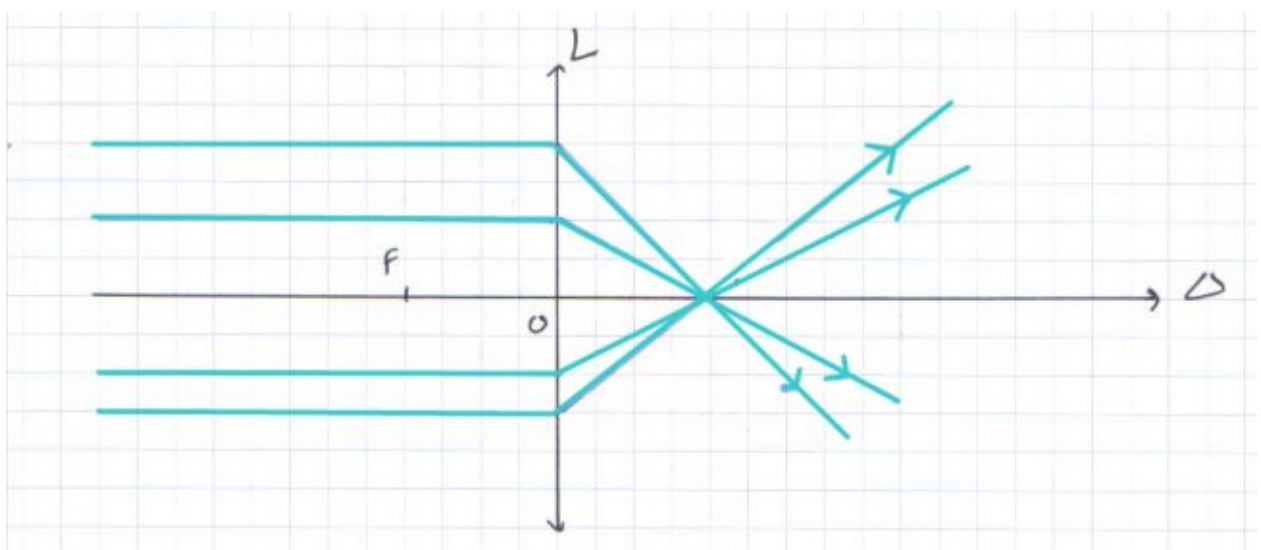
b) Construction d'une image donnée par une lentille mince convergente :

→ **cas 1 : objet réel à l'infini (> 50 m) : l'image est réelle et renversée (c'est le fonctionnement de l'œil et de l'appareil photo)**

L'image d'un objet à l'infini se forme dans le plan-focal image (F')

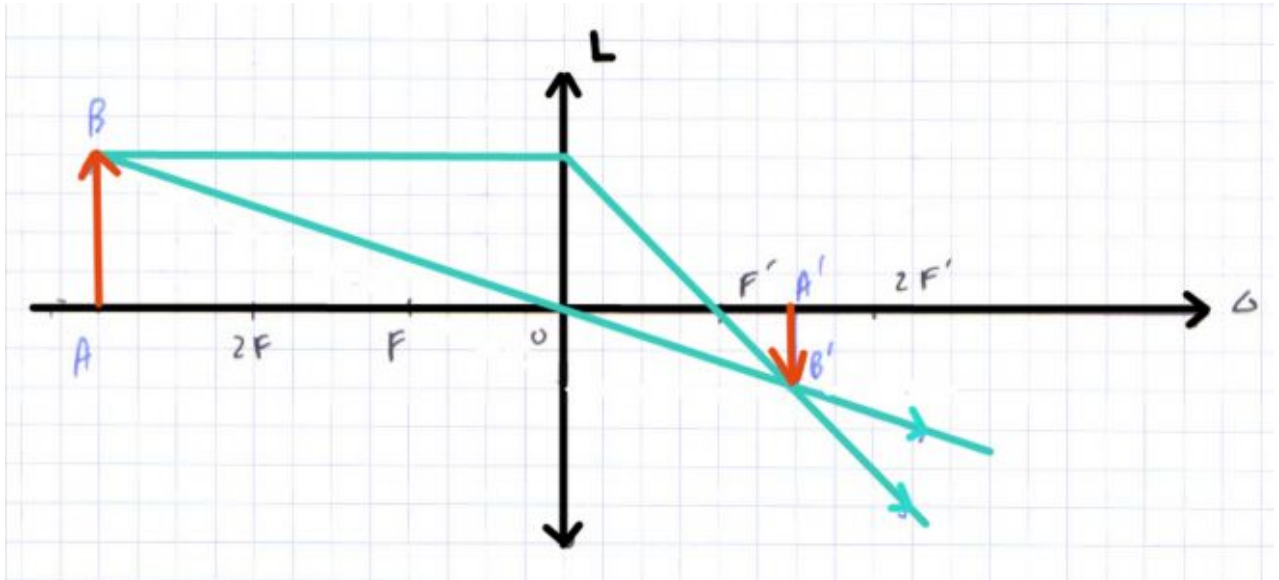


Plus les rayons venant de l'infini sont parallèles, plus l'image formée dans le plan-focal image se rapproche du foyer-image F' : l'image est alors ponctuelle

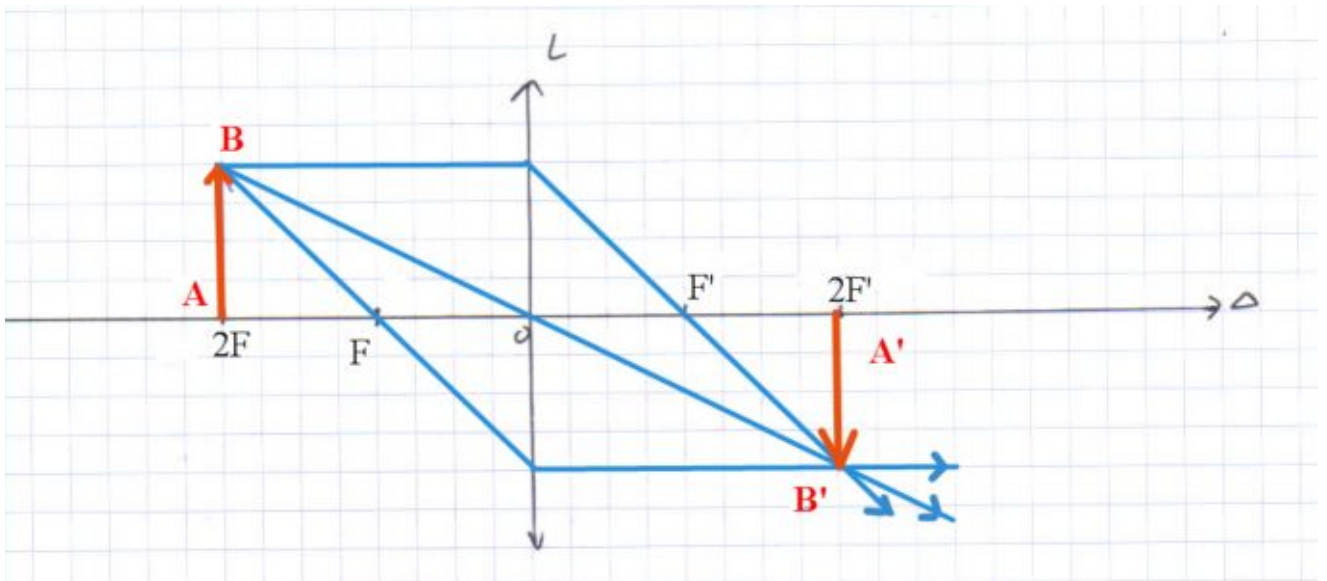


→ **cas 2 :** objet entre l'infini et $2F$: l'image est réelle, renversée, et plus petite que l'objet

L'image s'éloigne du plan-focal image et devient plus grande, mais encore inférieure à l'objet AB

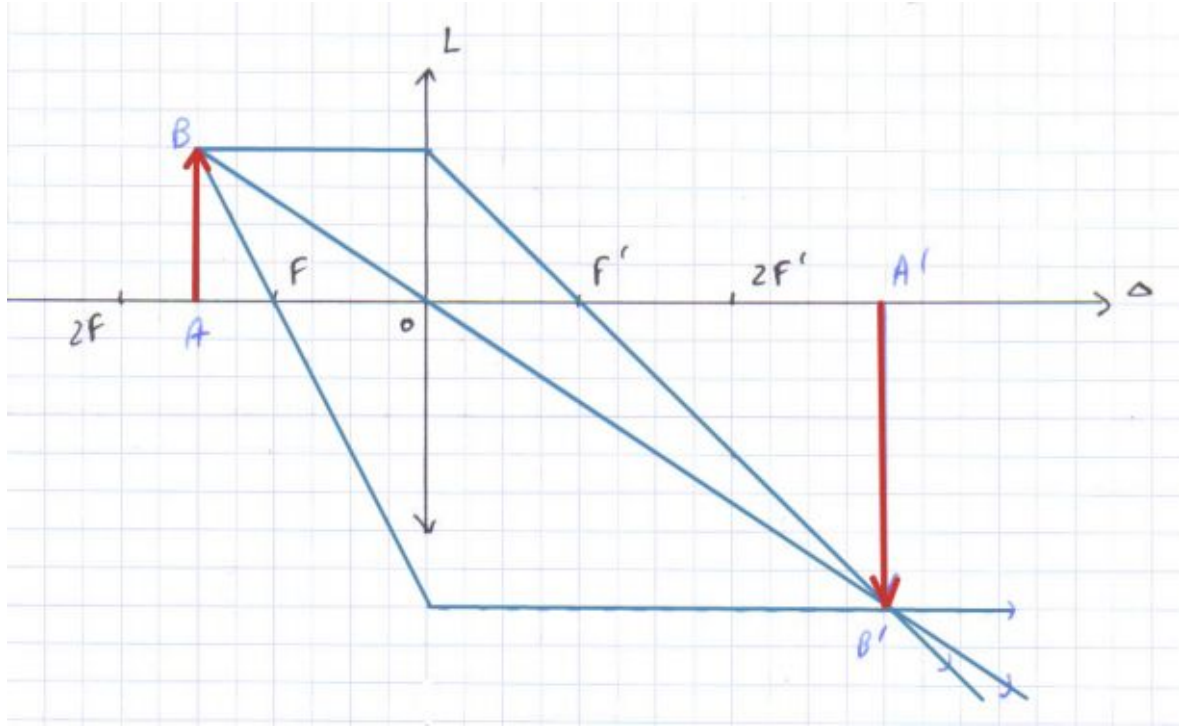


→ **cas 3 :** objet placé à $2F$: l'image est à $2F'$, elle est de même taille que l'objet et renversée



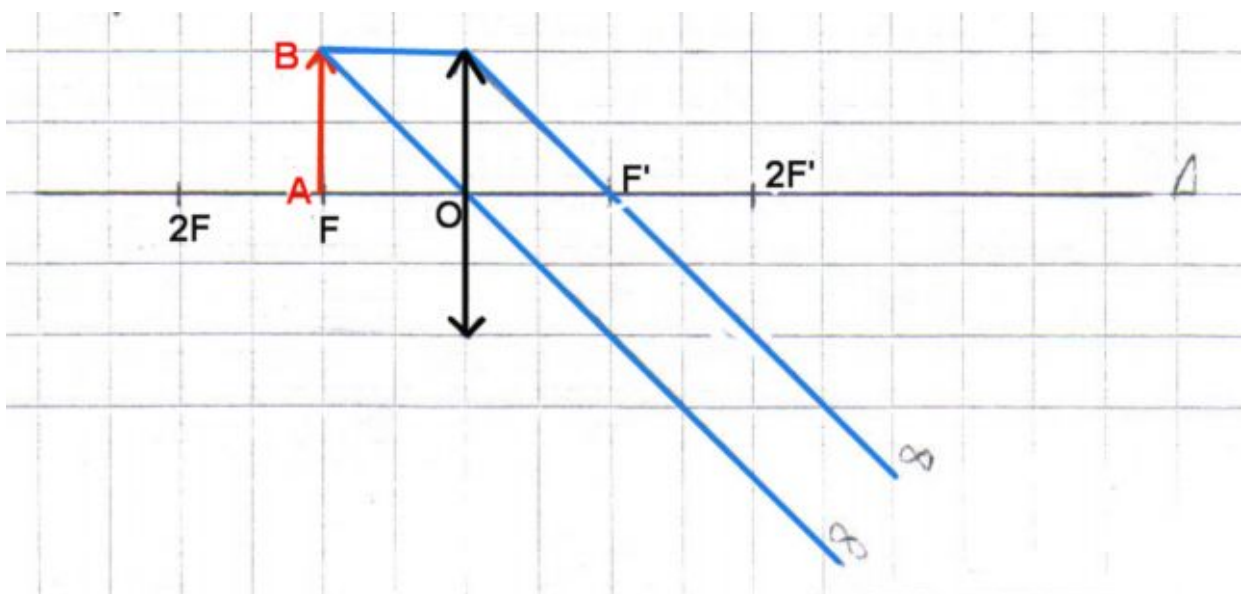
→ **cas 4** : objet entre $2F$ et F : image réelle, renversée, agrandie

L'image est au-delà de $2F'$ et peut être reçue sur un écran



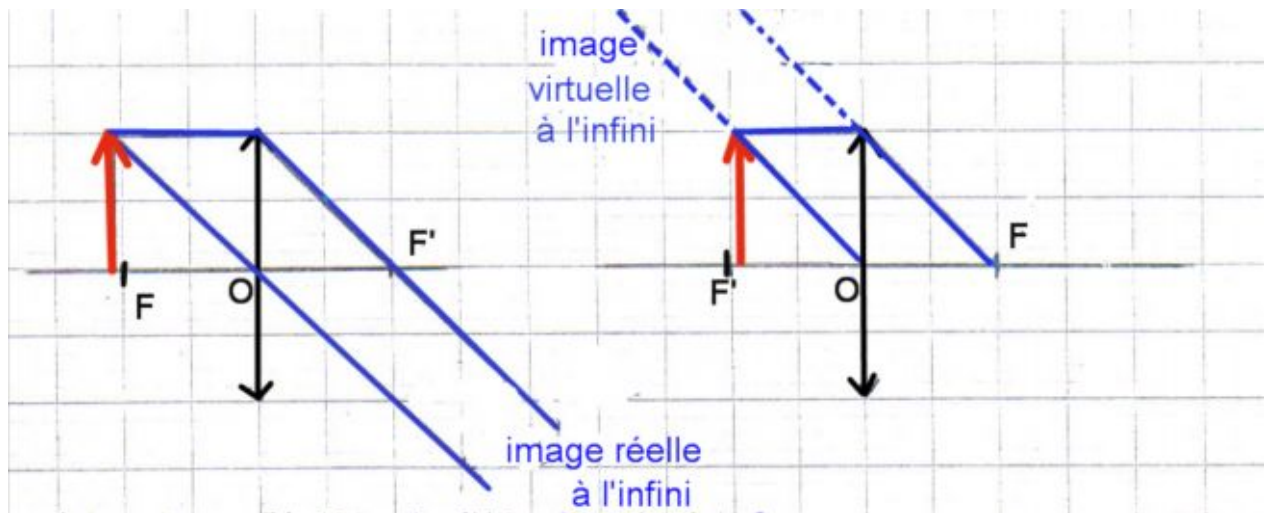
→ **cas 5** : objet au foyer F : image rejetée à l'infini

l'image n'est plus clairement observable sur un écran, on voit seulement une tache lumineuse floue



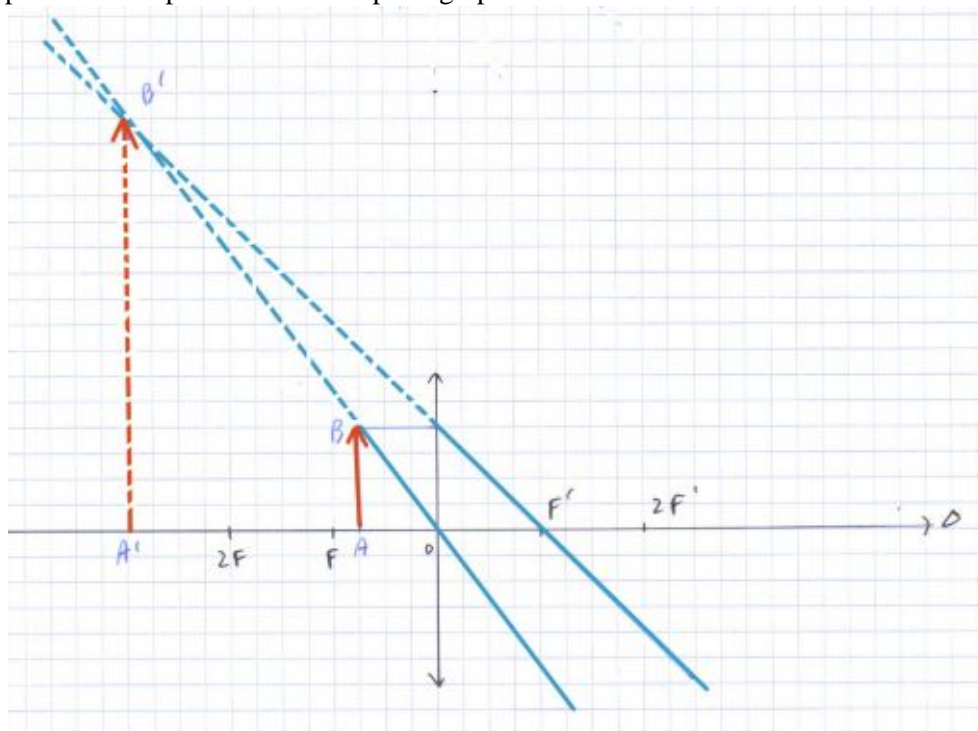
Remarque importante : discontinuité quand l'objet traverse le foyer-objet

- l'image passe de l'infini réel à droite à l'infini virtuel à gauche
- dans les deux cas : un immense flou



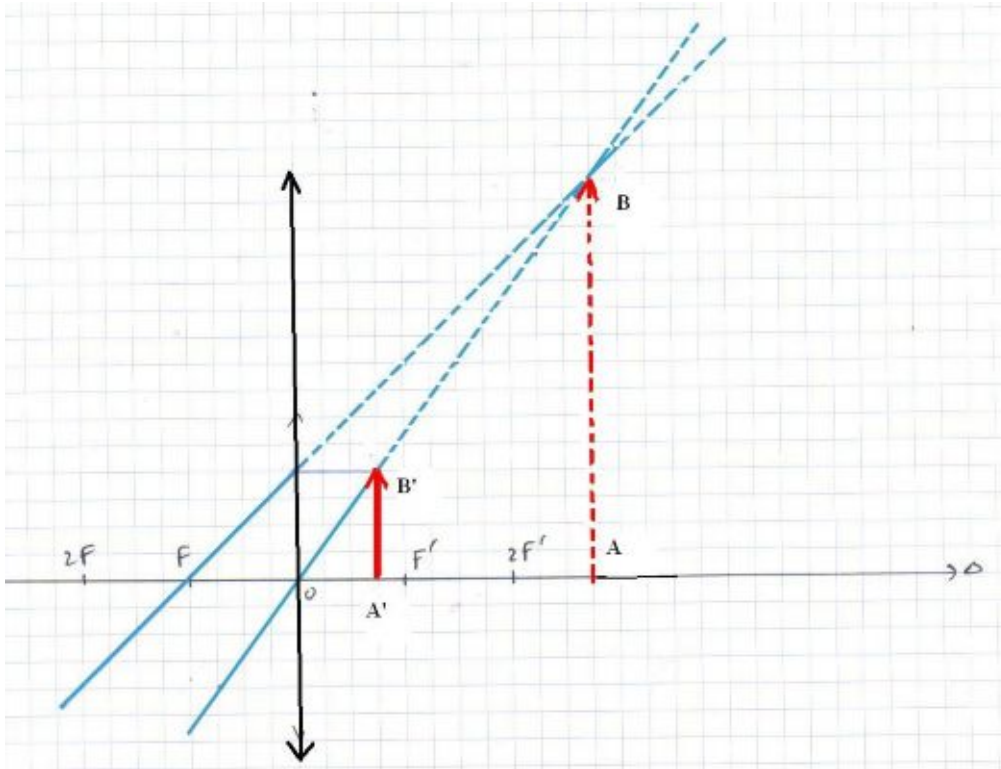
→ cas 6 : objet entre F et O : image virtuelle, agrandie, et à l'endroit

L'image se forme derrière la lentille, c'est le principe de la **LOUPE** ; on ne peut recevoir l'image sur un écran, par contre on peut la voir ou la photographier



→ **cas 7 : objet virtuel (derrière O) : image réelle, droite, et réduite**

remarque : un objet virtuel pour un système optique correspond en fait à l'image d'un dispositif optique placé devant le système considéré (voir microscope et lunette astronomique)



Déplacement de l'objet et de l'image :

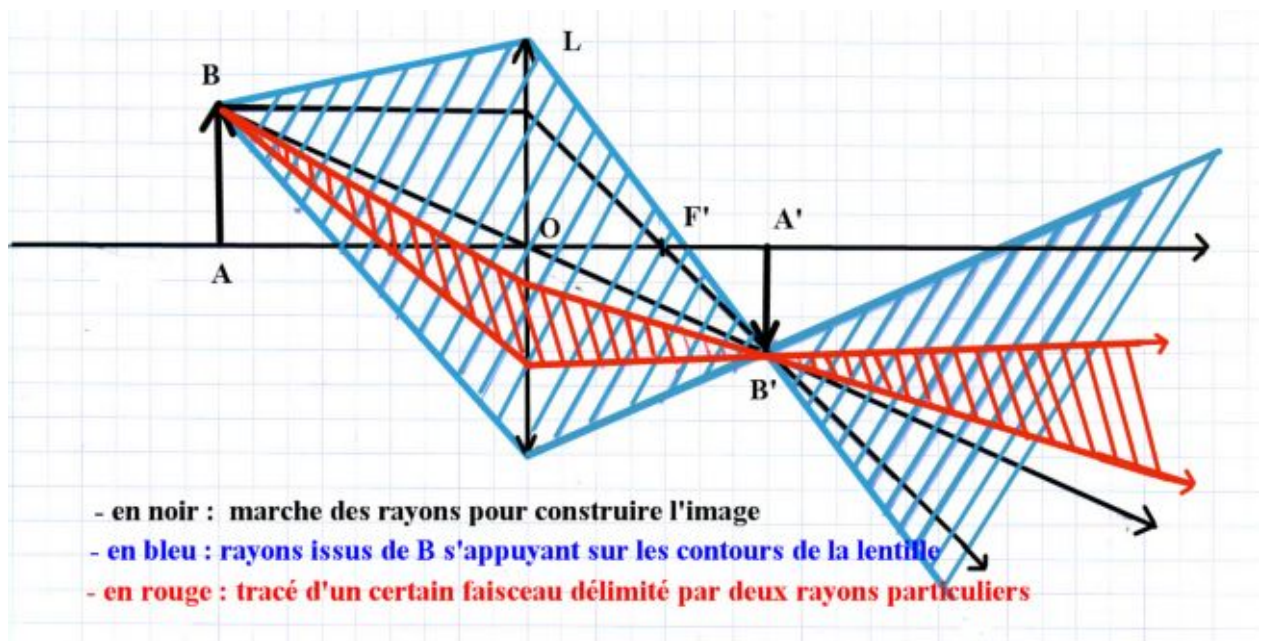
*Quand l'objet se déplace parallèlement à l'axe optique,
l'image se déplace **DANS LE MEME SENS** :*

- lors du déplacement de l'objet de l'infini jusqu'à F : l'image se déplace de F' jusqu'à l'infini (infini à droite)
- quand l'objet se déplace de F à 0 : l'image se déplace de l'infini (infini à gauche) jusqu'à la lentille

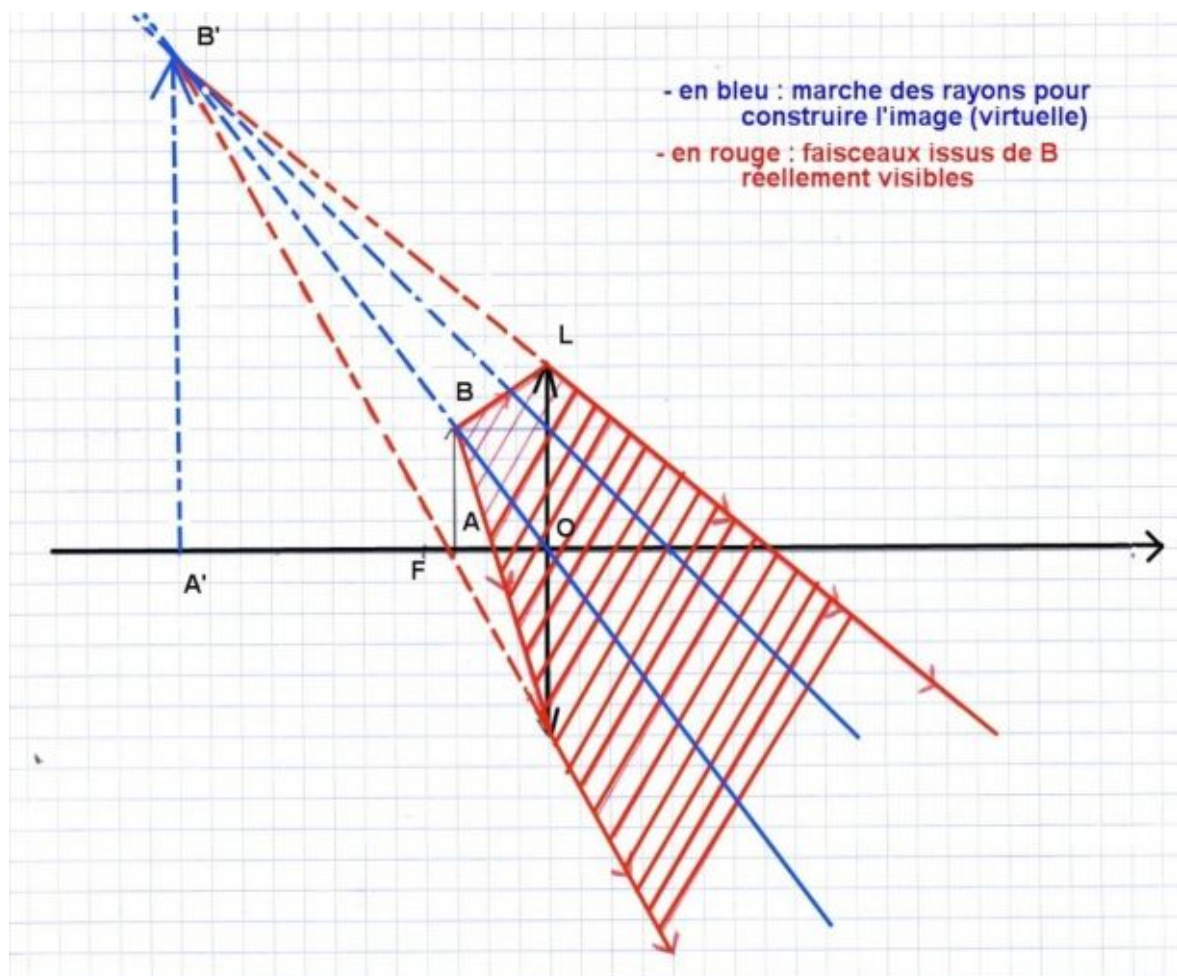
c) Tracé du faisceau lumineux traversant la lentille :

Pour l'œil, tout se passe comme si le faisceau lumineux de lumière provenait du point B ; pour tracer le faisceau, il faut tracer les rayons issus de B s'appuyant sur les contours de la lentille et arrivant en B'

Faisceau lumineux d'une lentille convergente avec image réelle



Faisceau lumineux d'une lentille convergente avec image virtuelle (loupe)



d) Caractéristiques d'une lentille mince divergente :

F et F' sont virtuels (et inversés par rapport à la lentille convergente)

Δ : axe optique

O : centre optique

F : foyer-objet \Rightarrow distance focale objet $f = \overline{OF} \leq 0$

plan focal-objet : perpendiculaire à Δ et passant par F

F' : foyer-image \Rightarrow distance focale objet : $f' = \overline{OF'} \leq 0$

plan focal-image : perpendiculaire à Δ et passant par F'

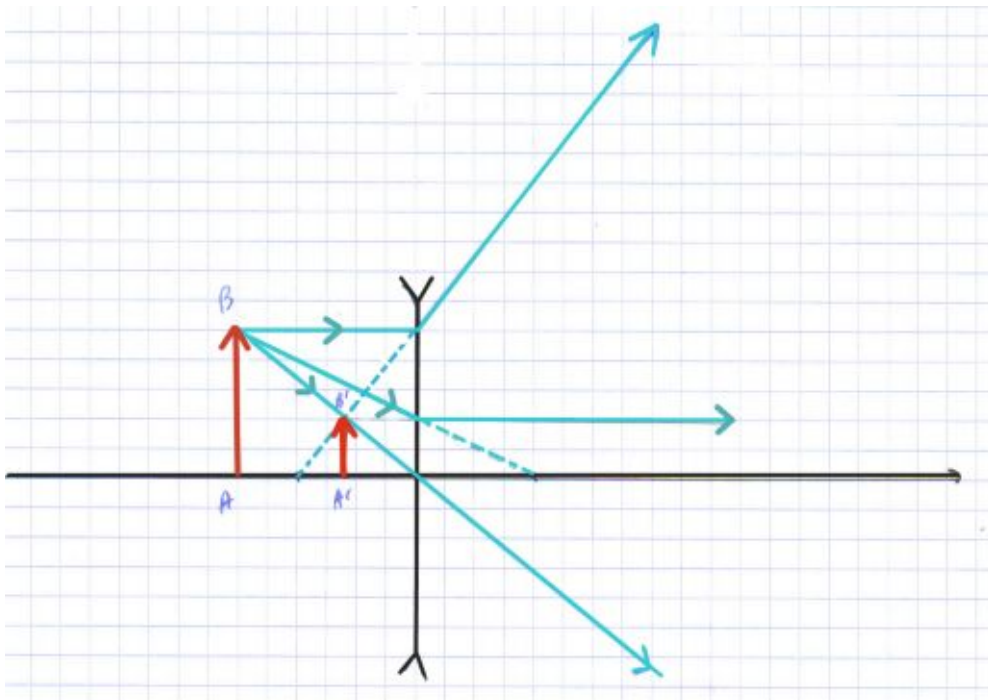
Les lentilles divergentes ne fonctionnent que d'une seule façon, elles ne donnent que des images virtuelles (du même côté que l'objet), droites, et réduites quelle que soit la position de l'objet.

marche des rayons :

- ***tout rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié***
- ***tout rayon incident semblant pointer sur F émerge parallèlement à l'axe optique Δ***
- ***tout rayon incident parallèle à l'axe optique Δ émerge en semblant provenir de F'***

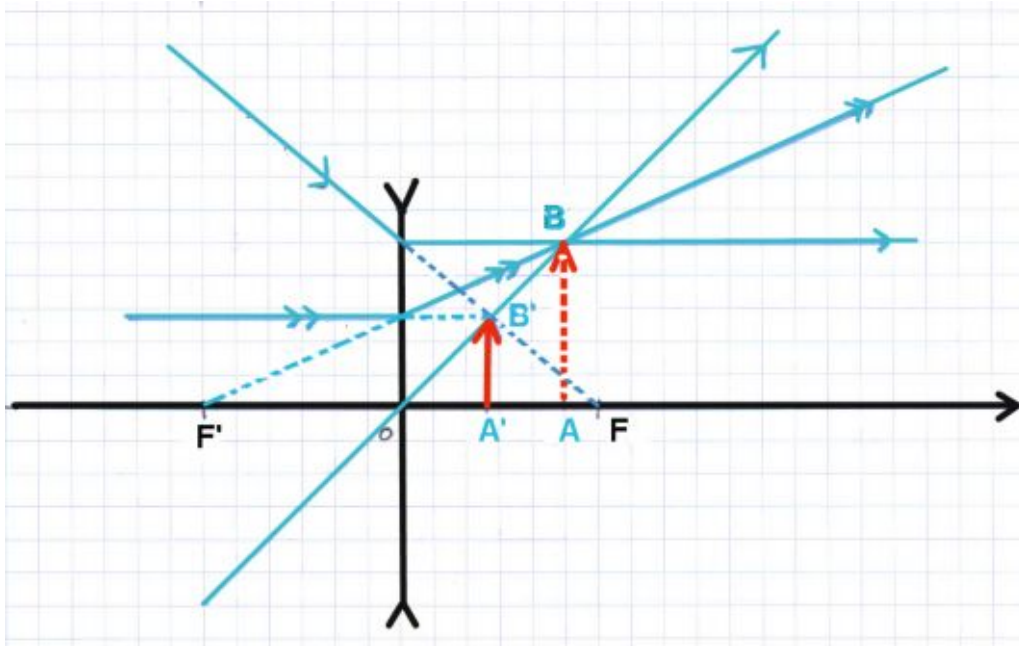
e) Construction d'une image donnée par une lentille mince divergente :

- **cas 1 : objet réel : image virtuelle, droite, réduite**



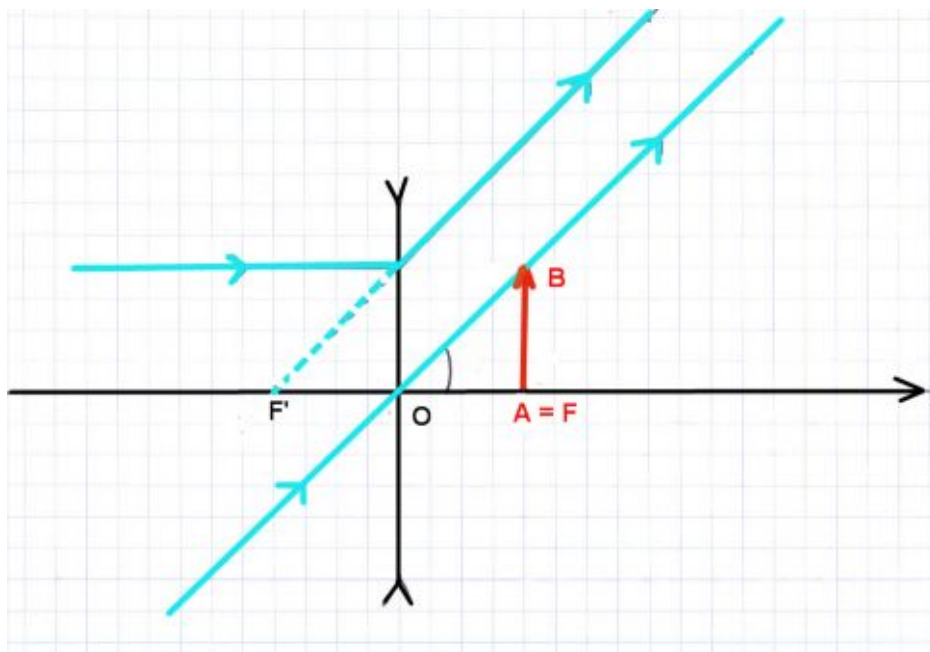
remarque : lorsqu'on observe un texte à travers une lentille divergente, l'image du texte est réduite (moyen rapide de savoir si une lentille est convergente ou divergente)

→ **cas 2 : objet virtuel situé devant le plan focal-objet (entre O et F) : image réelle, droite, agrandie**

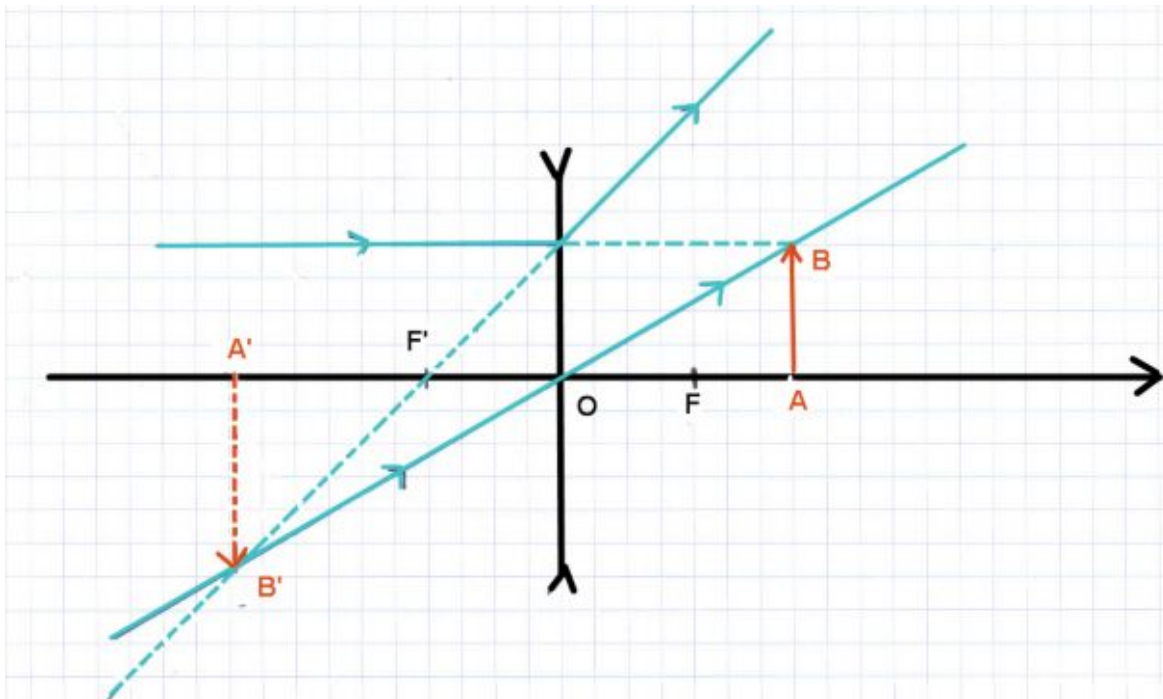


→ **cas 3 : objet virtuel au plan focal-objet : image rejetée à l'infini,**

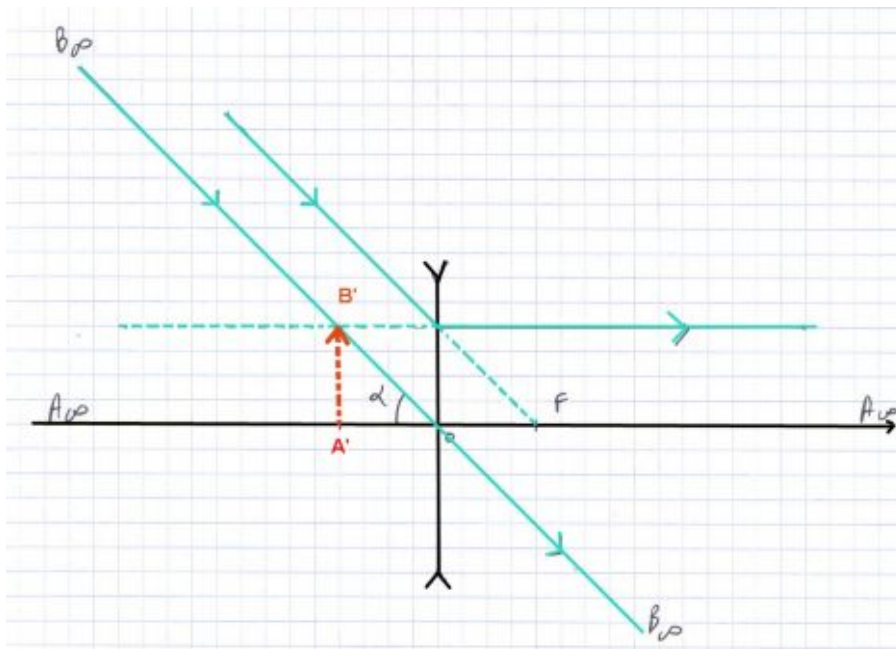
La dimension de l'image est caractérisée par son diamètre apparent $\alpha = \frac{AB}{-f'}$



→ cas 4 : objet virtuel derrière le plan focal-objet : image virtuelle, renversée, agrandie si l'objet est entre F et 2F, réduite si l'objet est entre 2F et l' ∞



→ cas 5 : objet à l' ∞ : image virtuelle, dans le plan focal-image



$$\alpha = \frac{A'B'}{-f'}$$

3. Relations de conjugaison et de grandissement :

valeur algébrique : Pour savoir l'image se trouve à droite ou à gauche du système, et en-dessous ou au-dessus, on doit algébriser les distances

Si le point A est avant O ou en-dessous de O : $\overline{OA} < 0$ et $\overline{OA} = -OA$

Si le point A est après O ou au-dessus de O : $\overline{OA'} > 0$ et $\overline{OA'} = OA'$

a) **relation de conjugaison** : \Rightarrow pour trouver la position de l'image

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad (\text{précaution : tout mettre en mètres})$$

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{f'}{\overline{OA} \times f'} + \frac{\overline{OA}}{f' \times \overline{OA}}$$

$$d'où : \overline{OA'} = \frac{f' \times \overline{OA}}{f' + \overline{OA}}$$

b) **formules de grandissement** : \Rightarrow pour trouver la taille de l'image

Lorsque l'objet AB et son image A'B' sont à des distances finies de la lentille, on a le grandissement :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \quad (\gamma \text{ est sans unité})$$

- si $\gamma > 0$: l'image est droite
- si $\gamma < 0$: l'image est renversée
- si $-1 < \gamma < 1$; image réduite
- si $\gamma < -1$ ou $\gamma > 1$: image agrandie

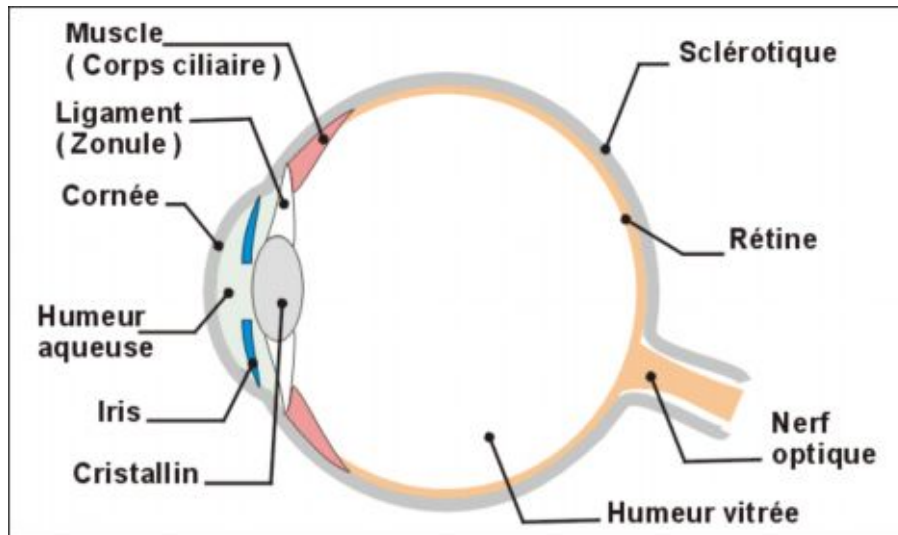
exemple : Soit une lentille de vergence $C = 100 \text{ } \delta$. Un objet AB de taille 2 cm est à 5 cm de cette lentille.

- quelle est la position et la taille de l'image ? (réponse : $\overline{OA'} = 1,25 \text{ cm}$ et $\overline{A'B'} = -5 \text{ mm}$)
- calculer le grandissement de cette lentille, conclure (réponse : $\gamma = -\frac{1}{4}$ donc image renversée et rétrécie)

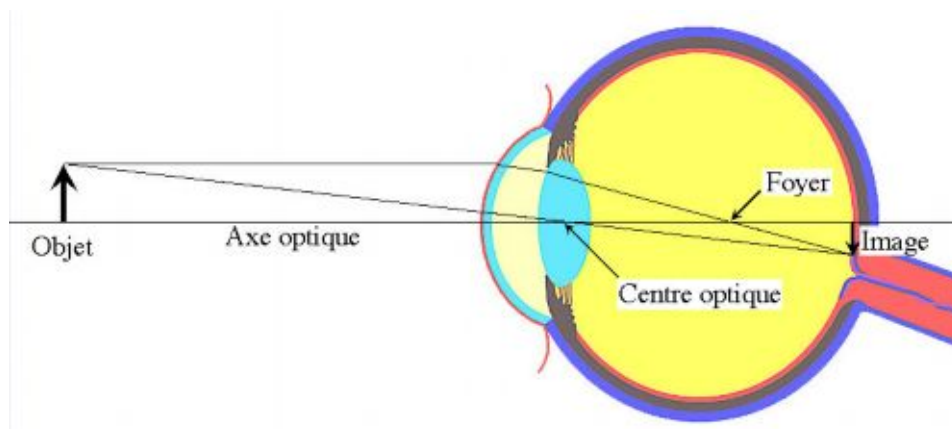
4. L'œil et la vision :

L'œil est un organe récepteur de lumière, il fonctionne comme une lentille convergente et donne d'un objet une image réelle et renversée

a) description anatomique :



- **l'iris** est un diaphragme percé d'une ouverture (la pupille) permettant de contrôler la quantité de lumière pénétrant dans l'œil.
- **le cristallin** : corps transparent ($1,39 < n < 1,63$) servant de lentille ; sa forme et sa distance focale sont contrôlées par les muscles ciliaires dont la tension ou le relâchement bombe plus ou moins le cristallin
- **la rétine** : écran constitué de cellules sensibles à la lumière (cônes et bâtonnets) où se forment les images (réelles et renversées). L'ensemble {rétine – nerf optique} code cette image sous forme d'influx nerveux et le transmet au cerveau qui l'interprète



b) accommodation :

L'œil ne voit une image nette que si celle-ci se forme sur la rétine

- pour les objets situés à l'infini (plus de 50 m), l'image se forme normalement sur la rétine : l'œil n'accomode pas, les muscles sont relâchés, l'œil est au repos ; le point le plus éloigné donnant une image nette sur la rétine sans accommodation est le **Punctum Remotum (PR)** ; pour un œil emmétrope (adulte normal), le Punctum Remotum est situé à l'infini et la vergence du cristallin est alors de 60 δ
- pour les objets proches, les muscles ciliaires ajustent la courbure du cristallin (qui devient alors plus ou moins bombé) afin que l'image se maintienne sur la rétine (remarque : une fois la courbure ajustée, les muscles se relâchent de nouveau)
- à partir d'une certaine distance, l'objet reste flou malgré les efforts que fournit l'œil ; la mise au point devient impossible à partir de cette **distance minimale (d_m)** de vision distincte. Cette limite net-flou est caractérisée par un point : le **Punctum Proximum (PP)** ; au PP l'œil accomode au maximum, pour un œil emmétrope $PP = d_m = 25 \text{ cm}$ et $C = 64 \delta$ (remarque : le PP est un point, d_m est une distance, ils signifient cependant quasiment la même chose)

c) le pouvoir séparateur de l'œil :

Au maximum d'accommodation, c'est-à-dire au PP, si deux points sont écartés d'un angle inférieur à 3.10^{-4} rad , l'œil ne peut plus les séparer et n'en voit qu'un seul.

Au Punctum Proximum, deux points séparés d'une distance h présentent une séparation angulaire

$$\alpha \approx \tan \alpha \approx \frac{h}{d_m}$$

$$\text{Donc : } h = \alpha \cdot d_m = 3.10^{-4} \times 0,25 = 0,1 \text{ mm} = (1/10)^e \text{ mm}$$

Ainsi, au maximum d'accommodation, les détails les plus fins qui puissent être observés à l'œil nu sont de l'ordre du
 $1/10^e$ de mm (0,1 mm), ce qui correspond à un angle de 3.10^{-4} rad

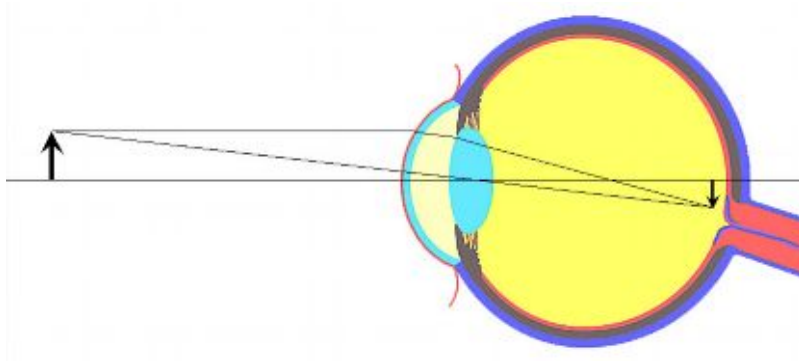
exemple : le passager d'un avion volant à 10 km d'altitude peut-il distinguer un immeuble cubique de 20 m de côté ? une moto de 1 m de long ? (réponse : à 10 km on arrive à distinguer des détails séparés de 3 m)

d) défauts de l'œil :

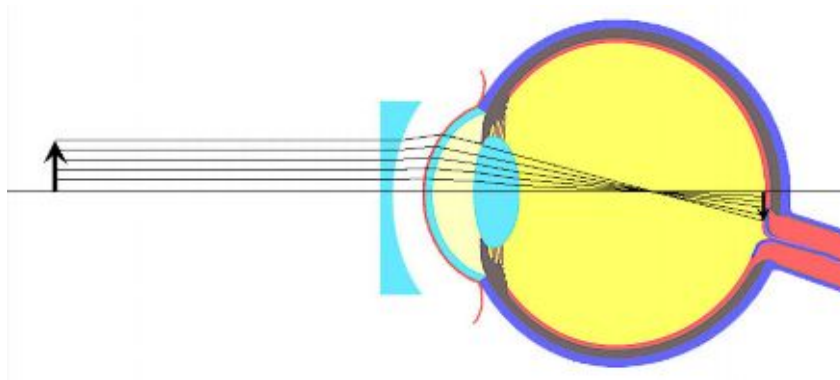
Le champ de vision de l'œil normal (emmétrope) s'étend normalement de $d_m = 25 \text{ cm}$ à l'infini ∞ ; l'effort d'accommodation de l'œil diminue lorsque la distance augmente : à d_m , l'accommodation est maximale, à l' ∞ l'œil observe sans accommodation et sans fatigue.

➤ **myopie :**

L'œil voit bien de près, puis de plus en plus flou au fur et à mesure que l'objet s'éloigne ; l'œil est trop long et/ou le cristallin trop convergent, l'image d'un objet éloigné se forme *avant la rétine* : la projection de cet objet sur la rétine donne donc une tache floue

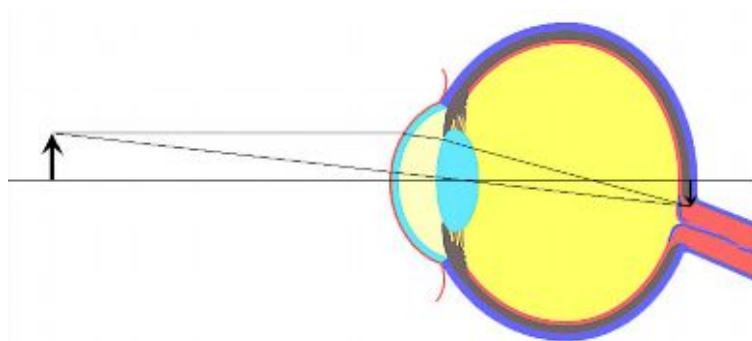


La correction de la myopie s'effectue au moyen de verres correcteurs divergents, par exemple des verres dont l'une face est plus concave que l'autre.



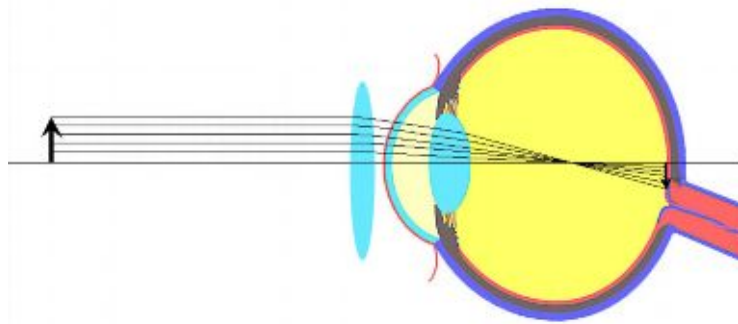
➤ **hypermétropie :**

L'œil hypermétrope ne peut discerner nettement les objets rapprochés ; l'œil est trop court et/ou le cristallin est trop peu convergent : l'image des objets rapprochés se forme sur un plan *derrière la rétine*. Sur la rétine se forme donc une tache floue circulaire



- si le sujet est jeune, le cristallin est capable de se déformer suffisamment pour compenser l'insuffisance dioptrique de l'œil, et l'image peut être ramenée sur la rétine. L'objet est vu net, mais l'effort constant (et inconscient) d'accommodation occasionne des maux de tête.
- Si le cristallin ne peut fournir l'effort d'accommodation nécessaire, l'image ne peut être ramenée sur la rétine : l'objet est vu flou

La correction de l'hypermétropie s'effectue au moyen de verres correcteurs convergens, par exemple des verres dont l'une face est plus convexe que l'autre.



➤ **presbytie :**

Avec l'âge, principalement après 45 ans, la rigidification progressive du cristallin produit une diminution progressive des capacités d'accommodation : les enfants peuvent lire de plus près que les adultes, et les vieilles personnes ne peuvent plus voir net de près.

La **presbytie** doit être compensée par des verres correcteurs convergents.

(Remarques : la presbytie ne compense en rien la myopie, car un myope presbyte voit toujours net de près, mais sa vision éloignée est déficiente).

A partir de 60 ans, l'accommodation peut devenir nulle, et deux types de verres correcteurs s'avèrent nécessaires: des verres convergents pour la vision rapprochée et des verres divergents pour la vision éloignée, souvent intégrés dans une même paire de lunettes aux verres progressifs)

➤ **astigmatisme :**

L'astigmatisme est une vision trouble provoquée par une cornée dont le profil évoque celui d'un ballon de rugby: elle est plus courbée dans un axe et trop aplatie dans un autre. Par conséquent la lumière se focalise sur la rétine dans des plans différents et l'image n'est jamais nette. La vue est floue tant de loin que de près.

5. Miroirs sphériques :

a) **Définition et notations :** c'est une portion de sphère réfléchissant les rayons lumineux incidents :

- Réflexion vers l'intérieur : miroir sphérique convexe
- Réflexion vers l'extérieur : miroir sphérique concave

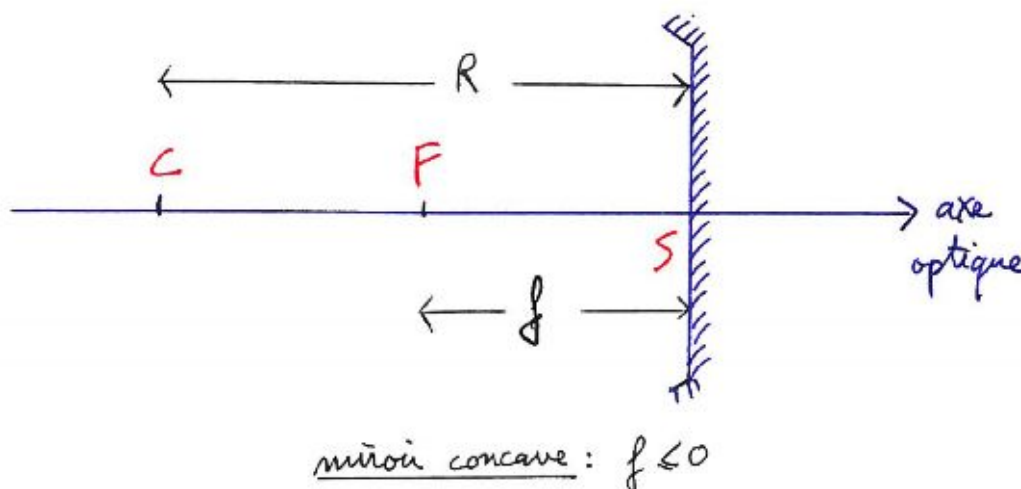
(Remarque : Un miroir plan est un miroir sphérique convergent de rayon infini.)

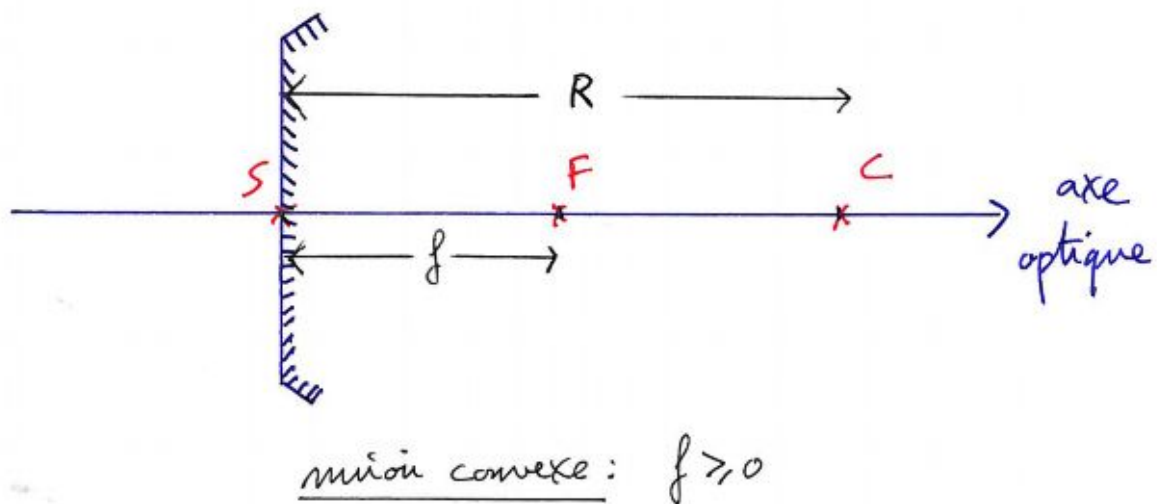
On note :

- **Sommet** du miroir (intersection axe optique-miroir) : S
- **Centre** de la sphère : C ; on peut noter le rayon $R = SC$
- **Foyers** : le foyer-objet F et le foyer-image F' sont confondus : $F = F'$
- **Distance focale** : distance entre le foyer F et le sommet S :

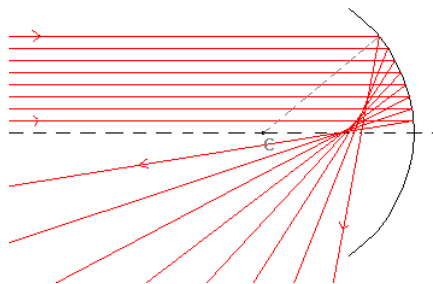
$$f = \overline{SF} = \frac{\overline{SC}}{2}; \text{ soit : } |f| = \frac{R}{2}$$

- Si $f \geq 0$, le miroir est convexe
- Si $f \leq 0$, le miroir est concave





- b) **Stigmatisme** : en toute rigueur, des rayons issus d'un même point source ne convergent pas
 \Rightarrow le miroir sphérique est astigmatique.



Cependant, si l'on se place dans les conditions de Gauss (les rayons frappent le miroir très près du sommet et forment un angle très petit avec l'axe du miroir), on peut considérer que les miroirs sphériques présentent un stigmatisme approché.

c) **Marche des rayons :**

- *tout rayon passant par le centre optique C n'est pas dévié*
- *tout rayon passant par le sommet S avec un angle d'incidence subit la loi de réflexion de Descartes et repart avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence*
- *tout rayon passant par F émerge parallèlement à l'axe optique Δ*
- *tout rayon parallèle à l'axe optique Δ passe par F'*

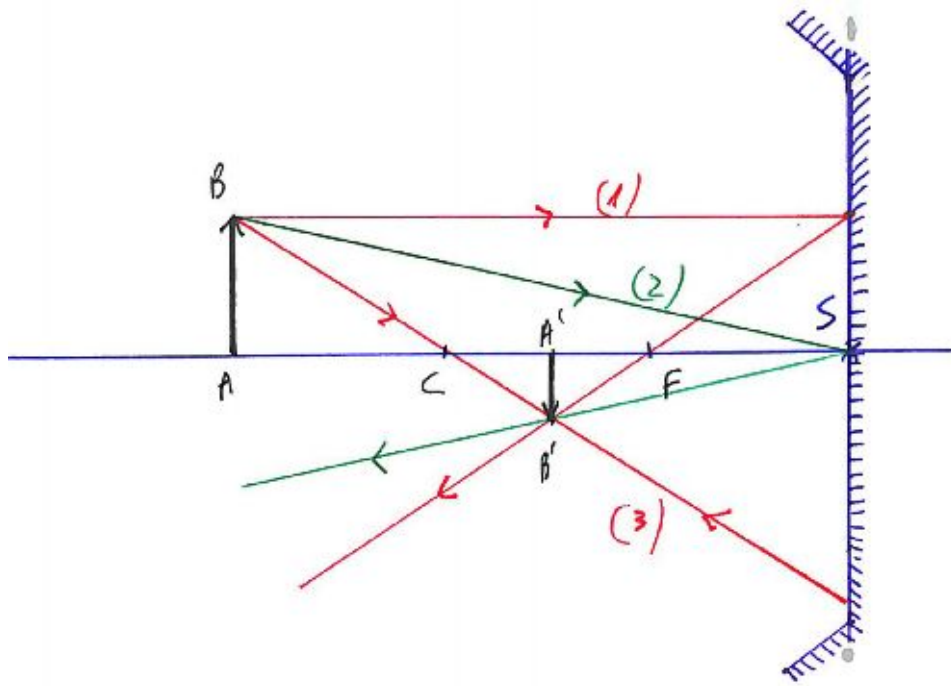


Image d'un objet par un miroir sphérique concave

- (1) : un rayon issu de B et parallèle à l'axe optique frappe le miroir perpendiculairement, puis repasse par F
- (2) : un autre rayon issu de B passe par le sommet S et subit la réflexion
- (3) : le rayon issu de B passant par C n'est pas dévié

d) Relation de conjugaison et de grandissement pour le miroir sphérique :

- Conjugaison avec origine au sommet S : relation de Descartes

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

- Conjugaison avec origine au foyer F : relation de Newton

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

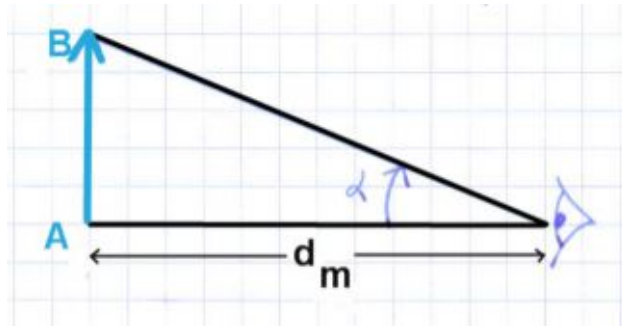
- Grandissement :

$$\gamma = \frac{-\overline{SA'}}{\overline{SA}} \quad \text{ou} \quad \gamma = \frac{f}{\overline{FA}}$$

6. Instruments d'optique :

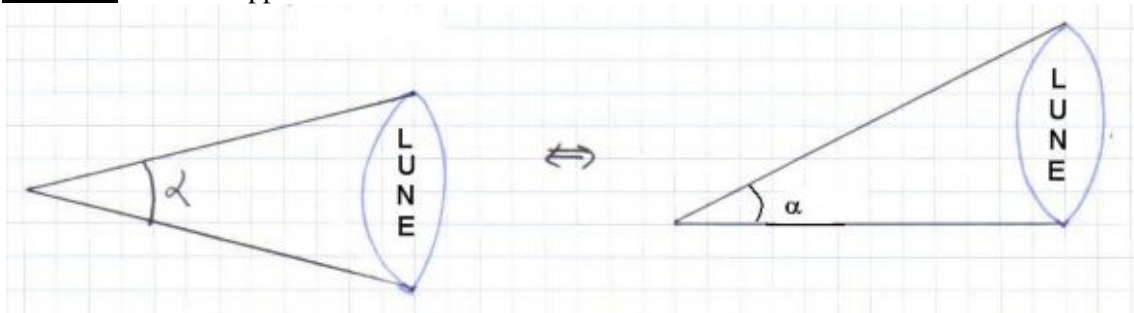
a) **diamètre apparent** : angle sous lequel un objet est vu à l'œil nu

En pratique, on peut toujours se ramener à une vue dans un triangle rectangle :



$$\alpha \sim \tan \alpha = \frac{AB}{d_m}$$

exemple : diamètre apparent de la Lune :



on assimile le cône à un triangle rectangle $\Rightarrow \alpha = \tan \alpha = \frac{D}{L} = 30' \text{ d'arc} = (1/2)^\circ$

(Rappel : $1^\circ = 60' \text{ arc}$)

- Le diamètre apparent augmente lorsqu'on rapproche l'objet de l'œil,
- le diamètre apparent est maximal quand l'œil est à son maximum d'accommodation, c'est-à-dire au Punctum Proximum PP, ou à la distance minimale de vision d_m . Pour un œil normal (emmétrope), $d_m = 25 \text{ cm}$

b) grossissement d'un instrument optique :

Comme souvent l'objet est à l'infini, il est difficile de calculer le grandissement γ qui prend en compte des distances ; on considère alors plutôt pour les instruments optiques le **grossissement G** , défini par :

$$G = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$$

avec α' : *angle (diamètre angulaire) sous lequel l'objet est vu à travers l'instrument*

α : *angle (diamètre apparent) sous lequel l'objet est vu à l'œil nu*

G est sans unité

Les instruments d'optique permettent de voir les objets sous un angle (α') supérieur à l'angle sous lequel ils sont vus à l'œil nu (α) ; ils augmentent le pouvoir séparateur de l'œil

remarque : grossissement G : rapport entre des angles
grandissement γ : rapport entre des distances

c) La loupe :

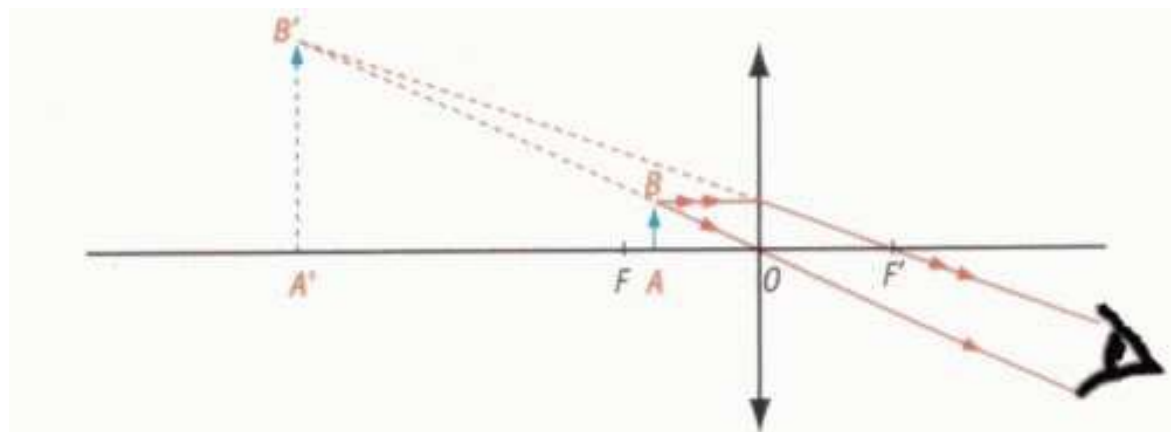
Une loupe est une lentille épaisse de courte distance focale. Elle permet de voir des objets de relativement petite taille peu éloignés.

Pour que l'œil normal observe un objet de petite taille sans fatigue (sans accommoder), il faut placer la loupe de telle sorte que l'image soit rejetée à l'infini, c'est-à-dire au foyer-objet F

d_m : objet vu sans la loupe : maximum d'accommodation $\rightarrow \alpha$
loupe : l'œil ne doit plus accommoder $\rightarrow \alpha'$

Grossissement de la loupe : $G = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$

Le Grossissement Commercial de la loupe, G_C , correspond par convention au grossissement pour l'œil normal (emmétrope), c'est-à-dire pour $PP = d_m = 25 \text{ cm}$



Construction de l'image $A'B'$ d'un objet AB à travers une loupe modélisée par une lentille mince.

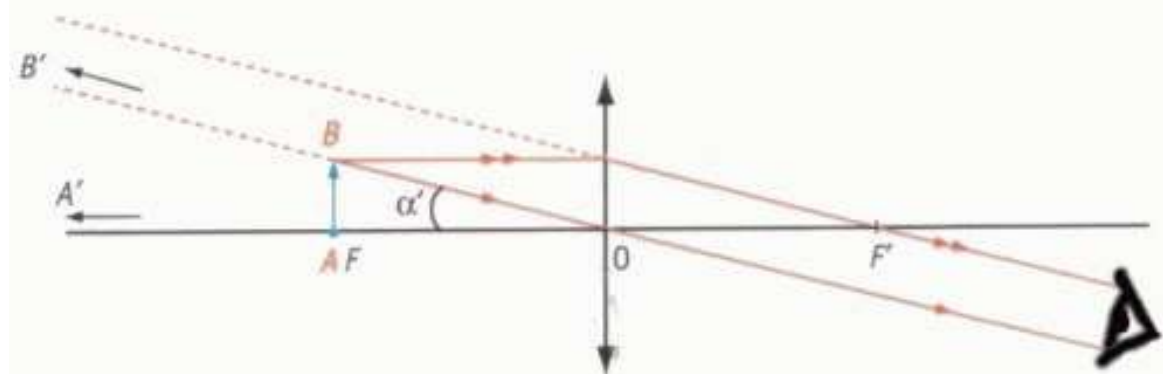


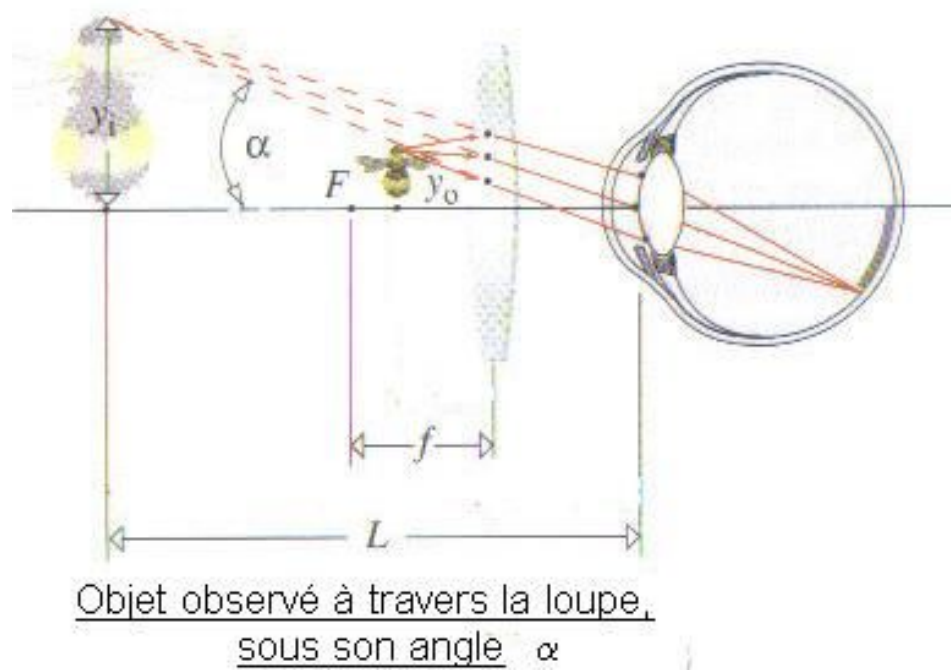
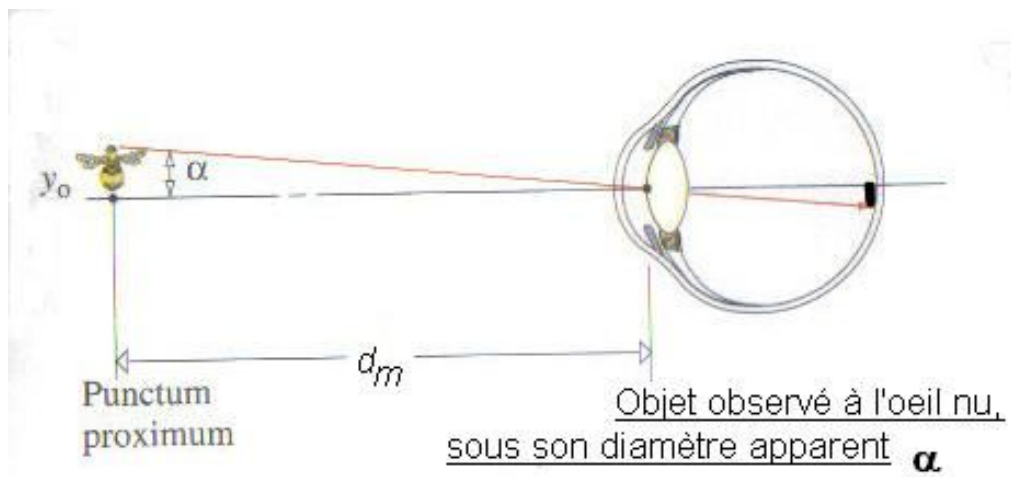
Image $A'B'$ rejetée à l'infini.

$$\text{on a : } \alpha' = \frac{AB}{f'} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{AB}{d_m}$$

$$d'où : \quad G_C = \frac{AB/f'}{AB/d_m} \Rightarrow G = \frac{d_m}{f'} = 0,25 \times \frac{1}{f'} = 0,25 \text{ C}$$

Grossissement commercial d'une loupe : $G = \frac{f'}{4}$

Utilisation d'une loupe :



d) L'appareil photographique :

- L'objectif d'un appareil photo peut être modélisé par une lentille mince convergente de distance focale f' et de centre optique O
- La pellicule représente l'écran de ce système optique ; sa position est fixe au fond du boîtier
- La mise au point : pour effectuer la mise au point, la pellicule étant fixe, c'est l'objectif qu'on déplace :
 - Pour un objet placé à l'infini, il faut ajuster l'objectif afin que la pellicule soit située au plan focal-image
 - On a vu que plus l'objet s'approche de la lentille, plus l'image s'en éloigne ; donc, pour que la pellicule recueille toujours une image nette de l'objectif par la lentille, il faut augmenter la distance objectif-pellicule : cela revient à déplacer l'objectif vers la gauche (l'objectif avance, il sort de l'appareil)

Remarque : le grandissement est négatif, l'image est à l'envers sur la pellicule

Exemple : un objectif d'appareil photo a une distance focale de 10 cm

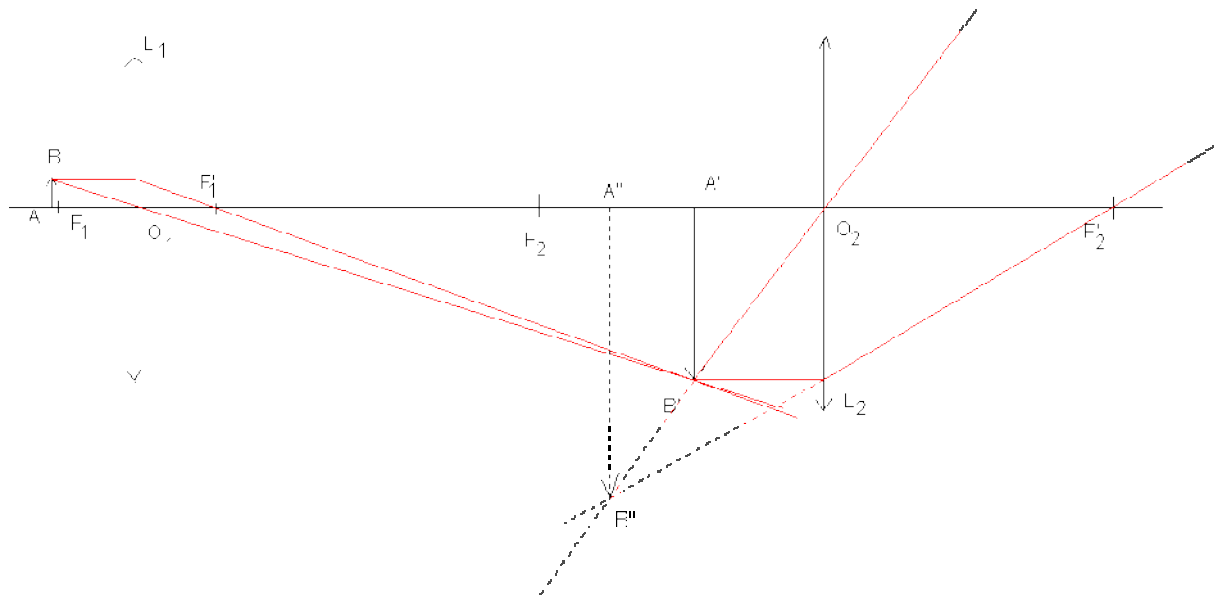
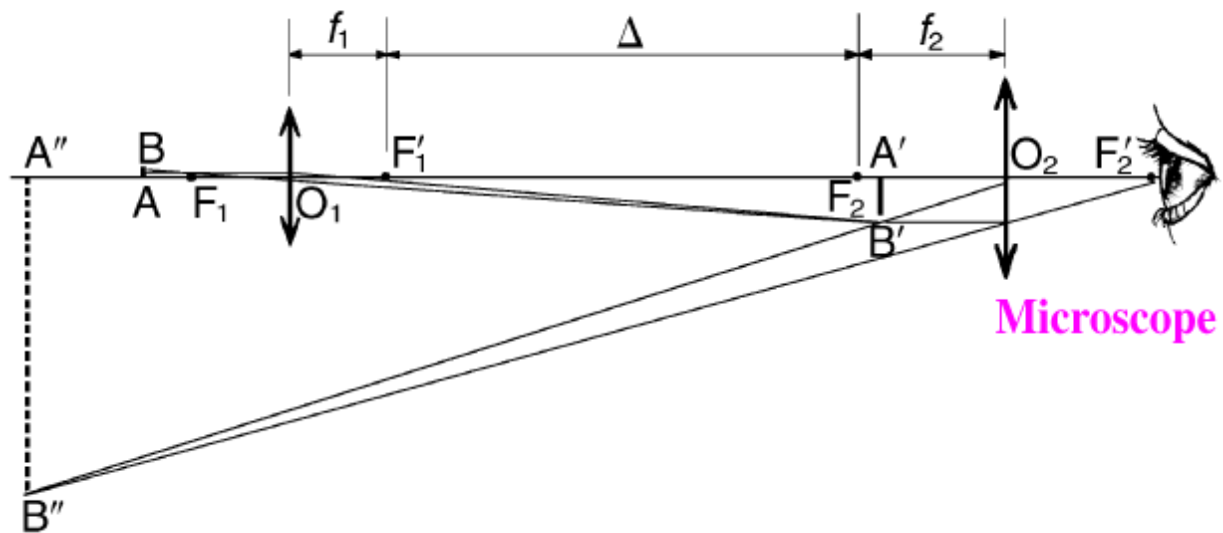
- a) Si l'appareil est mis au point sur un enfant qui se tient à 2 m de l'objectif, quelle doit être la distance entre la pellicule et la lentille ? (\Rightarrow réponse : 10,53 cm, l'objectif sort un peu)
- b) Calculer le grandissement (\Rightarrow réponse : $\gamma = -0,053$)
- c) Si l'enfant mesure 1 m, quelle est la taille de son image sur le film ?
(\Rightarrow réponse : $A'B' = -5,3$ cm)

e) Le microscope :

Il est constitué de l'association de deux lentilles convergentes L_1 et L_2 : l'objectif et l'oculaire. Il donne un grossissement plus important que la loupe, permettant d'examiner des objets très petits, et proches. La loupe permet d'observer des détails de l'ordre de 3 μm , le microscope permet d'observer des détails de 0,2 μm

L'**objectif**, caractérisé par son grandissement γ_1 , a une distance focale très petite (quelques mm) et est placé très devant le foyer-objet de l'objet à observer. Il fournit une image réelle renversée fortement agrandie.

Cette dernière est encore plus agrandie par l'**oculaire**, (d'une distance focale plus grande que l'oculaire, de l'ordre du cm) caractérisé par son grossissement G_2 , qui fonctionne comme une loupe. L'image finalement observée est une image virtuelle, renversée, et agrandie.

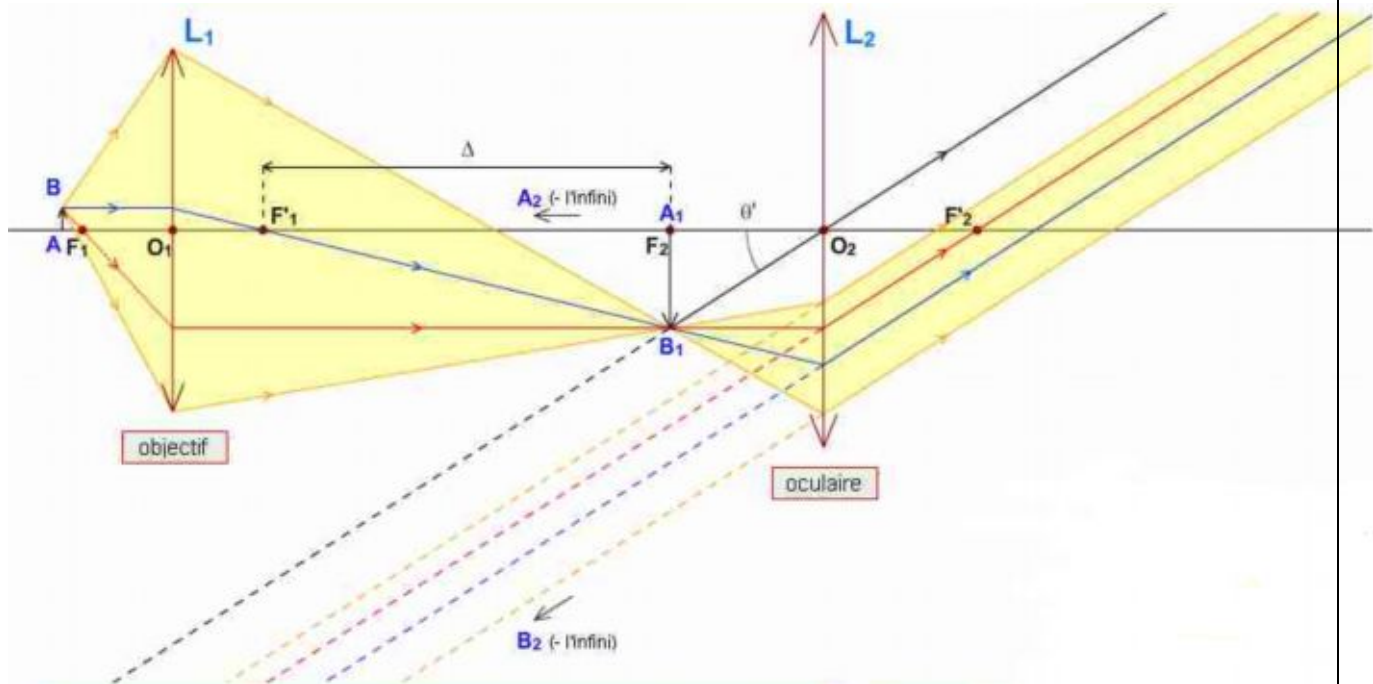


Microscope standard :

montage afocal : il est possible, par superposition de lentilles (lentilles accolées), d'obtenir un système optique qu'on dit afocal. Cela signifie que la vergence totale d'un tel système est nulle. C'est-à-dire aussi que sa longueur focale est infinie. Un système optique afocal de lentilles minces collées n'aurait ainsi aucun effet sur les rayons lumineux le traversant. On peut donc se demander à quoi peut bien servir un tel système puisqu'il pourrait tout simplement ne pas être là. L'utilité est lorsqu'on écarte ces même lentilles l'une de l'autre (ou les unes des autres) : la distance entre les lentilles est non nulle et on se retrouve alors avec un système qui peut augmenter ou diminuer la largeur d'un pinceau parallèle.

Dans le montage afocal, le foyer principal image de l'objectif est confondu avec le foyer principal objet de l'oculaire $\Rightarrow A'$ coïncide avec F_2

L'image par L_2 est ainsi rejetée à l'infini, l'œil peut voir sans accommoder.



α' : angle sous lequel l'objet est vu à travers l'oculaire

α : angle sous lequel l'objet est vu à l'œil nu = diamètre apparent

Grossissement standard :

$$G = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$$

$$G = |\gamma_1| \times G_2$$

Le grossissement commercial est donc le produit du grandissement de l'objectif et du grossissement commercial de l'oculaire. On voit donc l'intérêt d'associer deux lentilles car on peut obtenir de forts grossissements tout en conservant l'ouverture de l'instrument ; en effet avec une loupe, pour obtenir un grossissement équivalent, on aurait du utiliser une focale plus petite que l'objectif du microscope (L1), donc une ouverture plus petite.

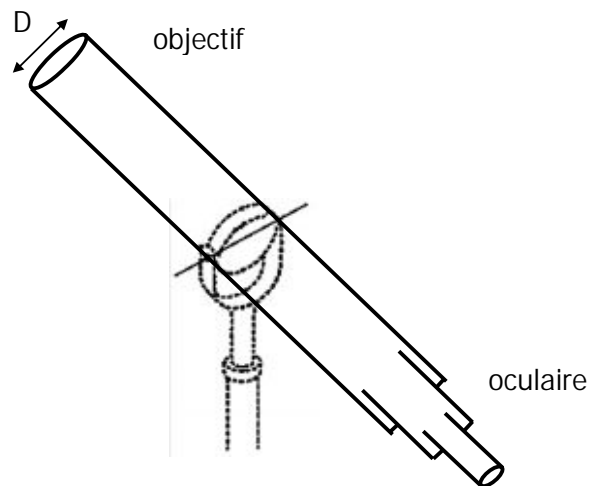
Grossissements commerciaux des microscopes : entre 25 et 25 000

f) La lunette astronomique :

La lunette permet d'observer les détails d'objets situés à l'infini.

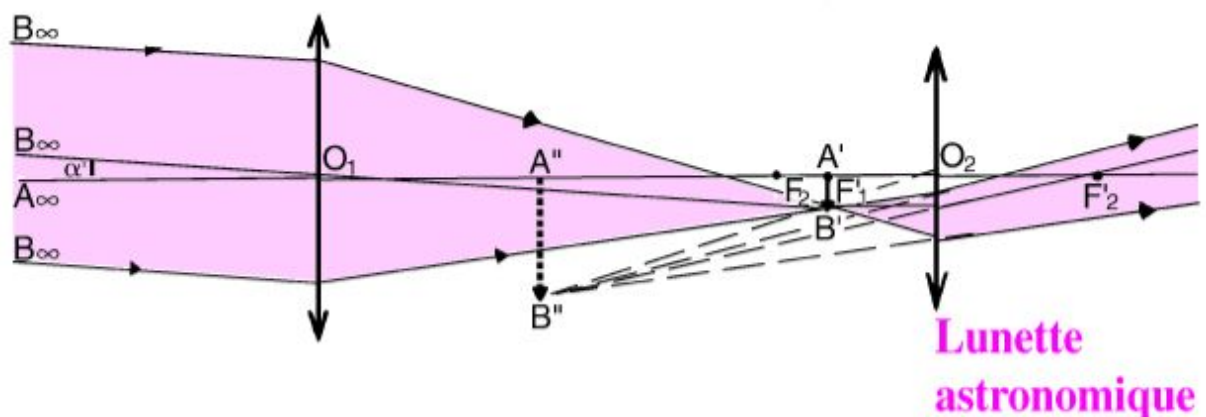
Objectif : il peut être assimilé à une lentille mince convergente de grand diamètre d'ouverture D (entre 20 cm et 1 m) et de grande distance focale f_1 (15 à 20 fois ce diamètre D).

Oculaire : courte distance focale, de quelques mm à quelques cm



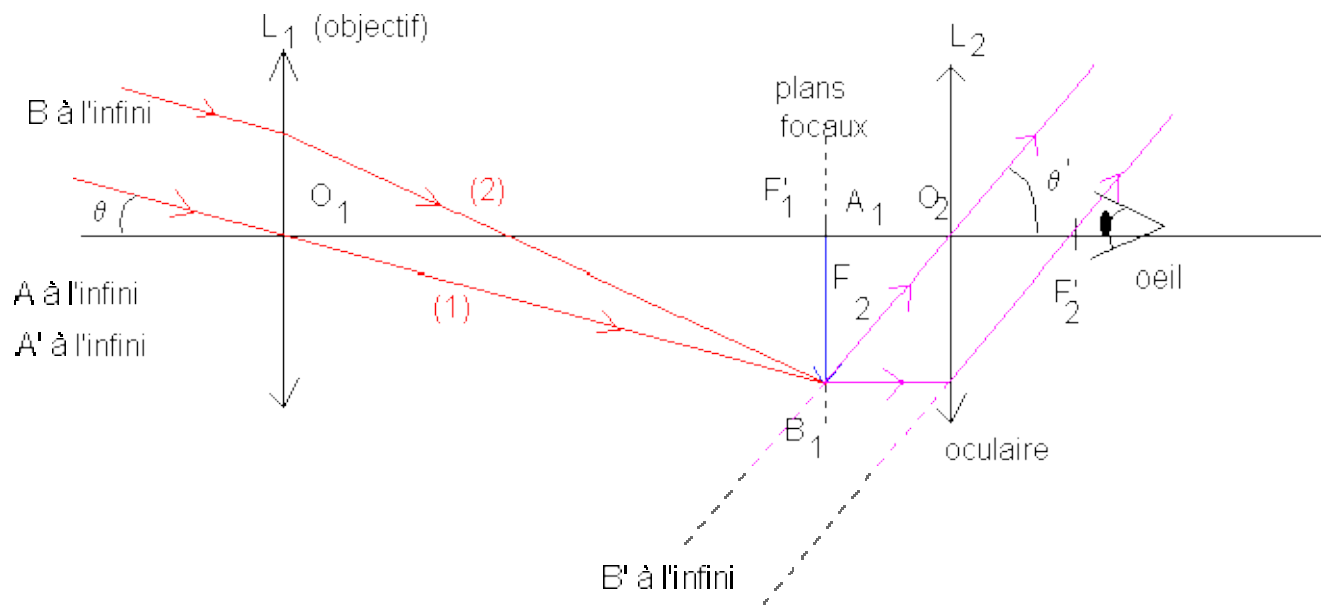
Dans le cas d'un objet à l'infini, un astre par exemple, l'image intermédiaire $A'B'$ se forme dans le plan focal image de l'objectif ; cette image est d'autant plus agrandie que la distance focale est importante.

Cette image (intermédiaire) sert alors « d'objet » pour l'oculaire, qui joue alors le rôle de loupe et forme une image $A''B''$ virtuelle encore plus agrandie.



On remarquera que cet instrument inverse les images ce qui n'est pas un problème en astronomie mais l'est pour d'autres usages tel que l'observation d'objets terrestres. La lunette terrestre possède, elle, un oculaire divergent, ce qui permet une image droite des objets.

Lunette afocale : le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire, ce qui rejette l'image finale à l'infini et permet à l'œil de ne pas accommoder et d'observer une image nette.



g) le cercle oculaire :

Le cercle oculaire est défini comme l'image de l'objectif à travers l'oculaire. L'intérêt est que tous les rayons qui entrent par l'objectif en sortent par l'oculaire.

Comme le diamètre de la pupille est toujours supérieur au cercle oculaire, toute la lumière pénétrant dans le microscope sera recueillie par l'œil.

C'est donc en ce point que l'on doit placer l'œil, afin de recueillir un maximum de lumière.

